

**Deutsches Reich**  
**Reichsamt für Wetterdienst**

---

**Wissenschaftliche Abhandlungen**  
**Band VI**

**Nr. 2**

**Die Frostschadenverhütung**

von

**Otto Wilhelm Kessler**

und

**Wolfgang Kaempfert**

---

**Mit 9 Tafeln**

---

**Deutsches Reich**  
**Reichsamt für Wetterdienst**

---

**Wissenschaftliche Abhandlungen**  
**Band VI**

**Nr. 2**

**Die Frostschadenverhütung**

von

**Otto Wilhelm Kessler**

und

**Wolfgang Kaempfert**

---

Mit 9 Tafeln

---

---

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1940

ISBN 978-3-662-01896-5 ISBN 978-3-662-02191-0 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-02191-0

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Vorwort . . . . .	6
I. Das zeitliche und räumliche Auftreten von Nachtfrösten.	
A. Die meteorologischen Faktoren, die den Eintritt von Nachtfrösten bedingen . . . . .	7
B. Der nächtliche Wärmehaushalt . . . . .	9
C. Das Entstehen der bodennahen Kaltluft . . . . .	14
D. Die Beurteilung der Frostgefährdung im Gelände und die lokale Klimaverbesserung . . . . .	18
II. Die Frostvorhersage.	
A. Einleitung . . . . .	23
B. Die theoretische Berechnung des Temperaturminimums durch Berechnung der statischen Abkühlung . . . . .	25
1. Allgemeines . . . . .	23
2. Die Frostvorhersage auf Grund der Lufttemperatur allein . . . . .	24
a) Die „Median-hour“-Methode . . . . .	24
b) Die „Post-median-hour“-Methode . . . . .	25
c) Die „Pre-median-hour“-Methode . . . . .	26
d) Die Maximum-Minimum-Methode . . . . .	26
e) Die „Daily-temperature-range“-Methode . . . . .	26
3. Die Frostvorhersage auf Grund der Temperatur und des Wasserdampfgehaltes der Luft . . . . .	27
a) Die Kammermann'sche Vorhersage . . . . .	27
b) Die zweite Regel von Kammermann . . . . .	27
c) Die Formel von Ångström . . . . .	27
d) Die Frostvorhersage nach der Taupunkt-Methode . . . . .	28
e) Die in der Praxis gebräuchlichen Instrumente zur Bestimmung des Taupunkts . . . . .	30
f) Die Abweichung des Temperaturminimums vom Taupunkt . . . . .	31
g) Die hygrometrischen Formeln . . . . .	31
h) Die Äquivalenttemperatur und das Prötmeter . . . . .	33
4. Die Frostvorhersage auf Grund des Wärmenachschubes vom Boden . . . . .	34
C. Die Versuche zur Frostvorhersage unter Berücksichtigung dynamischer Änderungen . . . . .	34
1. Die Berechnungsversuche der dynamischen Änderungen . . . . .	34
2. Die Vorhersage der Wetterwarten . . . . .	35
D. Die Verbindung der Zentralvorhersage mit örtlicher Beobachtung . . . . .	36
1. Die Bestimmung der wetterwirksamen Luftmassen . . . . .	36
2. Die Einrichtung von Stationsnetzen . . . . .	36
3. Die Alarmthermometer . . . . .	37
E. Zusammenfassung . . . . .	40
III. Frost und Pflanze.	
A. Der Frostschaden ist eine pflanzenphysiologische Frage . . . . .	41
B. Die Kardinalpunkte der Temperatur für den Pflanzentod . . . . .	41
C. Die inframinimale Temperatur . . . . .	42
1. Allgemeine Wirkungen der inframinimalen Temperatur . . . . .	42
2. Das Erfrieren . . . . .	42
a) Kältestarre und Kältetod bei Temperaturen um Null Grad . . . . .	42
α) Die Tötungstemperatur . . . . .	43
β) Der Einfluß der Zeit . . . . .	43
γ) Die Veränderungen in der Zelle durch Erstarren und Erfrieren . . . . .	43
δ) Theorien des Kältetodes . . . . .	43
e) Das Wiederaufleben nach dem Erstarren . . . . .	44
b) Kältestarre und Kältetod bei Temperaturen unter Null Grad . . . . .	44
α) Der Gefrierpunkt des Zellsaftes . . . . .	45
β) Die Unterkühlung . . . . .	45
γ) Der Kältetod unter Null ohne Eisbildung . . . . .	46
δ) Kältestarre und Kältetod bei Temperaturen unter Null bei gleichzeitiger Eisbildung . . . . .	46
e) Die Frostresistenz . . . . .	49

IV. Physiologische Maßnahmen zur Frostschadenverhütung.	Seite
A. Die Pflanzenzüchtung als Mittel gegen Frostschäden . . . . .	50
B. Die Pflanzenernährung und Düngung als Mittel gegen Frostschäden . . . . .	54
C. Die Auswirkung der Frostschäden und die Behandlung frostgeschädigter Pflanzen . . . . .	56
V. Die Bedeckungsmaßnahmen.	
A. Geschichtliches über die Bedeckung als Frostschutz . . . . .	57
B. Die verschiedenen Formen der Bedeckungen . . . . .	62
1. Anhäufeln mit Erde und Verlegen der Triebe in den Erdboden . . . . .	62
2. Eigentliche Bedeckungsmaßnahmen . . . . .	63
C. Ermittlung des Wirkungsgrades der Bedeckungsmaßnahmen . . . . .	64
1. Instrumentaltemperatur und wahre Lufttemperatur . . . . .	65
2. Wie läßt sich der thermische Effekt der Bedeckung erfassen? . . . . .	70
D. Meßergebnisse bei den verschiedenen Bedeckungsverfahren . . . . .	72
1. Technische Einzelheiten der Versuchsanstellung . . . . .	72
2. Großflächige Bedeckungsmaßnahmen . . . . .	75
a) Die einseitige Bedeckung . . . . .	75
b) Die dachförmige Bedeckung . . . . .	77
c) Die zeltförmige Bedeckung . . . . .	79
d) Die horizontale Bedeckung . . . . .	79
e) Die bodenaufliegende Bedeckung . . . . .	80
3. Einzelbedeckungen . . . . .	81
a) Untersuchungen von Löschnig . . . . .	81
b) Untersuchungen von W. Schmidt . . . . .	81
c) Untersuchungen von Kessler . . . . .	87
E. Zusammenfassung . . . . .	91
VI. Die Frostschadenverhütung durch Ausstrahlungsschutz unter festen und flüssigen Luftrübungen.	
A. Einteilung der Verfahren . . . . .	92
B. Die Wirkung der Luftrübungen und der Nebel . . . . .	92
C. Die Bodenausstrahlung und deren Absorption durch Wasserdampf und Nebel . . . . .	92
D. Welche Effekte sind durch die Luftrübungsmethoden zu erwarten? . . . . .	97
E. Die Versuche mit den verschiedenen Luftrübungsverfahren . . . . .	98
1. Luftrübung mit Ammonchlorid . . . . .	98
2. Luftrübung mit Zinknebel . . . . .	99
3. Luftrübung mit Räucherpulver Woesch . . . . .	99
4. Luftrübung mit Phosphor . . . . .	99
5. Kunstnebel aus Nebelsäure . . . . .	101
a) Prüfung von Nebelsäure auf Pflanzenschädlichkeit . . . . .	102
b) Die Verfahren der Vernebelung mit Nebelsäure und die von den Firmen aufgestellten Kostenberechnungen . . . . .	104
6. Versuche mit Nebelsäure an Mosel und Saar . . . . .	106
a) Nebelsäureversuch bei Saarstein . . . . .	106
b) Verneblungsversuch Föhren bei Trier . . . . .	113
c) Verneblungsversuch Trier — Euren . . . . .	117
7. Weitere Verneblungsversuche . . . . .	120
F. Vernebelung von Frostentstehungsgebieten durch Flugzeuge (Frostschutz und Luftschutz) . . . . .	120
G. Die Luftrübung durch Räuchern als Frostschutz . . . . .	120
1. Geschichtliches über das Frosträuchern . . . . .	120
2. Die Frosträucherversuche in Nordamerika . . . . .	124
3. Die Frosträucherversuche in Österreich . . . . .	125
4. Die Frosträucherversuche in Holland . . . . .	129
5. Die in Deutschland durchgeführten Frosträucherversuche . . . . .	130
a) Der Frosträucherversuch 1928 in Oppenheim . . . . .	130
b) Die Versuche des Reichsausschusses für Frostabwehr 1929 . . . . .	131
6. Die Prüfung der Frosträuchermittel . . . . .	132
a) Laboratoriumsversuche über Rußausbeute . . . . .	132
b) Praktische Versuche, den Effekt des Räucherns zu ermitteln . . . . .	135
c) Die Verminderung der effektiven Ausstrahlung durch das Frosträuchern . . . . .	138
7. Frosträuchern mit Kaltluftabriegelung im Ahrtal . . . . .	139
a) Die Luftzirkulation und Temperaturverteilung im Becken von Ahrweiler . . . . .	139
b) Die Frosträucher- und Kaltluftabriegelungsversuche im Ahrtal 1930 . . . . .	142
H. Zusammenfassung . . . . .	147
VII. Erhöhung des Wasserdampfgehaltes der Luft als Frostschutz . . . . .	148

	Seite
VIII. Die Heizung als Frostschutz.	
A. Die Geschichte der Frostheizung . . . . .	150
1. Die Entwicklung in den Vereinigten Staaten von Amerika . . . . .	150
2. Die Einführung und Ausbreitung in Europa . . . . .	151
3. Die Einführung in anderen außereuropäischen Ländern . . . . .	152
B. Die verschiedenen Heizverfahren . . . . .	153
1. Allgemeines über Brennstoff und Heizertypen . . . . .	153
2. Die festen Brennstoffe . . . . .	153
a) Stein- und Braunkohle . . . . .	153
α) Die Verbrennung von Kohle in Öfen . . . . .	154
β) Offen ausgelegte Briketts . . . . .	156
b) Holz, Holzkohle und sonstige feste Brennstoffe . . . . .	157
3. Die flüssigen Brennstoffe . . . . .	157
a) Die destillierenden Heizer . . . . .	159
α) Offene Öfen . . . . .	159
β) Öfen mit Schornsteinen . . . . .	160
b) Die nicht-destillierenden Heizer . . . . .	161
4. Die elektrische Heizung . . . . .	161
C. Die Wirkungsweise der Heizung . . . . .	161
D. Meßergebnisse bei den verschiedenen Heizverfahren . . . . .	168
1. Versuche in den Vereinigten Staaten von Amerika . . . . .	168
2. Österreichische und deutsche Versuche (ohne Trier) . . . . .	172
3. Die Heizversuche des Reichsausschusses für Frostabwehr und der Forschungsstelle Trier . . . . .	174
a) Zur Versuchsmethodik . . . . .	174
b) Die Heizversuche mit Ölöfen . . . . .	177
c) Die Heizversuche mit offen ausgelegten Briketts . . . . .	182
d) Die Heizversuche mit Brikettöfen . . . . .	187
e) Kombiniertes Heizen und Räuchern . . . . .	196
f) Versuche zur Entwicklung eines rußfreien Heizverfahrens . . . . .	197
g) Verwendung der elektrischen Heizung zur Frostschadenverhütung . . . . .	197
E. Zusammenfassung . . . . .	199
IX. Die Belüftung und Entlüftung als Frostschutz.	
A. Die Belüftung (Ventilation) . . . . .	200
1. Die Versuche von J. Löschnig 1914 . . . . .	200
2. Amerikanische Versuche . . . . .	201
3. Versuche von Moser 1934 . . . . .	202
4. Belüftungsversuch in Avelsbach 1936 . . . . .	203
B. Die Entlüftung eines Tales (Luftdrainage) . . . . .	207
C. Die Frostschadenverhütung durch Bewegen der Pflanzen . . . . .	208
X. Die Beregnung als Frostschutz.	
A. Worin besteht die Schutzwirkung der Beregnung? . . . . .	208
B. Die Beregnungsversuche bei Trier . . . . .	209
1. Die Versuche im Frühjahr 1932 . . . . .	209
2. Die Versuche im Frühjahr 1934 . . . . .	214
3. Die Versuche im Frühjahr 1935 . . . . .	222
4. Die Versuche im Frühjahr 1936 . . . . .	223
C. Anderweitige Beregnungsversuche . . . . .	226
1. Die Versuche in Kleinbeeren . . . . .	226
2. Die Beregnung als Schutz gegen Winterfröste bei immergrünen Pflanzen . . . . .	226
3. Anforderungen an Beregnungsgeräte, die zur Frostschutzberegnung eingesetzt werden . . . . .	227
D. Zusammenfassung . . . . .	228
1. Worin besteht die Wirkung der Beregnung als Frostschutz? . . . . .	228
2. Wie lange wird beregnet? . . . . .	228
3. Welche Wassermengen müssen gegeben werden? . . . . .	228
4. Welche Kulturen lassen sich schützen? . . . . .	229
5. Können Pflanzen durch Überbrausen geschützt werden? . . . . .	229
6. Offene Fragen der Frostschutzberegnung . . . . .	229
XI. Das Unterwassersetzen von Pflanzen und Berieseln des Bodens zur Frostschadenverhütung.	
A. Das Überfluten der Pflanzen . . . . .	229
B. Das Berieseln des Bodens . . . . .	230
C. Das Auffüllen von Wassergräben während der Frostzeit . . . . .	231

<b>XII. Weitere Vorschläge zur Verhütung von Frostschäden.</b>	<b>Seite</b>
A. Das Versuchswesen zur Frostschadenverhütung wurde auch mit abwegigen Verfahren befaßt . . . . .	231
B. Vorschläge zur Geländeheizung . . . . .	231
C. Elektrizität gegen Frost . . . . .	232
D. Frostschadenverhütung durch Ventilation . . . . .	232
E. Frostschutz der Pflanzen durch Bedecken mit aufgetragenen Mitteln . . . . .	232
F. Bespritzungsverfahren zur physiologischen Beeinflussung der Pflanzen . . . . .	233
G. Vorschläge zur Verzögerung des Austriebs der Pflanzen . . . . .	233
<b>XIII. Betriebsmaßnahmen zur Verminderung der Frostschäden.</b>	
A. Die Bodenbearbeitung . . . . .	234
B. Die Einflüsse der Pflanzenernährung . . . . .	234
C. Die Maßnahmen, die bei der Pflanzung zu beachten sind . . . . .	234
Schlußwort . . . . .	235
Schriftennachweis . . . . .	236
9 Tafeln mit den Abbildungen 163—192.	

## Vorwort.

Die Jahre 1926, 1927 und 1928 hatten dem deutschen Weinbau katastrophale Ertragsausfälle durch wenige Froststunden im Mai gebracht. Die Hessische Lehr- und Versuchsanstalt für Weinbau in Oppenheim am Rhein hatte den Diplomlandwirt Dr. Otto Kessler mit der Durchführung von Frostschadenverhütungsversuchen betraut, der mit einem Versuch, die Weinbaugemarkungen Oppenheim und Dienheim in Rheinhessen zu schützen, im Mai 1928 einen durchschlagenden Erfolg aufzuweisen hatte. Während hier eine Vollernte gemacht wurde und mehrere hunderttausend Reichsmark an Ertrag gerettet worden waren, waren zur gleichen Zeit in allen Frostlagen Rheinhessens schwerste Schäden aufgetreten. Der Gesamtschaden, den der deutsche Weinbau allein im Jahre 1928 erlitten hat, wurde auf 60 Millionen Reichsmark geschätzt.

Die erfolgreichen Versuche in Oppenheim, durch Frosträuchern und Abdecken der Reben einen Frostschutz zu erzielen, veranlaßten das Reichministerium für Ernährung und Landwirtschaft, dem Landwirtschaftsassessor Dr. Kessler einen Forschungsauftrag zur Klärung aller Fragen, die mit der Frostschadenverhütung zusammenhängen, zu erteilen. Ministerialdirektor Streil und Ministerialdirigent Schuster II förderten das Versuchswesen in jeder Weise. Es sollten einerseits alle bekannten oder im Laufe der Durchführung der Versuche bekannt werdenden Verfahren zur Verhütung von Frostschäden einer zahlenmäßigen Bewertung unterzogen werden. Ferner sollten brauchbare und wirtschaftlich tragbare Verfahren für die Praxis erarbeitet werden.

Als Verbindung zwischen der Praxis und dem Versuchswesen wurde von ihnen ein Reichsausschuß für Frostabwehr im deutschen Weinbau gegründet. Der Vorsitz wurde dem Direktor der Höheren Lehr- und Versuchsanstalt für Wein-, Obst- und Gartenbau in Geisenheim, Professor Dr. Franz Muth, und die Geschäftsführung Dr. Otto Kessler übertragen.

Es gehörten dem Reichsausschuß außer dem Reichsminister für Ernährung und Landwirtschaft die Direktoren der Weinbauanstalten Oppenheim, Trier, Neustadt a. d. Haardt, Würzburg, Freiburg und Weinsberg, die Biologische Reichsanstalt für Land- und Forstwirtschaft, drei Vertreter des deutschen Weinbauverbandes sowie die Universitätsprofessoren Dr. Linke, Frankfurt/M., und Dr. G. Gassner, Braunschweig, an. Der Ausschuß bestand von Anfang 1929 bis Mitte 1932. Auf vier Tagungen wurden über die anzustellenden Versuche und die Übertragung in die Praxis Beschlüsse gefaßt und die Tagungen in Niederschriften festgelegt.

Nach Auflösung des Reichsausschusses gründete der an der Frostschadenverhütung sehr interessierte Professor Muth eine Arbeitsgemeinschaft für Frostbekämpfung, der unter seiner Leitung in erster Linie die Präsidenten des Weinbauverbandes und des Reichsverbandes des deutschen Gartenbaues sowie der Landeshauptmann der Rheinprovinz, der Direktor der Biologischen Reichsanstalt für Land- und Forstwirtschaft und der Reichsernährungsminister angehörten.

1929 wurde Dr. Kessler Leiter des Instituts für Klimaforschung der Provinzallehranstalt für Weinbau, Obstbau und Landwirtschaft in Trier. Der Landeshauptmann der Rheinprovinz hatte sich von der Bedeutung der Arbeiten auf dem Gebiete der Agrarmeteorologie überzeugen lassen und auf Anregung von Direktor Dr. H. Herberg ein eigenes Institut für diese Fragen gegründet. Naturgemäß wurde damit der Schwerpunkt der Forschungen in das Weinbaugebiet der Mosel gelegt, zumal die Direktoren der Staatsweingüter in Trier, Dr. K. Decker und O. Richter, die Versuche durch die Überlassung des Geländes und durch tätige Mitarbeit weitgehend förderten. Bei der Vereinheitlichung des deutschen Reichswetterdienstes wurde das Institut für Klimaforschung als Außenstelle des Reichsamtes für Wetterdienst unter seiner heutigen Bezeichnung in den Reichswetterdienst übernommen. Die Arbeiten wurden von Dr. Kessler weitergeführt, und die Unterstützung durch das Reichsamt ermöglichte nunmehr auch die Herausgabe der bisherigen Ergebnisse.

Seit 1929 arbeitete der Meteorologe Dr. W. Kaempfert ständig an den Versuchen mit. Vorübergehend waren ferner beteiligt Dr. P. Dubois, Dr. H. Schanderl, Dr. Th. Schrader und Dr. K. Müller.

Die vorliegende Arbeit wurde anfangs 1938 abgeschlossen. Sie wurde auf besondere Anordnung des komm. Präsidenten des Reichsamtes für Wetterdienst, Professor Dr. Knoch, durchgeführt.

## I. Das zeitliche und räumliche Auftreten von Nachtfrösten.

### A. Die meteorologischen Faktoren, die den Eintritt von Nachtfrösten bedingen.

Vorangeschickt sei, daß es sich bei der Besprechung der Frage, unter welchen Außenbedingungen Frostschäden zustandekommen, in vorliegendem Falle nur um die in unseren Breiten während der Vegetationszeit eintretenden Frostschäden handelt, weshalb hier der kennzeichnende Ausdruck „Nachtfröste“ gewählt wurde. Nachtfröste sind solche Wetterlagen im Vegetationsbereich, bei denen während der Nacht eine Lufttemperatur von  $0^{\circ}$  erreicht bzw. unterschritten wird. Im Gegensatz dazu stehen die Fälle, in denen die Lufttemperatur auch tagsüber unter  $0^{\circ}$  kommt. Diese Fälle treten in den gemäßigten Breiten Europas meist nur im Winter auf, also in der Zeit der Vegetationsruhe. Die Voraussetzung ist entweder lange anhaltende Energieabgabe durch Ausstrahlung, die im Winter gegenüber der Einstrahlung stark überwiegt, oder Kaltluftzufuhr aus Gebieten, über denen sich winterliche Kaltluftmassen ansammeln.

Bei der Gruppe „Nachtfröste“ liegt die Betonung auf der ersten Silbe. Es wird — im Gegensatz zum „Winterfrost“ — die Beteiligung des täglichen Wärmeganges gegenüber dem jahreszeitlichen betont.

Betrachtet man jeweils die Wetterlagen, die zur Bildung von Nachtfrösten führen, und vergleicht man sie mit den Wetterlagen der Winterfröste, so sieht man, daß zwar die gleichen meteorologischen Faktoren zum Frost führen, daß aber ihre quantitative Beteiligung verschieden ist.

Während die Unterschreitung des Nullpunktes der Lufttemperatur in unseren Klimagebieten im Winter eine gewohnte Erscheinung ist, stellt dies im Frühjahr und Herbst, vor allem aber im Sommer eine Anomalie dar. Man nennt in Deutschland die von April (in Norddeutschland etwa ab Mai) bis anfangs Juni eintretenden Fröste, weil sie Nachzügler des vergangenen Winters sind, „Spätfröste“, „Kälterückfälle“ oder „Frühjahrsfröste“, die von Mitte Juni bis anfangs September auftretenden „Sommernachtfröste“ und von da ab bis anfangs Oktober (im Süden Deutschlands bis Ende Oktober) vorkommenden Fröste „Herbst- oder Frühfröste“. Abweichend von Geiger<sup>121</sup>),\*) dessen fundamentale Arbeit das ganze Frostproblem erst ins Rollen brachte, schlagen wir also vor, die Sondergruppe der Sommernachtfröste beizubehalten, da diese ein nur örtlich begrenztes Auftreten zeigen, und sie nicht unter die Spätfröste zu rechnen sind, die, wie die Frühfröste, eine regionale Ausbreitung aufweisen. Auch möchten wir jetzt schon darauf hinweisen, daß wir uns Geigers typisierender Einteilung der Fröste in Advektiv- und Strahlungsfröste nicht voll auf anschließen vermögen, was später begründet wird.

Die große wirtschaftliche Bedeutung der Nachtfröste führte seit Jahrhunderten zwangsläufig den Bauern dazu, sich mit diesen „feindlichen“ Wetterlagen zu beschäftigen. Sie konnten restlose Erntevernichtung bei einzelnen Kulturarten bedeuten. Folglich mußte man gegen sie ankämpfen. Ursprünglich geschah es nur mit Ausweichen, später mit aktiven Kampfmitteln. Das Ausweichen ging durch Aufsuchen frostfreien Geländes — worüber später berichtet wird — und in dem Versuch, durch späteren Anbau oder rechtzeitiges Ernten der Frostgefährdung zu entkommen, vor sich. Von den hundert, ja tausenden von bäuerlichen Wetterregeln gehören diejenigen, die sich mit den Spätfrösten befassen, zu den treffsichersten. Die Frage nach dem Witterungsfaktor war klar (nächtliches Minimum unter  $0^{\circ}$ ), die Beobachtungsmöglichkeit des erfolgten Eintritts gut (der beobachtete Schaden, der instrumentelle Festlegung erübrigte) und die zeitliche Festlegung (Datennotiz) einfach. So bildeten sich schon bald feste Meinungen bei den Bauern, die auch in die „hundertjährigen“ Kalender übernommen wurden. Es wurde eine Tagesfolge im Mai verdächtigt, nämlich die Tage vom 11. bis 15. Mai, die besonders zu Nachtkälte neigen. Da man früher die Tagesheiligen zum Schutze gegen Frostschäden anzurufen pflegte, nannte man diese böse Witterungstrecke „die Eisheiligen“. Die Tagesheiligen hießen Mamertus (11. V.), Pankratius (12. V.), Servatius (13. V.), Bonifazius (14. V.), und mancherorts wurde auch noch Urbanus (25. V.) dazugesetzt. Dieser war der Schutzheilige der besonders um ihre Reben bangenden Winzer. Dann kam noch die „kalte Sophie“, die nach einer mehr in Süddeutschland verbreiteten Wetterregel gefürchtet war (15. V.). Im Anfang Juni rechnete man mit der „Schafkälte“. Da vorher die Schafschur erfolgt war, litten die Schafe in diesen Tagen unter der Kälte.

Die Versuche der Meteorologen, etwa vorhandene Zusammenhänge zwischen Bauernweisheit und Klimadaten im Falle der Spätfröstanzeige zu ergründen, wurden meist mit statistischen Methoden unternommen. Das vergleichsweise herangezogene Tagesmittel möglichst langjähriger Stationen ließ die „Eisheiligen“ nicht in Erscheinung treten (Kremsler<sup>210a</sup>), dagegen war die „Schafkälte“ in der Klimakurve der langjährigen Tagesmittel eher zu erkennen. In Deutschland sind die Stationen mit besonders langen Reihen fast durchweg Stadtstationen, bei welchen Kälteeinbrüche, besonders kurzdauernde, stark gemildert sind. Knoch<sup>205</sup>) hat nachgewiesen, daß sich das

\*) Die Zahlen beziehen sich jeweils auf den Schriftennachweis, S. 236 ff.

erste und letzte Auftreten der Fröste unter dem Stadteinfluß um Wochen verfrühen (Spätfröste) bzw. verzögern (Frühfröste) kann. Die auf seine Anregung von H. Pollack<sup>310)</sup> fortgesetzte Untersuchung bestätigt die Existenz der „Eisheiligen“ für den erfaßten Zeitraum von 1902—1928. Pollack stellte auch die Dynamik dieser Kälteeinbrüche klar.

Die Betrachtung einer Kurve der aus langen Jahren ermittelten Tagesminima, nicht Tagesmittel, zeigt die annähernde Richtigkeit schon eher, obwohl natürlich gerade bei der Minimumspitze die Stationslage ausschlaggebend ist.

Mehr klimatologisch-dynamisch war die Verfolgung der Wetterlagen nach den Gesichtspunkten der Häufigkeit, Dauer und Intensität von Kaltlufteinbrüchen. Hierüber liegen mehrere eingehende Arbeiten vor. Die verhältnismäßig kurze Zeitdauer, innerhalb welcher man an Hand von Wetterkarten nachträglich Frühjahrsfrostlagen studieren kann, läßt leider mengenmäßig kein allzugroßes Vergleichsmaterial zu; dieses Verfahren bestätigt aber immerhin viel besser als die anderen Methoden die vermutete Richtigkeit der Bauernweisheit, da diese Fragebeantwortung der Fragestellung besser gerecht wird.

Letzten Endes besteht auch noch die Untersuchung der Ursachen der Wetterlagen als Möglichkeit einer Frage nach dem zeitlichen Eintritt von Spätfrösten. Diese meteorologisch-dynamische Untersuchungsweise wurde von Roediger G.<sup>319a)</sup> u. a. angewandt.

Aus dem reichen Material von Forschungen auf dem Gebiet des Eintritts von Spätfrösten geht zweifelsohne hervor, daß eine gewisse Häufung zwischen 10. und 18. Mai sowie — natürlich in der Intensität abgeschwächt — vom 2. bis 5. Juni vorhanden ist. Es geht weiter daraus hervor, daß das Wechselspiel zwischen Landerhitzung und daraufhin erfolgendem Luftmassenausgleich vom kühleren Meere her eine Überschwemmung West- und Mitteleuropas (ja manchmal sogar Südeuropas) zur Folge hat, und daß bei dem krassen Luftmassenwechsel der gemäßigten Breiten niemals auch nur annähernd so präzise Monsuneintrittstermine zu erwarten sind, wie es in gewissen tropischen Gegenden der Fall ist. Wenn man in West- und Mitteleuropa vom Frühlingsbeginn spricht, so ist landläufig nicht der kalendermäßige Frühlingsbeginn, der 21. März, gemeint, sondern der Termin der großen Baumbüte, der Apfelbüte. Er kann sich über rund 14 Tage von einem zum anderen Jahre verschieben. Er stellt eine deutlich sichtbare Wetterwirkung auf die Vegetation dar. Wenn die vorausgegangene Witterungsstrecke die Auslösung der Wachstumsphase hervorgerufen hat, dann sind auch gleichzeitig die Bedingungen zum Monsuneintritt gegeben gewesen. Sicher käme man mit dem Vergleich phänologischer Daten und des Eintritts von Frösten weiter als mit der bisherigen Betrachtungsweise. Man würde sich hiermit am stärksten dem stets entscheidenden Punkt: „Ursache und Wirkung“ nähern.

Die bisherigen Forschungen haben ferner gezeigt, daß zwei Faktoren für die Entstehung von schadenbringenden Nachtfrosten ausschlaggebend sind:

- I. Meteorologische Verhältnisse dynamischer (vorher erfolgter Kaltlufteinbruch) und statischer Natur (gute Ausstrahlung bei gleichzeitig schwachem Gradientwind),
- II. Geländegestaltung und Beschaffenheit der Bodenoberfläche.

Je näher der Nachtfrost dem Winter zu auftritt, desto größer pflegt der dynamische Anteil der den Frost bildenden Witterungsfaktoren zu sein. Da die Nachtfroste fast immer advektive Kaltluftmassen voraussetzen, die sich infolge Abnahme von Wind und Bewölkung noch weiter abkühlen, halten wir die von Geiger<sup>121)</sup> eingeführte scharfe Unterscheidung von Advektiv- und Strahlungsfrösten genetisch für nicht voll befriedigend. Am ehestens rechtfertigen noch die weniger bedeutungsvollen Sommernachtfroste die Bezeichnung „Strahlungsfröste“. Aber auch bei diesen ist es nicht die Ausstrahlung allein, die den Frost bedingt, denn in der schönsten Strahlungsnacht fürchtet kein Landwirt einen Frost, wenn der Wind keine Schichtung mit Temperaturumkehr zuläßt. Umgekehrt fürchtet er wieder in sonst ruhigen Strahlungsnächten den Bergwind (Kleinadvektion, die aus dem oft viele km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiet der Täler Kaltluft bringt) oder das Herbeifließen von Kaltluft aus der nächsten Umgebung, z. B. einer Wiese (Kleinstadvektion); häufig sind erst diese Lokaladvektionen schadenstiftend.

Der Geigersche Advektivfrost wäre demnach nur durch Großadvektion bedingt und müßte etwa „Zirkulations“- , der Strahlungsfrost eher „Inversionsfrost“ heißen. Doch halten wir die Bezeichnung Nachtfrost für alle Schadenfröste außerhalb des Winters für ausreichend.

Die Kaltlufteinbrüche erfolgen fast alle aus arktischem Gebiet. Die Betrachtung der Wetterkarten ermöglicht es festzustellen, daß praktisch stets die Kaltluftmasse aus der Kaltlufthaube über dem Nordpolargebiet ausfließt und vom Eismeer her entweder über England oder Skandinavien in Mittel- und Westeuropa eindringt. Nur in Osteuropa ist eine Überschwemmung durch kontinentale Kaltluft als Vorbedingung von Nachtfrosteintritt möglich.

Diese Behauptung gilt für die Frühjahrsfröste. Um diese Zeit ist das Festland schon relativ warm, außer zur Zeit des Winter-Frühjahrsüberganges, also anfangs April in Westeuropa. Anders liegt der Fall im Herbst. Hier ist an sich schon die Unterscheidung, ob es sich um einen „Nachtfrost“, also einen Frost während der Vegetation, um eine Anomalie, handelt, oder ob bereits der Wintereintritt vor sich gegangen ist, recht schwierig. Die Ab-

kühlung tritt im Herbst auf dem Festland schnell ein. Es können sich schon vor einer eindeutigen Winterwetterlage beachtliche Kaltluftmassen gebildet haben, deren Eindringen nach Ost- oder gar Mitteleuropa Anlaß zu Frostschäden gibt. Als Vorbedingung für Sommernachtfröste ist klarzustellen, daß hier nie kontinentale Luft, sondern stets arktische Luft beteiligt ist.

Praktisch haben wir es vorwiegend mit den Frühjahrsfrostschäden zu tun, auf deren Besprechung auch hier das Hauptaugenmerk gerichtet ist. Hierzu stellen wir fest, daß Luftmassen, die längere Zeit in der Arktis lagen, daher kalt, staubfrei und gut durchlässig für langwellige Strahlung sind, teils über die Nordsee, teils über Skandinavien und die Ostsee oder über Finnland vorstoßen.

Das Vordringen der Kaltluftmassen kann bei der heutigen Ausbildung des synoptischen Wetterdienstes in Europa nicht mehr übersehen werden, was von großem Vorteil für die Besserung der Frostvorhersage ist. Da Kaltluft vorwiegend am Boden vordringt, kann man ihr Fortschreiten aus den Meßergebnissen der meteorologischen Stationen feststellen. Hier zeigt sich, daß die Gebirge Hindernisse für das Fortschreiten sind. Nach Breuer<sup>61a)</sup> tritt eine Verzögerung im Fortschreiten einer Kaltluftmasse von Norden nach Süden infolge der Stauwirkung des Gebirges ein, die am rheinisch-westfälischen Gebirge  $\frac{1}{2}$  Tag, im Lee der Eifel 1—2 Tage betragen kann. Man kann ferner Abnahme der Frostintensität im Gefolge des Vordringens nach Süden feststellen. Breuer (ebendort) hat außerdem die Anzahl der Kaltlufteinbrüche in Westdeutschland festzustellen versucht. Wenn er diejenigen, die sich am unteren Niederrhein bemerkbar machten, gleich 100 setzte (bei insgesamt 118 bearbeiteten Fällen), dann ergab sich bis in die Kölner Bucht die gleiche Zahl, bis zur Linie Zentralfifel—Neuwied gelangten 96,6%, bis zur Linie Trier—Frankfurt noch 88,9% der Kaltlufteinbrüche. Da gleichzeitig die Intensität abnimmt, ließen sich wichtige Rückschlüsse für die Landwirtschaft ziehen.

Die Beobachtungen der Frostschäden selbst ergeben das gleiche Bild. Die nördlich gelegenen Weinbaugebiete, Ahr und Mosel, haben mehr unter Frostschäden zu leiden als Nahe und Rheinhessen und diese wieder mehr als die Pfalz.

Gute Ausstrahlungsverhältnisse und fehlender Gradientwind sind weitere unerläßliche Vorbedingungen für den Eintritt von Frostschäden. Die durch Großadvektion herangetragene Kaltluft hat im Frühjahr, selbst im April, immer Temperaturen über Null Grad. Es muß zusätzliche Wärmeabgabe durch Ausstrahlung der Bodendecke dazukommen, um hinreichende Kaltluftmengen in Bodennähe entstehen zu lassen. Das Vorhandensein eines Gradientwindes hebt die starke Schichtung der an sich mäßig hohen Kaltlufthaut auf und mildert daher die Intensität des Frostes.

Die Darstellung der gesamten Energieumsätze ist im Rahmen einer Abhandlung über Frostschadenverhütung nicht in wünschenswertem Maße möglich. Die Probleme werden daher nur soweit behandelt, als sie zum Verständnis der verschiedenen Maßnahmen der Frostschadenverhütung notwendigerweise besprochen werden müssen.

### B. Der nächtliche Wärmehaushalt.

Die untere Begrenzungsfläche der Atmosphäre gibt durch Strahlung Energie an die höheren Schichten ab. Die Größe der Energieabgabe ist in erster Linie abhängig von der Temperatur der Oberfläche, und in sehr geringem Maße auch von ihrer Beschaffenheit, der Meereshöhe usw.

Die Energieausstrahlung erfolgt mit Wellenlängen zwischen rd. 3 und 50  $\mu$ , wobei das Maximum um 10  $\mu$  liegt. Der Schwerpunkt liegt noch weiter gegen das langwellige Ende des Spektrums, etwa um 12  $\mu$  herum. Ohne Rücksicht auf die Beschaffenheit der Oberflächen ist die Wärmeabgabe durch Strahlung einheitlich etwa gleich der eines schwarzen Körpers im physikalischen Sinn, wobei anzunehmen ist, daß im allgemeinen eine Strahlungsintensität von 95% des ideal schwarzen Körpers erreicht wird (Absorptionskonstante abhängig vom Material).

Die Ausstrahlung wird vermindert um die Gegenstrahlung der Atmosphäre. Diese Gegenstrahlung, die von der Luft mit ihren festen und flüssigen Lufttrübungen, wesentlich auch vom Wasserdampf der Atmosphäre stammt, wird von den ausstrahlenden Oberflächen absorbiert und vermindert deren Wärmeverlust. Die endgültige Energieabgabe der Oberflächen wird als effektive Ausstrahlung bezeichnet. Sie ist groß, wenn der Temperaturgegensatz zwischen Erdoberfläche und höheren atmosphärischen Schichten groß ist, wenn also Kaltluft in der Höhe vorhanden ist. Sie ist ferner groß, wenn die Gegenstrahlung der Atmosphäre gering ist, wenn die Luft also frei von Staub und Wassertröpfchen ist und wenn sie wenig Wasserdampf enthält. Sie ist umgekehrt klein, wenn keine Temperaturgegensätze bestehen oder wenn zwischen den beiden Körpern, zwischen denen der Energieausgleich durch Strahlung erfolgt, Faktoren vorhanden sind, die die Ausstrahlung vermindern.

Die Erscheinung der Ausstrahlung regelt sich für einen schwarzen Körper quantitativ nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz:

$$S = 8,26 \cdot 10^{11} \cdot T^4,$$

worin  $T$  die absolute Temperatur in Celsiusgraden ( $T = 273 + t^{\circ} \text{C}$ ) und  $S$  die in die Halbkugel entsandte Strahlung je  $\text{cm}^2$  Oberfläche und Minute bedeuten. Dabei ist vorausgesetzt, daß der schwarze Körper gegen einen Raum exponiert ist, der die Temperatur des absoluten Nullpunktes (genau  $-273,15^{\circ} \text{C}$ ) besitzt (siehe auch S. 65).

Auch die Erdoberfläche ist gegen den kalten Weltenraum exponiert. Jedoch liegen hier die Verhältnisse insofern komplizierter, als eine verschieden temperierte und selektiv absorbierende Zwischenschicht, die Atmosphäre, vorhanden ist. Beschränkt man sich auf die Betrachtung der Vorgänge während der Nacht, also ohne Sonneneinstrahlung, so läßt sich zunächst durch Messungen feststellen, daß die Ausstrahlung stets wesentlich kleiner ist als nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz zu erwarten wäre. Diese Abweichung ist dadurch zu erklären, daß die auf eine bestimmte mittlere Temperatur abgestimmte Zwischenschicht Wärmestrahlen aussendet, welche der Bodenstrahlung entgegen wirken.

Der Vorgang läßt sich mit Hilfe einer anderen Vorstellung noch anschaulicher zum Ausdruck bringen. Die Erdoberfläche strahlt nicht gegen den kalten Weltenraum, sondern gegen die äußerst verwickelt zusammengesetzte und dazu noch veränderliche Lufthülle. In der Gesamtwirkung kann man sich aber die Atmosphäre ersetzt denken durch eine Hohlkugel, also einen einheitlichen Körper von einer bestimmten absoluten Temperatur. Diesen gedachten Körper wollen wir kurz mit „Gegenstrahler“ bezeichnen, dem die Bodenoberfläche als „Strahler“ gegenübersteht. W. Schmidt<sup>342</sup>) bezeichnet den Wärmegrad eines solchen Gegenstrahlers mit „Virtueller Temperatur“. Diese Betrachtungsweise ist naturgemäß nur dann gerechtfertigt, wenn eine praktisch unendlich große Horizontalerstreckung von Boden und Atmosphäre angenommen werden kann.

Nennen wir die absolute Temperatur des Strahlers  $T_S$ , die absolute Temperatur des Gegenstrahlers  $T_G$  und die zugehörigen Strahlungen  $S_S$  und  $S_G$ , so ist die tatsächlich vom Erdboden in die Hemisphäre gesandte Strahlung

$$S_{\text{eff}} = S_S - S_G$$

$$\text{oder } S_{\text{eff}} = 8,26 \cdot 10^{-11} \cdot (T_S^4 - T_G^4).$$

Um eine Vorstellung von der Größenordnung dieser effektiven Strahlung zu vermitteln, können zwei Wege beschritten werden:

1. kann man, bei gegebener Temperatur  $T_S$  der Bodenoberfläche, die Temperatur  $T_G$  des Gegenstrahlers berechnen, wenn verschiedene Meßwerte der effektiven Ausstrahlung  $S_{\text{eff}}$  vorliegen;
2. kann man eine bestimmte Temperatur  $T_G$  des theoretischen Gegenstrahlers annehmen und die Frage beantworten, welche Energiemengen  $S_{\text{eff}}$  von verschiedenen temperierten ( $T_S$ ) Bodenoberflächen gegen diesen Gegenstrahler ausgesandt werden.

Abbildung 1 gibt die Abhängigkeit der Temperatur des Gegenstrahlers von der effektiven Ausstrahlung für vier verschiedene Bodenoberflächentemperaturen ( $-10, \pm 0, +10, +20^{\circ} \text{C}$ ) wieder. Das Ergebnis der Berechnung für die Bodenoberflächentemperatur  $0^{\circ} \text{C}$  ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Ist beispielsweise bei einer Bodentemperatur von  $0^{\circ} \text{C}$  mit Hilfe des Ångström'schen Pyrgeometers eine effektive Ausstrahlung in Höhe von  $0,10 \text{ gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$  gemessen worden, so würde die Temperatur des theoretischen Gegenstrahlers  $-16,3^{\circ} \text{C}$  betragen.

Tabelle 1. Gegenstrahlertemperatur  $t_G$  bei Strahlertemperatur  $t_S = 0^{\circ} \text{C}$  für verschiedene effektive Ausstrahlungen  $S_{\text{eff}}$  (in  $\text{gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$ )

$S_{\text{eff}}$	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35 cal.
$t_G$	0,0	-7,8	-16,3	-25,7	-36,4	-48,7	-63,5	-82,4 $^{\circ} \text{C}$

Tabelle 2. Effektive Ausstrahlung  $S_{\text{eff}}$  in  $\text{gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .

$t_S$ \ $t_G$	0	-10	-20	-30 $^{\circ} \text{C}$
-10 $^{\circ} \text{C}$	-0,063	0,000	0,057	0,107
0	0,000	0,064	0,120	0,171
+10	0,071	0,135	0,191	0,242
+20	0,150	0,214	0,270	0,321

Abbildung 2 stellt den Verlauf der Strahlung in Abhängigkeit von der Temperatur der Bodenoberfläche innerhalb des Bereichs  $-15$  bis  $+25^{\circ} \text{C}$  für verschieden angenommene Temperaturen  $0, -10, -20$  und  $-30^{\circ} \text{C}$  des Gegenstrahlers dar. Den Kurven liegen die Werte der Tabelle 2 zugrunde. Hat der Gegenstrahler beispiels-

weise die Temperatur  $-10^{\circ}\text{C}$ , so tritt bei  $-10^{\circ}$  Bodentemperatur naturgemäß keine wirksame Strahlung in Erscheinung. Bei Null Grad Bodentemperatur beträgt die effektive Ausstrahlung  $0,064$ , bei  $+10^{\circ}$  Bodentemperatur bereits  $0,135 \text{ gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$  in die Halbkugel.

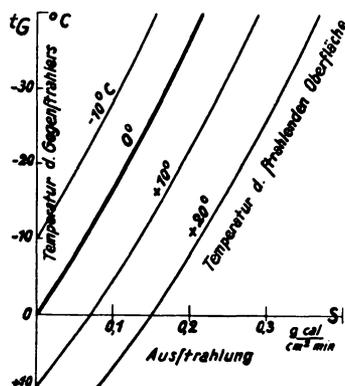


Abb. 1.

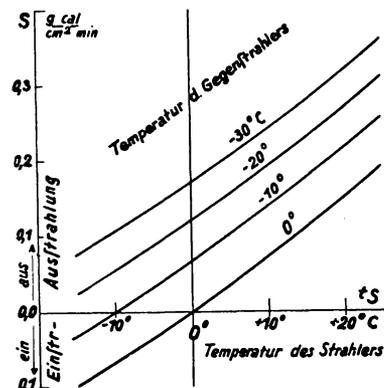


Abb. 2.

Bei unseren zahlreichen nächtlichen Feldversuchen hat sich als häufiger Höchstwert die effektive Ausstrahlung von  $0,15 \text{ gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$  ergeben. Nimmt man hierzu an, daß die Bodenoberfläche eine Temperatur um  $0^{\circ}\text{C}$  besitzt, so müßte man dem Gegenstrahler die Temperatur  $-25,7^{\circ}$  zuordnen. Diese Temperatur würde also ein Körper am Erdboden, der nur am Strahlungsaustausch teilnähme, von anderen Faktoren des Wärmeumsatzes aber ausgeschlossen wäre, bei Annäherung an den Gleichgewichtszustand allmählich erreichen.

Über die Verteilung der Gesamtausstrahlung auf die verschiedenen Himmelszonen zwischen Zenit und Horizont finden sich im Abschnitt über Bedeckungsmaßnahmen eingehende Untersuchungen und Berechnungen, während die spektralen, insbesondere die durch selektive Absorption des Wasserdampfes hervorgerufenen Modifikationen im Abschnitt über Lufttrübungen behandelt werden.

Nun ist aber die Erdoberfläche oder ein auf ihr befindlicher Körper nicht nur dem Wärmeaustausch durch Strahlung ausgesetzt, sondern unterliegt auch einer Reihe anderer Faktoren, die den Gesamtwärmeumsatz wesentlich beeinflussen. Diese sind — mit den Bezeichnungen von F. Krügler<sup>210b)</sup> —

- L die Wärmeleitung aus dem Bodeninnern,
- C die Kondensations- und Gefrierwärme bei Tau- und Reifbildung,
- M die vertikale Wärmezufuhr durch Massenaustausch (Wärmescheinleitung),
- Q die horizontale Wärmezufuhr (bezw. Wärmeabgabe) durch Luftströmung (Advektion).

Der Wärmezustand  $W$  der Bodenoberfläche, der für sie temperaturbestimmend ist, kann also dargestellt werden durch die Gleichung:

$$W = L + C + M + Q + S_G - S_S$$

$$\text{oder } W = L + C + M + Q - (S_S - S_G)$$

$$W = L + C + M + Q - S_{\text{eff.}}$$

Im Falle des Gleichgewichts wird  $W = 0$ , so daß wir schreiben können:

$$0 = L + C + M + Q - S_{\text{eff}}$$

$$\text{oder } S_{\text{eff}} = L + C + (M + Q).$$

Ist also der Gleichgewichtszustand erreicht, so wird der Verlust infolge der effektiven Ausstrahlung  $S_{\text{eff}}$  durch den Gewinn vermöge der Wärmeleitung  $L$ , der Kondensationswärme  $C$  und des gesamten Massenaustausches  $(M + Q)$  wettgemacht.

Bei Auswahl einer geeigneten Methode zur meteorologisch gerechtfertigten Frostschadenverhütung, das heißt Einflußnahme auf Boden- oder Pflanzentemperatur, wird es demnach darauf ankommen, daß die auf der rechten Seite der Gleichung stehenden Größen möglichst hohe Werte annehmen, damit in der Gesamtsumme der Wert der effektiven Ausstrahlung mindestens erreicht wird. Bei den Bedeckungsmaßnahmen ist vor allem auf die Größe  $L$  zu achten, die von der Bodenzusammensetzung und Behandlungsart der Oberfläche abhängig ist; dabei ist vorausgesetzt, daß der bedeckende Stoff eine kleinere Wärmeübergangszahl besitzt. Für unsere Zwecke ist es wichtig zu wissen, daß dicht gelagerte und feuchte Böden über gute Wärmeleitfähigkeit verfügen. Bei diesen kann die von der Oberfläche abgestrahlte Wärme in höherem Maße durch Leitung ersetzt werden als bei Böden mit geringem Leitvermögen. Zu diesen wäre zu rechnen Moorboden, Sandboden und künstlich gelockerter, zum

Beispiel frisch gepflügter oder gehackter Boden. Die ersten mengenmäßigen Untersuchungen dieser Art hat bereits Homèn<sup>159)</sup> gebracht, der auch heute noch gültige Hinweise gab, wie man zwecks Frostmilderung den Boden bearbeiten soll.

Bei feuchten Böden ist noch zu berücksichtigen, daß sie tagsüber keinen nennenswerten Wärmegewinn durch Einstrahlung erzielen können, da der größte Teil der Sonnenenergie in Verdunstungswärme verwandelt und mit dem aufsteigenden Wasserdampf fortgeführt wird.

Von den beiden Größen  $M$  und  $Q$ , mit welchen die Luftmassenverschiebungen bezeichnet werden, kommt in normalen Frostnächten im wesentlichen nur der horizontale Massentransport  $Q$  in Frage, besonders wenn es sich um hängiges Gelände handelt. Hierbei ist der Regelfall der, daß die tiefer gelegene Geländestelle Zufluß von Kaltluft, also eine negative Größe  $Q$  hat. Im Gegensatz hierzu haben dann die mittleren Hänge und relativ höheren Geländestellen eine positive Größe  $Q$ , und zwar dadurch, daß die durch das Einströmen der kalten Luft auf der Talsohle abgehobene warme Luft dorthin fließt.

Für die Methoden des Räucherns und Nebelns ist ebenfalls die Größe  $L$  von maßgebender Bedeutung. Hier wird es sich jedoch in erster Linie darum handeln, die auf der linken Seite der Gleichung stehende effektive Ausstrahlung  $S_{\text{eff}}$  möglichst klein zu halten. Die Verfahren der Bedeckung und Luftrübung kommen insofern einander nahe, als beide auf der Nutzung der Wärmeleitung aus dem Bodeninnern und der Abschirmung der Ausstrahlung beruhen.

Im Falle der Berechnung zur Frostschadenverhütung erhält die Größe  $C$  ausschlaggebende Bedeutung. Die Berechnung muß zur Vermeidung einer stärkeren Unterschreitung des Gefrierpunktes so dosiert werden, daß die freiwerdende Gefrierwärme  $C$  zusammen mit den anderen Größen der rechten Seite der Gleichung der effektiven Ausstrahlung  $S_{\text{eff}}$  mindestens das Gleichgewicht hält.

Durch die Geländeheizung wird noch eine weitere Größe in die zunächst nur auf natürliche Vorgänge aufgebaute Gleichung künstlich hineingetragen. Die theoretische Betrachtung der Heizwirkung läßt sich aber auch auf dem Umweg über den Massenaustausch insofern durchführen, als es sich dabei ja um die Mischung kalter und warmer Luftmassen handelt. Wir werden auch bei Besprechung der Heizmethoden sehen, daß die Geländeheizung stärker wirkt durch den von ihr hervorgerufenen Austausch, welcher eine Durchwirbelung der stark geschichteten stabilen bodennahen Kaltluft hervorruft. Demgegenüber tritt die Erwärmung der Pflanze durch Absorption der von den Heizkörpern ausgehenden Strahlung zurück, sofern die Pflanzen nicht in unmittelbarer Nähe der Heizkörper stehen.

Wie stark der vertikale Austausch von der Windstärke abhängig ist, hat unter anderem W. Haude<sup>149)</sup> in der Wüste Gobi festgestellt. Er bestimmte ihn mit Hilfe des Temperaturgradienten und fand ihn etwa viermal so stark in 50 als in 10 cm Höhe. In unmittelbarer Nähe des Bodens sinkt der Austausch noch mehr ab, um am Boden selbst völlig aufzuhören.

Nur in den seltensten Fällen ist die Erdoberfläche selbst die Stelle des durch Ein- und Ausstrahlung hervorgerufenen Energieumsatzes. Das tritt nur dann ein, wenn es sich um nackte oder vegetationsfreie Flächen handelt (Felsen, Sanddünen, Sturzacker). Ist der Boden mit Vegetation bedeckt, so ist zwar auch hier die Ausstrahlung die gleiche wie über nacktem Boden, nicht jedoch die Wärmezufuhr aus dem Boden und aus der Luft. Es treten bei Betrachtung des Wärmehaushalts sehr große Unterschiede je nach der Vegetation ein. Die Blätter stehen nicht mehr in unmittelbarer Verbindung mit dem Wärmeverrat des Bodens. Sie sind gewissermaßen temperaturisoliert aufgestellte Körper, da die Wärmeleitung durch das Holz und durch die Luft so gering ist, daß sie hier vernachlässigt werden kann. Die Folge davon ist, daß Blattoberflächen bei Nacht infolge der Ausstrahlung erheblich tiefere Temperaturen als die Oberfläche des nackten Bodens erreichen, besonders dann, wenn es sich um Boden mit gutem Wärmeleitvermögen handelt. Zwischen der Oberfläche der Vegetation, die man in Bezug auf die Strahlung als effektiv wirksame Oberfläche bezeichnen kann, und der Erdoberfläche selbst liegt ein mehr oder weniger mächtiges Luftpolster, das ausschlaggebend für den Zustrom von Wärme an die Vegetationsoberfläche ist.

Die ausstrahlende Oberfläche nimmt allmählich eine bestimmte Temperatur an, die gegeben ist durch die effektive Ausstrahlung und die Wärmezufuhr vom Boden und der Luft her. Man sagt dann, daß sich die strahlende Oberfläche im Gleichgewicht befindet.

Ein offensichtlicher Literaturirrtum, der immer wieder auftritt, ist die Behauptung, daß durch die Vegetation eine „Vermehrung der strahlenden Oberfläche“ bedingt sei, die ihrerseits die Veranlassung zur stärkeren Abkühlung der Luft, z. B. über Wiese gegenüber nacktem Boden sein soll. Die Oberflächen sind zwar vermehrt, aber nicht in ihrer Summenwirkung in Bezug auf die Energieabgabe durch Strahlung. Es wird hier Statik und Dynamik, Zustand und Vorgang, verwechselt. Der Zustand ist die tatsächlich festgestellte niedrigere Temperatur über der Wiese, daher die Schlußfolgerung, daß hier vermehrte Energieabgabe durch Ausstrahlung vorgelegen habe. Bekanntlich gilt das Stefan-Boltzmann'sche Gesetz der Strahlung für einen Körper, der gegen

die Halbkugel strahlt. Es treten sehr große Unterschiede auf, ob der Körper gegen den Zenit oder gegen den Horizont strahlt. Dies ist selbstverständlich bedingt durch die verschiedene Temperatur des Gegenstrahlers. Die Temperatur der Gegenstrahler am Horizont, nämlich der Berge und der unteren Luftschichten, weicht von der Temperatur des ausstrahlenden Körpers im Betrachtungsfall nicht erheblich ab, anders jedoch bei der Strahlung gegen den Zenit, gegenüber dem die größten Temperaturunterschiede bestehen. Eine Vermehrung der Oberflächen durch die Blätter bedingt, daß ein großer Teil der Blätter nicht maximal ausstrahlt, da er entweder im Strahlungsschutz darüberliegender Blätter steht oder nicht gegen den Zenit strahlt. Dazu kommt noch, daß auch vom Boden Strahlung gegen die Unterseite der Blätter ausgeht und von diesen absorbiert wird. So verwickelt die Verhältnisse liegen, so steht doch als sicher fest, daß nicht eine verstärkte Energieabgabe durch Ausstrahlung, sondern die verminderte Wärmezufuhr aus dem Boden die beobachtete stärkere Abkühlung der Oberfläche der Wiese und die daraus resultierende stärkere Belieferung der Umgebung mit Kaltluft zur Folge hat.

Die Temperatur sinkt über Grasflächen ganz erheblich unter die Temperatur, die Sandflächen unter sonst gleichen atmosphärischen Bedingungen erreichen. Die Folge davon ist, daß bereits in einer Höhe von wenigen Zentimetern die Temperatur über einem kleinen Sandfeld von der über der benachbarten Wiese bestimmt wird. Die Abbildung 3 (nach Haude) zeigt die Temperaturzustände über einer 2 ha großen Wiese und einem darin eingebetteten Sandfeld von 6 m Länge und 3 m Breite. Es ergibt sich eine Verschlechterung des Mikroklimas über dem Sandfeld insofern, als die Luft infolge der Umgebung durch Wiesen etwa 5° kälter ist als sie sonst wäre. Bei den herrschenden gleichen Austausch- und Gegenstrahlungsverhältnissen wäre die Temperaturkurve der Luft über einem nicht durch benachbarte Wiesen beeinflussten Sandfeld der punktierten Kurve gefolgt. Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine sehr trockene Wiese mit verdorrtem Graswuchs. Diese Abkühlung war also nicht an die Nässe der Wiese gebunden, sie bildete vielmehr ein weiteres Beispiel der oben erwähnten Kleinstadvektion.

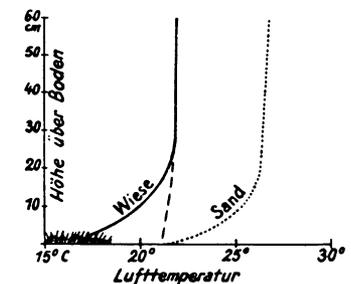


Abb. 3.

Daß feuchte Wiesen sich stärker abkühlen als trockene, ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß sie tagsüber weniger Wärme gespeichert haben, weil die eingestrahlte Sonnenenergie zur Verdunstung von Wasser verwendet wurde, und daß, solange sich der Feuchtigkeitsgehalt der Luft nicht dem Sättigungspunkt nähert, stets jede Luftzufuhr eine Abkühlung durch Verdunstungskälte bedeutet.

Wenn wir verschiedene Vegetationen betrachten in Bezug auf ihre abkühlende Wirkung auf die Umgebung, so sind unter den landwirtschaftlichen Kulturen die Flächen mit viel nacktem Boden geringere Kaltluftlieferanten für die Umgebung als diejenigen, bei denen große Blattmassen den Boden gänzlich verdecken. Brachfelder sind, wenn sie nicht von einem Pflanzenpolster überzogen sind, günstiger zu beurteilen als Kartoffelfelder, bei denen wieder der Stand der Vegetationsentwicklung eine Rolle spielt. Nach den Hackfrüchten kommen Getreide und schließlich Wiesen. Bei Obst- und Weingärten liegt der Fall so, daß, je mehr nackter Boden vorhanden ist, umso geringere Kaltluftmengen entstehen. Obstgärten, die mit Gras bedeckt sind, sind stärkere Kaltluftlieferanten als solche mit nacktem Boden. Böden mit frischem Umbruch, deren Wärmeleitvermögen zur Bodenoberfläche verringert ist, liefern mehr Kaltluft als Böden mit festem Bodenschluß.

Schonungen und Niederwald sind stärkste Kaltluftlieferanten und übertreffen hierin sogar Wiesen. Bei Jungwald liegt zwischen der effektiv strahlenden Oberfläche der Halme und dem Boden ein mächtiges Isolierpolster, gebildet aus abgestorbenen Halmen und Blättern. Die Energieverluste der strahlenden Oberfläche werden weit weniger durch Wärmezufuhr infolge von Leitung aus dem wärmeren Boden gemildert. Es treten daher an diesen Oberflächen ungewöhnlich niedrige Temperaturen auf.

Noch krasser ist dies der Fall bei Mooren. Solange der Grundwasserstand sehr hoch ist, ist die Kaltluftbildung infolge der guten Wärmeleitung zwischen strahlender Oberfläche und Bodeninnerem verhältnismäßig gering. Wird das Moor aber durch Entwässerung trocken gelegt, so nimmt in dem Maße des Wasserverlustes des Bodens dessen Wärmeleitfähigkeit ab, da nun die vordem mit Wasser gefüllten Hohlräume mit Luft gefüllt sind, deren Wärmeleitfähigkeit ganz erheblich kleiner ist. Trockener Torf, der in der Technik als Wärmeisolator verwendet wird, hat bekanntlich eine ungewöhnlich niedrige Wärmeleitfähigkeit. Gestein leitet die Wärme etwa fünf- bis neunmal so gut wie trockenes Moor! Die Folge ist im Falle des nächtlichen Wärmehaushaltes, daß trockenes Moor der an Intensität nicht zu übertreffende Kaltluftlieferant seiner Umgebung ist.

Anders als Niederwald ist Hochwald zu bewerten. Hochwald ist kein Kaltluftentstehungsherd für die Umgebung. Zwar ist auch die mehr oder weniger geschlossene Baumkrone des Hochwaldes in ihrer Eigenschaft als strahlende Oberfläche gleichzusetzen mit der strahlenden Oberfläche des Niederwaldes und der Wiesen, jedoch ist der zwischen der ausstrahlenden Oberfläche und dem Erdboden befindliche Raum, aber auch die Holzmasse so groß, daß das dazwischenliegende Warmluftpolster nicht so schnell durch die absinkende Kaltluft durchkühlt

werden kann. Dieser Warmluftvorrat veranlaßt eine Verschiebung der Minimumspitze zu einem Zeitpunkt hin, bei welchem in der Umgebung die Kurve des Temperaturverlaufs schon längst den niedrigsten Wert überschritten hat. Bis zum Eintritt des Minimums auf den waldfreien Flächen ist also der Wald stets wärmer als die umliegenden Freiflächen, und so erfolgt kein Kaltluftabfluß vom Walde aus.

Die günstigste Oberfläche ist Wasser, das heißt, die über ihm lagernde Luft wird fast gar nicht abgekühlt. Der Massenaustausch im Wasser ermöglicht stets wärmere Wassermassen von unten heranzuschaffen, wenn die obersten Wasserschichten abgekühlt sind.

Ausschlaggebend für das Entstehen von Frostgebieten sind im besonderen oft die orographischen Verhältnisse. Da hieraus auch für die Praxis wichtige, ja entscheidende Schlüsse gezogen werden können, seien diese ausführlich besprochen.

### C. Das Entstehen der bodennahen Kaltluft.

Bei der Besprechung des Wärmeumsatzes wurde gezeigt, daß die Stelle, an der der Energieumsatz stattfindet, die untere Begrenzung des Luftmeeres ist. Die Luft ist einschließlich ihres Anteils an festen Suspensionen am Umsatz nur indirekt beteiligt. Ihre Eigenstrahlung ist minimal. Es zeigt sich, daß gerade in den Frosträchten klare, nicht staubgetrübe Luftmassen vorhanden sind, worauf der hohe Betrag der effektiven Ausstrahlung zurückzuführen ist. Offenbar sind die Luftmassen auch arm an Kondensationskernen, denn es tritt, selbst nachdem längere Zeit der Kondensationspunkt unterschritten ist, noch keine Nebelbildung ein. Staub- und Kernzählungen liegen leider zu spärlich vor, dafür aber die gelegentlich von uns gemachte Beobachtung, daß das Hineintreiben von festen oder flüssigen Teilchen anlässlich von Verneblungs- und Lufttrübungsversuchen in die bodennahe Kaltluft-haut eine schlagartig eintretende Bildung natürlichen Nebels zur Folge hatte.

Veranlassung der Ausbildung einer zum Nachtfrost führenden bodennahen Inversion sind also günstige Ausstrahlungsverhältnisse nach erfolgtem Kaltlufteinbruch, was die Abkühlung der Oberflächen zur Folge hat; ebenso wichtig für die Ausbildung einer stabilen Schichtung ist das Abflauen des Windes und die Minderung des Luftaustausches. Die verschiedenen Bodenbedeckungen sind in ganz verschiedenem Maße an der Kaltluftbildung beteiligt. Denn je mehr die effektiv strahlenden Oberflächen durch Isolierung vom warmen Erdboden getrennt sind, um so mehr werden sie schließlich abgekühlt. Aus den Trierer Versuchen sei nur ein Beispiel erwähnt. Ein ziemlich trockener Schieferboden eines Weinbergs hatte in einer Maifrostnacht bei einer Oberflächentemperatur von  $-5^{\circ}$  eine Temperatur in 5 cm Tiefe von  $+10^{\circ}$ !

Die freiaufgestellten Thermometer zeigen in windstillen Ausstrahlungsnächten, einerlei ob es sich um Glaskthermometer von verhältnismäßig großer Wärmekapazität handelt oder um elektrische Thermometer, die in Gestalt, Wärmekapazität und spezifischer Wärme Blättern ähneln, Untertemperaturen gegen Luft von  $1-2^{\circ}$ . Infolge des Luftaustausches geringer Größenordnung tritt nun eine Abkühlung der mit dem Thermometer (bezw. Blatt) in Berührung kommenden Luft ein. Die Folge ist eine Abkühlung der Luft bzw. eine mengenmäßig gleiche Wärmezufuhr zum Blatt. Dieses strahlt die zugeführte Energie wieder aus. Neue Luftteilchen werden abgekühlt und dieses Spiel hält infolge des auch noch in stabilster Lagerung herrschenden Massenaustausches stundenlang an, um schließlich zu einer immer weitergehenden Abkühlung der bodennahen Luftschicht zu führen. Da die Menge der abgekühlten Luft nicht allein von dem Grad der Temperaturdifferenz: Pflanzenoberfläche gegen Luft, sondern auch von der Kontaktmöglichkeit abhängt, ist die Größe der Oberfläche des erkaltenden Körpers sehr wesentlich. Eine völlig glatte Oberfläche wird nicht im gleichen Maße Kaltluftlieferant sein wie eine rauhe oder gar eine mit vielfach vergrößerter Oberfläche (Wiese!) — gleiche meteorologische Bedingungen vorausgesetzt.

Daher kommt zu der größeren Abkühlungsmöglichkeit der temperaturisoliert aufgestellten Halme und Blätter einer Wiese eine gesteigerte Kontaktmöglichkeit mit der vorbeistreichenden Luft, was wiederum die starke Beteiligung einer wiesenartigen Bodendecke an der Kaltluftentstehung größenmäßig erklärt.

Schließlich sei noch vollständigkeithalber erwähnt, daß Böden, je dichter sie bewachsen sind, um so weniger durch Einstrahlung bei Tag erwärmt werden, so daß sie schon deshalb für den Wärmenachschub bei der Ausstrahlung weniger leisten als unbewachsene.

Bei mangelndem Austausch der Luftmassen stellt sich in einer Nacht mit guten Ausstrahlungsverhältnissen sehr schnell eine Temperaturumkehr, eine „Inversion“ ein. Die Luft liegt stabil, das heißt ihrer Schwere entsprechend geschichtet. Die kältesten und damit schwersten Luftschichten liegen als „Kaltluft-haut“ unmittelbar dem Boden auf. Auf dem Boden des Luftmeeres ist die Temperaturdifferenz zwischen der alleruntersten und der wenige Dezimeter höher liegenden Schicht besonders groß. Die Differenzen können in den untersten 5 m bis zu  $5^{\circ}$  und mehr betragen, wobei oft die untersten Zentimeter die größten Temperaturunterschiede haben. Bei langer Andauer der Vorbedingungen zur Inversionsbildung, nämlich ruhender Luft und starker Ausstrahlung, wächst die Inversionsschicht zu beachtlicher Höhe und kann die Größenordnung 100 m überschreiten. In ihr

wiederum ist aber nur entscheidend die besonders kalte, dem Boden an­klebende Kaltluft­haut, die von einer, an der Gesamtinversion gemessen, recht geringen Mächtigkeit ist.

Die Abbildung 4 a läßt eine solche Kaltluft­haut in der Ebene erkennen. Häufig ragen hochstämmige Bäume, deren Blüten frostgefährdet sind, mit ihrem oberen Teil aus der Frostscha­denzone, die im vorliegenden Fall bei  $-2^{\circ}$  an­genommen ist, heraus. Solche Beispiele sind uns mehrfach in der oberrheinischen Tiefebene bekannt ge­worden, z. B. im Aprikosenanbaugesbiet von Mainz.

Völlig ebenes Gelände gibt es nun in der Praxis kaum. Fast immer ist auch in weiten Ebenen eine schwache Geländeneigung vor­handen. Die Kaltluft beginnt dann nach den tieferen Geländestellen abzufließen (Abb. 4 b). Wir erkennen die Kaltluft­haut eines Plateaus (Abb. 4 c links), dann die absinkende Luft am Hang, als „Fallwind“ bezeichnet (rechts), und die Ansammlung von Kaltluft auf der tiefsten Geländestelle, den „Kaltluftsee“ (Mitte). Auch im gegliederten Gelände verteilt sich die Temperatur nach der Schwere­schichtung der Luft (Abb. 4 d).

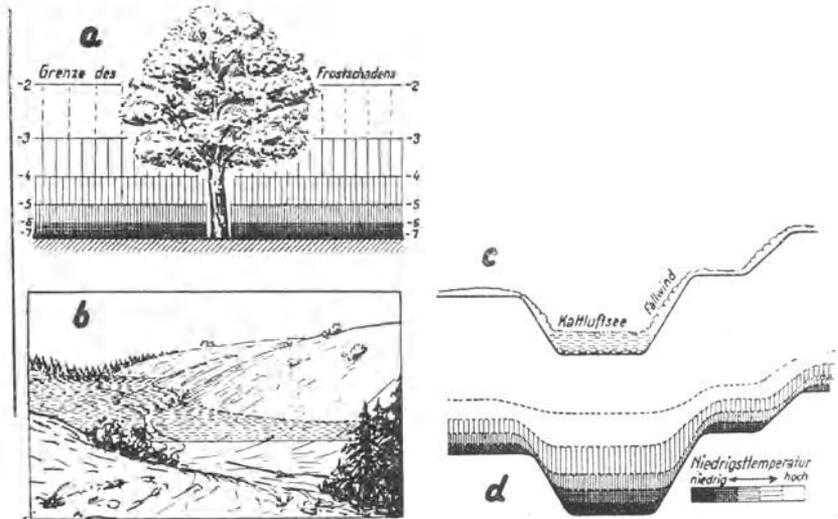


Abb. 4. a Kaltluft­haut in der Ebene. b Kaltluft­see in Mulde oder Tal. c Bildung eines Kaltluft­sees und Fallwind. d Temperaturverteilung in gegliedertem Gelände.

Die Temperaturverteilung läßt nach Geiger eine besondere Kaltluft­ansammlung im Kaltluft­see erkennen, deren Niedrigstwerte unter denen der Kaltluft­haut der Ebene liegen. Immer wieder sickern von den Hängen die abgekühlten Luftmassen in das Tal und verdrängen dort die wärmere Luft. Damit wächst einerseits der Kaltluft­see an den Hängen, andererseits nimmt die Intensität der Kaltluft ständig zu, da die aller­kältesten Luftteilchen auf dem Boden des Kaltluft­sees liegen bleiben.

Liegt die Kaltluft­ansammlung in einer ab­flußlosen Mulde, dann kommen hier unerhört niedrige Werte bei stärkster Schichtung zu­stande, wie es W. Schmidt<sup>343a)</sup> in einem Beispiel einer Gebirgsdoline bei Lunz zeigte. Er maß auf der Sohle  $-28,8^{\circ}$  gegenüber  $-1,1^{\circ}$  und  $+2,3^{\circ}$  zur gleichen Zeit an einer etwa 50 bzw. 90 m höher gelegenen Hang­stelle! Die ab­flußlosen Moorgebiete der Norddeutschen Tiefebene haben zwar nicht derartig tempe­rierte Kaltluft­ansammlungen aufzuweisen, sie sind aber so häufig von Frösten heim­gesucht, daß selbst in den Monaten Juli und August Schadenfröste vorkommen. Wenn hierher Sied­lungen gelegt werden, dazu noch gärtnerische, so sind diese falsch geplant. In solchen Fällen kann nie mit einer gesunden Wirtschaft ge­rechnet werden (z. B. Siedlung Damsdorf bei Brandenburg).

Ist die Kaltluft­sam­mel­stelle nicht ab­fluß­los, sondern ein Bach- oder Fluß­tal, so sieht man zwar noch immer eine deutlich ausge­prägte Schichtung Tal­sohle gegen Hang und meist eine von Fall zu Fall in ihrer Höhe schwankende obere Grenze des Frostscha­dens,

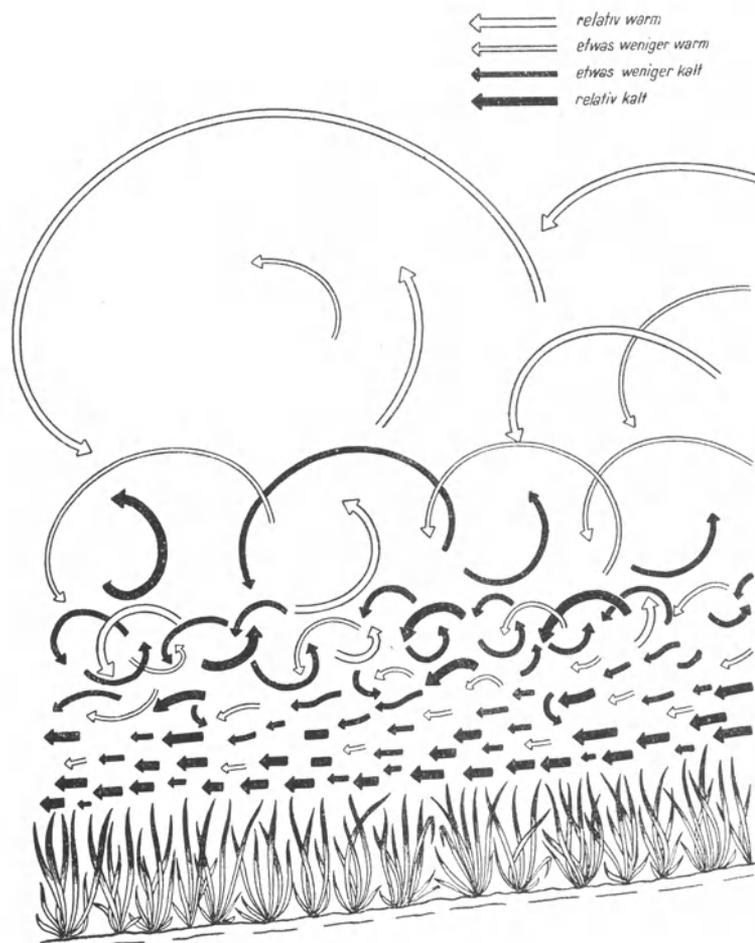


Abb. 5. Fließende Kaltluft. Größere Geschwindigkeit mit zunehmender Höhe, gleichzeitig auch größere Wirbelhaftigkeit (Turbulenz). Am Boden wird die Bewegung durch Reibung gebremst.

doch treten nunmehr andere Erscheinungen auf, die durch das Fließen der Kaltluft auf der Talsohle, den „Bergwind“ bedingt sind.

Abbildung 5 zeigt das Abrutschen eines schwachen Fallwindes über eine Wiese. Die Bewegung ist wirbelartig, obwohl deutliche Temperaturschichtung vorhanden ist. Die Strömung nimmt in der Nähe der Oberfläche der Wiese ab, da die Wirbel erst durch die Rau­higkeit der Oberfläche entstehen. Die kältesten Teile sind die 1—2° unter Lufttemperatur durch Strahlung abgekühlten Blattspitzen. Die nächsten Luftschichten kommen häufiger mit diesen Blattspitzen in Berührung und sind daher auch stärker abgekühlt als die höher fließenden.

Abbildung 6 a: Nicht jeder Fallwind ist kalt! Wenn Luft über das Gebirge hinweggedrückt wird und auf der anderen Seite föhnig erwärmt hinabsteigt, dann ist keine Kaltluft- sondern im Gegenteil Warmluftzufuhr vorhanden. Bei steilen Gebirgstälern (z. B. westlicher Schwarzwaldrand) hebt der Effekt der Kompressionserwärmung

absinkender Luft die Abkühlung, die durch das Überstreichen abgekühlter Oberflächen hervorgerufen wird, teilweise auf (Abb. 6 b).

Bei schwächerer Hangneigung überwiegt aber der letzte Effekt, so daß gerade in schwach geneigten Tälern mit langsamen Fallwinden die größten Schäden auftreten (Abb. 6 c).

In Frostnächten zeigt sich also stets infolge des Abfließens der Kaltluft zu den tiefsten Geländestellen eine Schichtung in der Form, wie sie am besten auf der Abbildung 7 a zu sehen ist. Auf dem Versuchsfeld Avelsbach bei Trier befindet sich ein Holzturm (Abb. 157, Taf. 1), bei welchem Temperaturregistrierungen mit Thermohygrographen (R. F u e ß) in normalen Wetterhütten vorgenommen werden. Der Temperaturverlauf vom 11.—12. Oktober 1936 zeigt die Vergrößerung der Extreme in der Form, daß die Lufttemperatur in 0,5 m Höhe über dem Boden das höchste Maximum, aber auch das niedrigste Minimum aufweist. Wenn wir den Temperaturverlauf der obersten Hütte in 13,5 m Höhe mit derjenigen in 0,5 m Höhe vergleichen, dann sehen wir, daß die Differenz der Maxima  $2\frac{1}{2}^{\circ}$ , die der Minima  $2^{\circ}$  beträgt. Die Differenz wäre noch größer, wenn auf der Talsohle nicht ein ziemlich lebhafter Fallwind vorhanden wäre, der die Schichtung der Luft etwas mildert und infolgedessen die Ausbildung extrem niedriger Temperaturen auf der Talsohle nicht zuläßt. Zum Vergleich dient der sehr ausgeglichene Temperaturgang, der in der Wetterhütte auf einem anderen Turm gemessen wurde. Der Turm erhebt sich 12 m über dem Plateau, das etwa 100 m über der Talsohle liegt. Es fällt hierbei nicht nur der besonders ausgeglichene Temperaturverlauf an einer Geländestelle auf, welche verhältnismäßig sehr wenig „lokalklimatisch“ beeinflußt ist, also nach Geiger über ein selbständiges Klima verfügt, sondern auch, daß der Termin des Minimeintritts gegenüber der Talsohle um etwa eine Stunde verschoben ist.

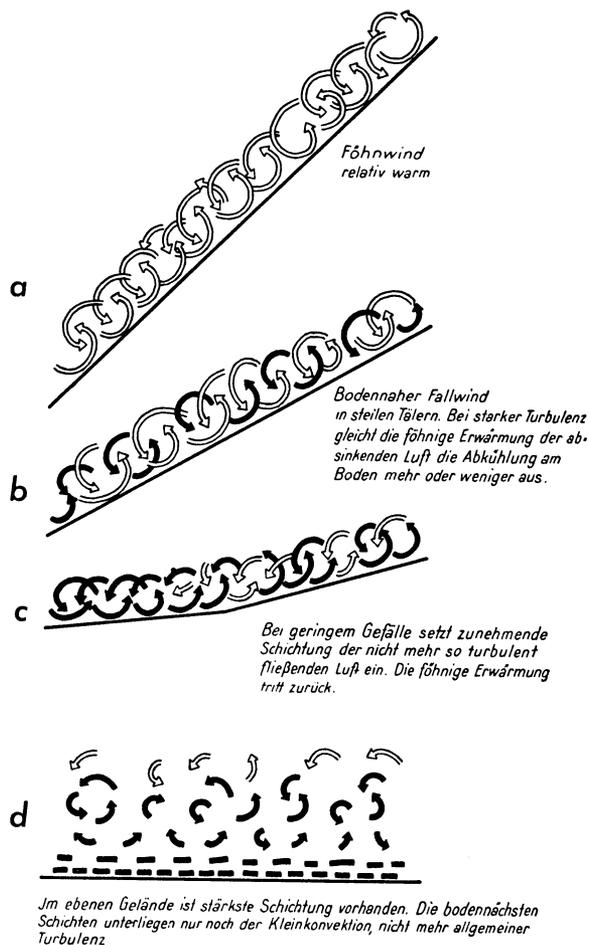


Abb. 6. Die verschiedenen Arten des Bergwindes und ihre Temperierung.

Die Abbildung 7 b setzt den Temperaturverlauf auf demselben Turm in Vergleich mit dem Temperaturverlauf oberhalb und unterhalb eines Windschutzstreifens, der aus Fichten von 8 m Höhe besteht und etwa 10 m breit ist. Infolge der rückstauenden Wirkung des Schutzstreifens betrug die Lufttemperatur oberhalb des Streifens im Minimum  $-6,5^{\circ}$ , unterhalb dagegen nur  $-4,4^{\circ}$ . Was die absoluten Extreme anbetrifft, so kann gesagt werden, daß in anderen Fällen, z. B. gerade in Maifrostnächten, erheblich größere Temperaturdifferenzen auftreten als das vorliegende Beispiel anführt.

Die Wirkung einer Windschutzhecke veranschaulicht die Abbildung 158, Tafel 1. Jedes Hindernis, das sich dem Fallwind entgegenstellt, veranlaßt eine Stauung des Kaltluftflusses. In den Wirbeln des Fallwindes sind warme und kalte Luftteilchen mitgerissen. An der Stelle, wo der Fallwind durch das Hindernis zur Ruhe kommt, setzen sich aus dem Gemisch kalter und warmer Luftteilchen die kältesten ab, während die wärmeren überfließen. Die Wirkung der von der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle Trier in vielen Fällen eingeführten Windschutzsperrern, die sich quer über die Täler von Frosteinzugsgebieten hinwegziehen, besteht in erster Linie in diesem Herausfiltern der kältesten Teile des Fallwindes.

In Nächten ohne Gradientwind, in denen sich infolge von Ausstrahlung Kaltluft in Bodennähe bilden

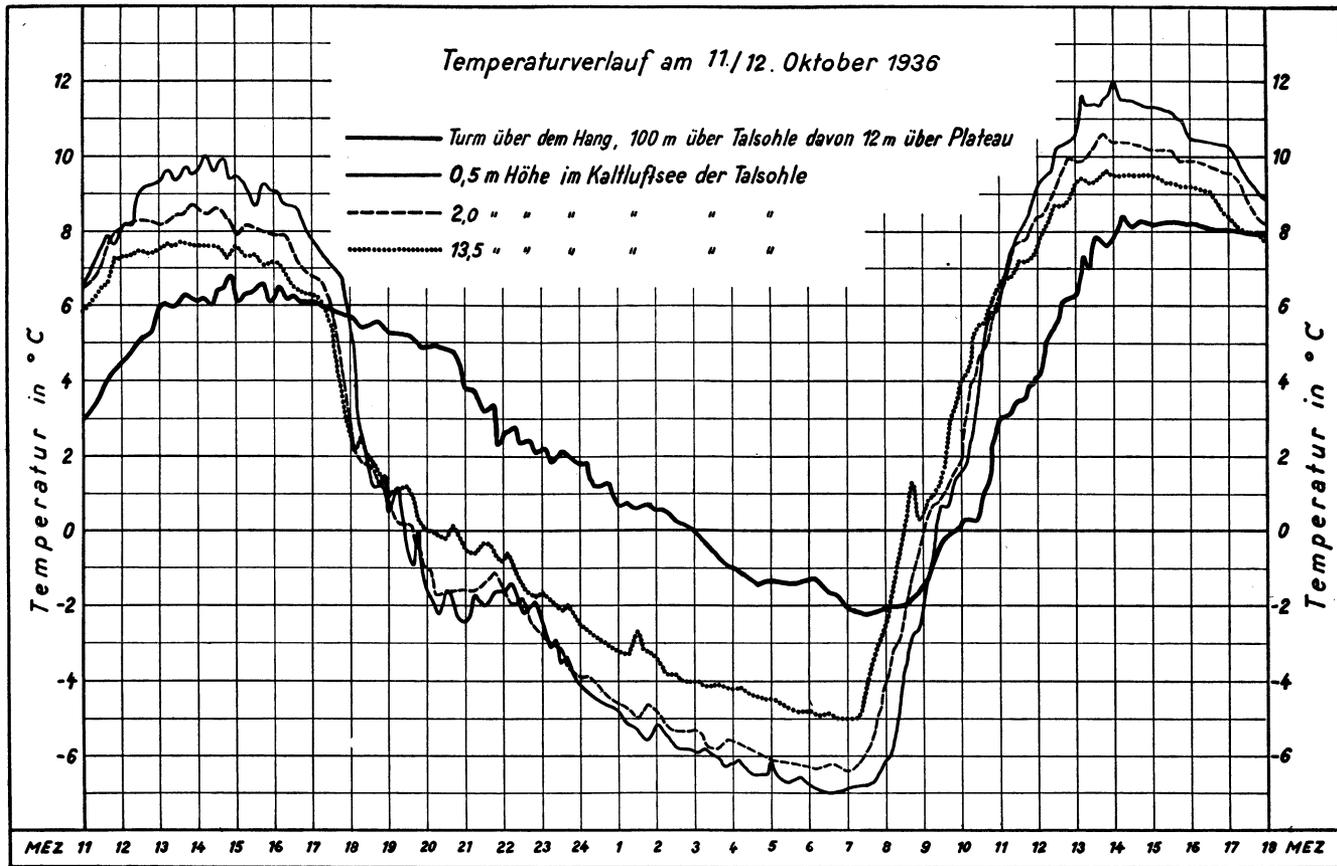


Abb. 7a. Temperaturen in einem Kaltluftsee, verglichen mit nicht lokalklimatisch beeinflusster Lage.

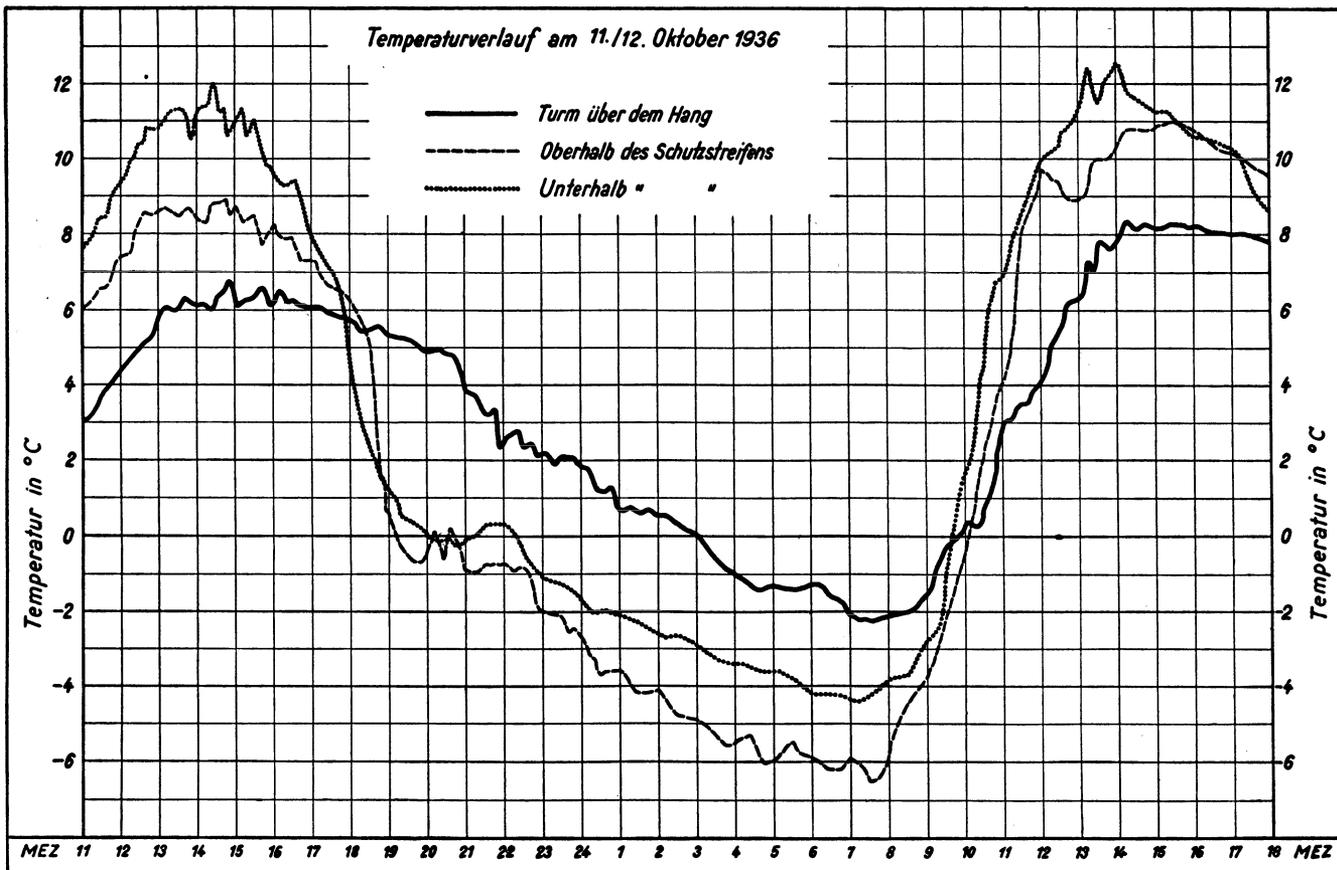


Abb. 7b. Temperaturen, beeinflusst durch Windschutzstreifen.

konnte, zeigt jedes Tal und wiederum jedes Seitental seinen eigenen Fallwind. Je enger das Tal ist, um so mehr tritt der Fallwind als Windbewegung in Erscheinung, da die Luftmasse zwischen den engen Wänden der Schlucht eingepreßt ist. Selbstverständlich spielen hinsichtlich der Menge der abfließenden Kaltluft noch die Meereshöhe der Einzugsgebiete, die Bodenbedeckung in ihnen und das Fehlen von Hindernissen auf der Talsohle eine erhebliche Rolle bei der Ausbildung starker Fallwinde. In den deutschen Weinbaugebieten ist besonders der Wisperwind bekannt, welcher in Inversionsnächten die Kaltluft von den Höhen des Taunusgebirges in das Rheintal hineinschleust.

Während die von den Wänden des Tales eingeengte Kaltluftmasse deutlich in Erscheinung tritt, wird die im Zirkulationssystem oben abfließende Warmluft kaum bemerkt. Durch das Eindringen von Kaltluft auf der Talsohle wird nämlich ständig die wärmere Luft im Tal abgehoben und nach oben auseinander gedrängt. Bei Ver-

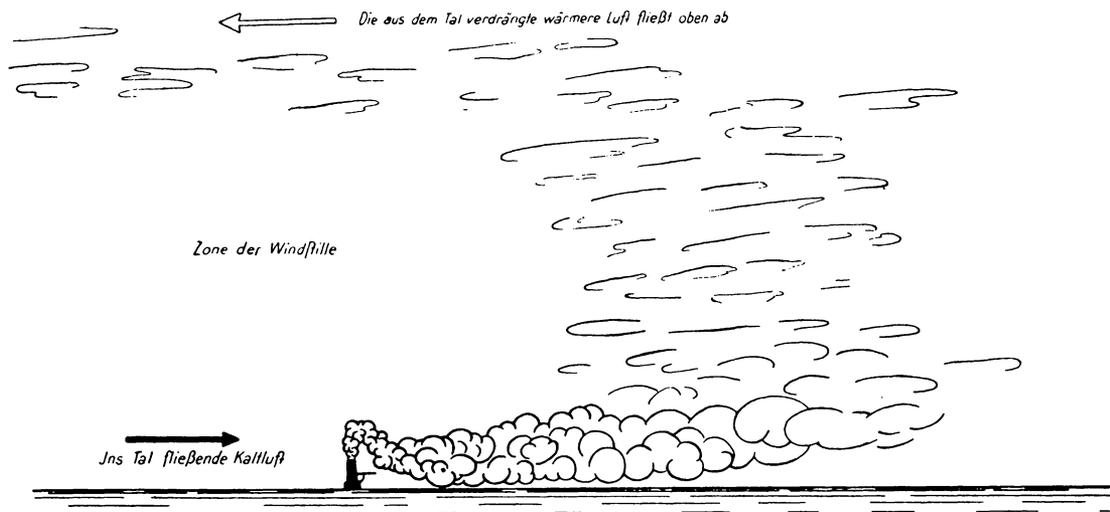


Abb. 8. Luftfärbungsversuch im Ahrtal zur Bestimmung des Zirkulationssystems bei Nachtfrost.

suchen über das Zirkulationssystem eines Tales (Abb. 8) zeigten die Versuche in einem bei Ahrweiler mündenden Seitental der Ahr, daß der Fallwind aus der Talsohle des etwa 30 m breiten Tales in 1 m Höhe rund 3 m je Sekunde Geschwindigkeit aufwies. Bereits in 5 m Höhe nahm die Geschwindigkeit auf 1 m ab und in 15 m Höhe war eine wahrnehmbare Windbewegung nicht mehr vorhanden. In einer Höhe von 30—40 m über der Talsohle, fast so hoch wie in diesem Fall die Randüberhöhungen waren, bemerkte man ein Auseinanderfließen der Rauchwolken, das aber nur wenige Zentimeter je Sekunde betrug. Diese Luftbewegung wurde auch sichtbar gemacht durch Rauchballen, die in brennendem Naphtalin mit Brandsätzen bis 25 m hoch hinauf geschleudert wurden. Die abgehobene Warmluft, die bergwärts fließt, tritt deswegen kaum in Erscheinung, weil sie dem Bereich der menschlichen Beobachtungen im allgemeinen entzogen ist und weil sie im Gegensatz zu dem Fallwind der Talsohle, der in den Abzugskanal des Tales eingepreßt ist, beim Fehlen eines Oberwindes nach allen Himmelsrichtungen auseinanderfließt.

#### D. Die Beurteilung der Frostgefährdung im Gelände und die lokale Klimaverbesserung.

In der nächtlichen Verteilung der Kaltluft treten auf kürzeste Entfernungen ganz erhebliche Unterschiede auf. Bei der Beurteilung unterscheiden wir Typen mit mehr oder weniger starker Frostgefährdung, von denen nach Abbildung 9 drei besprochen sein sollen. Die Geländefläche A liegt am Hang eines Tales, das vom nächtlichen Kaltluftstrom durchzogen wird. Sie ist je nach der Höhe und Intensität des Kaltluftstromes bis zu einem gewissen Grade gefährdet und zwar nimmt die Gefährdung, die auf der Talsohle am stärksten ist, mit der Höhe ab. Ist die Höherstreckung der Fläche A sehr groß, so können die höher gelegenen Teile gelegentlich auch wieder frostgefährdet werden, und zwar dadurch, daß infolge adiabatischer Temperaturabnahme wieder niedrigere Temperaturen auftreten. Die Fläche B, auf der Talsohle gelegen, stellt eine Fläche besonders starker Frostgefährdung dar. Man würde bei der Planung es unbedingt vermeiden müssen, auf die Talsohle eines Frosteinzugsgebietes selbst frostgefährdete Kulturen zu bauen. Die Frostgefährdung von B kann leicht verstärkt werden, wenn das Tal unterhalb von B durch Verengung oder durch Bäume, bauliche Anlagen usw. verstopft ist, da nunmehr der Abfluß der Kaltluft verlangsamt wird und sich ein Kaltluftsee bildet.

Die Geländestelle C soll am Hang liegen, und zwar an der Wasserscheide im Ursprungsgebiet des Tales. Sie ist am wenigsten frostgefährdet, weil die auf ihr selbst entstehende Kaltluft ins Tal abfließen kann, und weil

Kaltluft von anderswoher nicht zufließt. Unmittelbar hinter C liegt bereits die Wasserscheide, und infolgedessen ist ein Zustrom von Kaltluft nicht möglich.

In der unmittelbaren Nähe von Trier liegen zwei Weinbergflächen, die sich in Bezug auf ihre Frostgefährdung erheblich voneinander unterscheiden. Die Weinbergslage Augenscheiner ist seit Menschengedenken ohne Frostschäden (Abb. 159, Tafel 1). Die Fläche liegt mit guter Hangneigung, so daß die auf ihr selbst entstehende Kaltluft nach der tieferen Geländestelle abfließen kann. Wie eine Mauer steigen dahinter fast senkrecht die Felsen auf, auf deren Höhe die Wasserscheide verläuft. Ein nennenswerter Zufluß von Kaltluft aus höher gelegenen Geländestellen kann daher nicht eintreten. Auf der Talsohle, als der tiefsten Geländestelle, ist eine Ansammlung von Kaltluft nicht möglich. Die Talsohle wird nämlich von dem hier etwa 150 m breiten Moselfluß, dessen Wasser in Maifrostnächten etwa  $12^{\circ}$  warm ist, eingenommen. Die über diese Wasserfläche hinwegfließende Kaltluft muß sich zwangsläufig erwärmen.

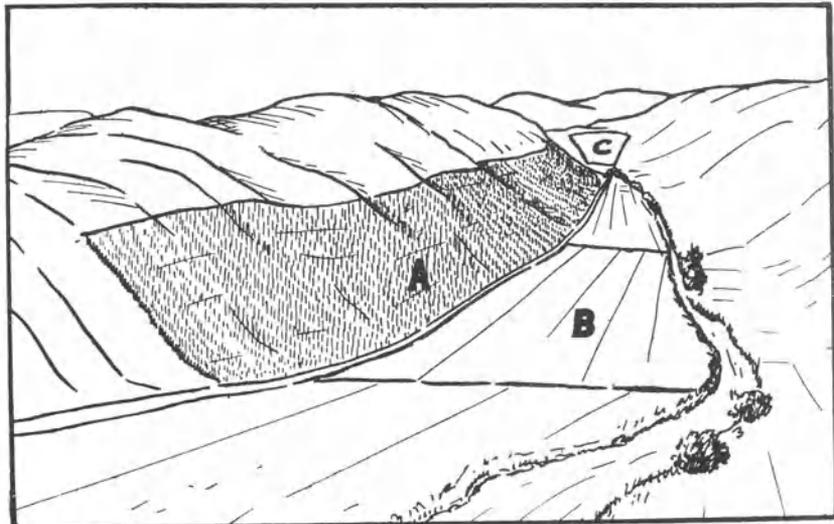


Abb. 9. Lage und Frostgefährdung.

Im Gegensatz dazu befindet sich nur wenige 100 Meter Luftlinie entfernt das Staatsweingut Avelsbach (Abb. 160, Tafel 1), dessen Frostgefährdung sehr groß ist. Von den darüber liegenden Höhen kann dort, wo der Schutzwald noch nicht genügend hoch ist, ungehindert Kaltluft in das Avelertal hineinströmen. Die Talsohle besteht aus versumpften Wiesen, die sich tagsüber nur schlecht erwärmen und in Maifrostnächten bis auf  $-7^{\circ}$  abkühlen. Der Abfluß der Kaltluft weiter nach unten ist gehemmt durch Bäume und die Verbauung in der Talmündung. Als Folge sind hier auf 25 ha Weinbergfläche in 16 Jahren RM 600000.— Frostschäden aufgetreten.

Bei der häufigen Frage nach der Beurteilung der Frostgefährdung einer Geländestelle ist nicht nur die Stelle selbst zu betrachten, sondern alle Flächen, die für die Kaltluftbildung, die sich an der Schadensstelle bemerkbar macht, in Betracht kommen. Am Unterlauf eines Tales ist demnach das gesamte Einzugsgebiet oberhalb dieser Geländestelle zur Beurteilung heranzuziehen. Hierbei gilt es zunächst die Größe und das Gefälle der Einzugsgebiete festzustellen. Je steiler geneigt die Flächen sind, um so weniger kommen sie für Kaltluftentstehung in Frage, da die Strahlungsverhältnisse stark geneigter Flächen weniger zur Bildung von Kaltluft Anlaß geben als die ebener und schwach geneigter Flächen. Die ersteren strahlen nämlich größtenteils gegen gleichtemperierte Flächen z. B. gegen den gegenüberliegenden Hang, und erleiden infolgedessen keinen großen Wärmeentzug durch Strahlung. Die Größe der Einzugsgebiete ist bei der Kaltluftentstehung zu berücksichtigen. Wir sehen dies bei der Beurteilung von Fällen aus der Praxis, wo z. B. mit gleichen Methoden Frostschadenverhütung bei Oppenheim und bei Oberingelheim getrieben werden sollte (Abb. 10). Während im Falle von Oppenheim das Einzugsgebiet der Fläche nur  $20 \text{ km}^2$  groß war, betrug es im Falle Oberingelheim  $370 \text{ km}^2$ . Für die Durchführungsmöglichkeiten der Versuche

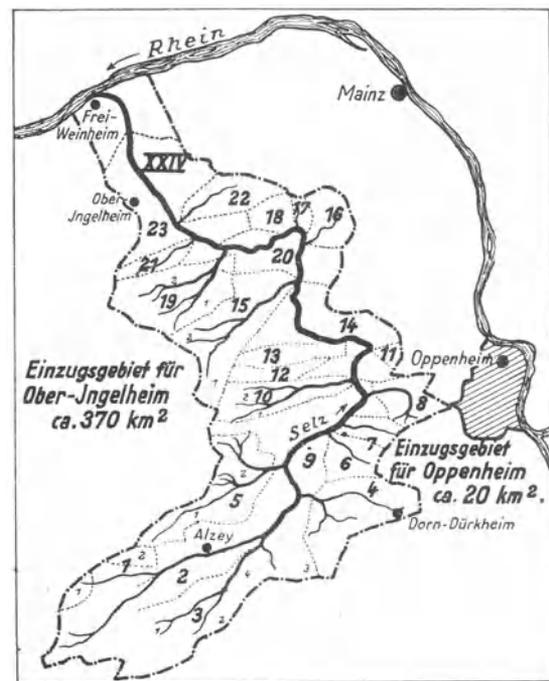


Abb. 10. Die Frosteinzugsgebiete der Räucherversuche bei Oberingelheim und Oppenheim.

ergab sich, daß das Frosträuchern im Falle von Oppenheim gute Aussicht auf Erfolg hatte, denn in der Ebene von Oppenheim, die abgegrenzt war durch den breiten Rheinstrom und durch flache Randhöhen, befand sich das Schadensgebiet in der Nachbarschaft der Frostentstehungsgebiete. Das heißt, die in der Ebene entstehende Kaltluft wirkte sich auch am Ort aus. Anders war es bei dem Räucherversuch Oberingelheim, welcher im Unterlauf des Einzugsgebietes der Selz stattfand. Die Selz sammelt Kaltluft aus ihrem rund  $370 \text{ km}^2$  großen Einzugsgebiet und

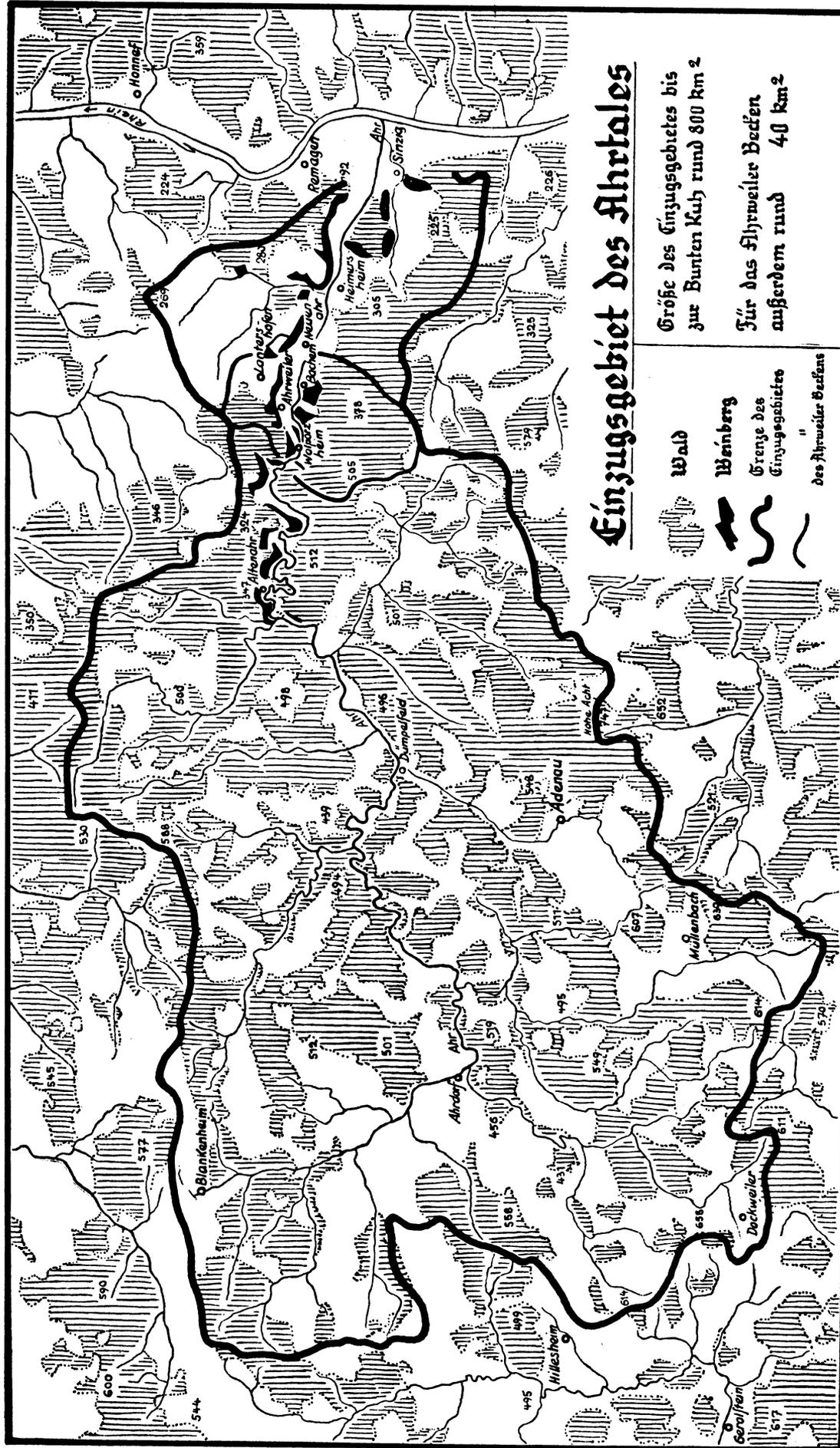


Abb. 11.

diese überflutet den Unterlauf des Tales. Es wird also an der Schadensstelle fortgesetzt Kaltluft aus weit entfernt liegenden Frostentstehungsgebieten herangetragen. Die in Freiweilheim nahe am Rhein gelegene meteorologische Station hat trotz ihrer makroklimatisch sehr begünstigten Lage ein ungewöhnlich niedriges nächtliches Minimum und eine sehr kurze frostfreie Periode, eben deswegen, weil sie unter der ständigen Überflutung durch die nächtliche Kaltluft der Selz zu leiden hat.

Als seinerzeit über die Fortführung der Frostschadenverhütungsverfahren mittels Räuchern im Ahrtal entschieden werden sollte, wurde festgestellt, daß aus den gleichen Gründen wie für den Fall Oberingelheim nicht mit der Möglichkeit einer wirksamen Durchführung des Frosträucherns gerechnet werden kann (Abb. 11). Auch hier zeigte sich, daß die Frostentstehungs- und Auswirkungsgebiete räumlich weit voneinander getrennt sind. Selbst wenn es gelingt, die im Unterlauf des Tales liegenden gefährdeten Flächen in eine Rauchwolke zu hüllen, um sie vor Abkühlung durch Ausstrahlung zu schützen, kann doch nicht verhindert werden, daß sich aus dem Oberlauf des Tales, aus den nicht unter Strahlungsschutz stehenden Frostentstehungsgebieten, fortgesetzt neue Kaltluftmassen heranbewegen und die Schadensgebiete überfluten.

Die Wasserscheiden sind die Grenzen der Frosteinzugsgebiete, zum wenigsten in stark geneigtem Gelände. In flachem Gelände kann es vorkommen, daß geringe horizontale Luftmassenverschiebungen, die auch in Inversionsnächten nicht ganz ausbleiben, eine Übertragung von Kaltluftmassen aus nahe gelegenen Gebieten auch über die Wasserscheide hinweg ermöglichen. Im gebirgigen Gelände ist dies völlig ausgeschlossen.

Wenn für einen bestimmten Fall (Abb. 12 a) die Beteiligung der Einzugsgebiete an der Kaltluftlieferung für eine am Talausgang liegende Geländestelle festgestellt werden soll, so wären folgende Bewertungen zu machen. Am

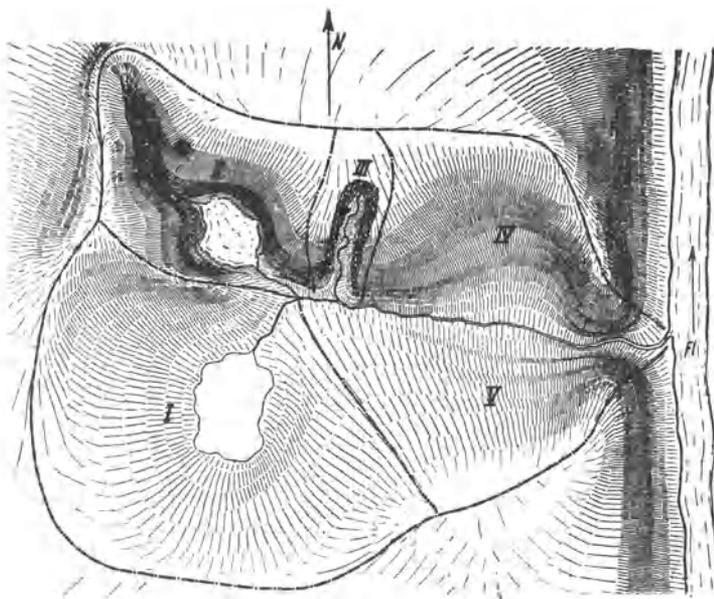


Abb. 12 a. Größe und Gefälle der Einzugsgebiete.  
 - - - - - Wasserscheiden (Grenzen der Frosteinzugsgebiete).  
 I = 26,6 ha, II = 10,8 ha, III = 3,1 ha, IV = 11,7 ha, V = 11,4 ha:  
 Zus. 63,6 ha.

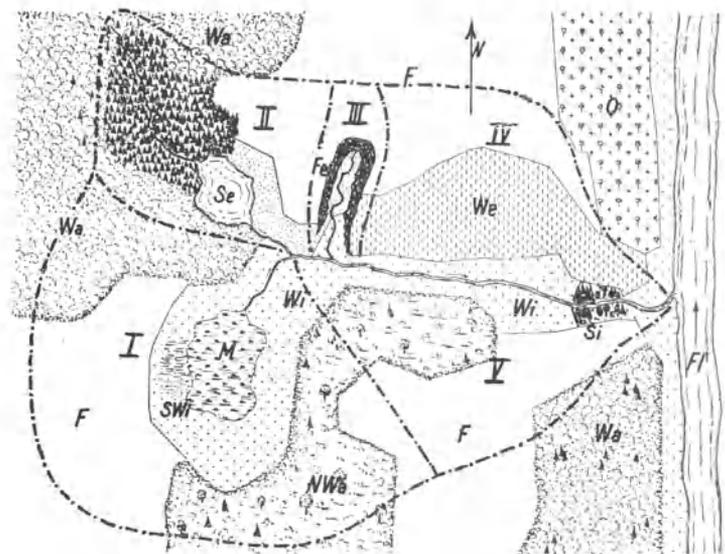


Abb. 12 b. Bodenbedeckung der Einzugsgebiete.  
 F = Felder, Fe = Felsen, Fl = Fluß, M = Moor, NWa = Niederwald, O = Obstanlagen, Se = See, Si = Siedlung, SWi = Sumpfwiese, Wa = Wald, We = Weinberg, Wi = Wiese.

wenigsten Kaltluft liefert das Einzugsgebiet III. Es ist flächenmäßig das kleinste und weist steile Hänge und günstige Bodenverhältnisse (Felsen) auf. Das Gebiet II hat auch großenteils ein kräftiges Gefälle. Nur ein Teil seiner Bodenbedeckung sind Felder, der größere Teil wird von Hochwald eingenommen. Auf der Talsohle liegt ein See, die noch entstehende Kaltluft kann hier erwärmt werden. Auch das Einzugsgebiet IV ist trotz seiner Größe verhältnismäßig wenig an der Kaltluftlieferung beteiligt. Die Fläche We (Abb. 12 b), ein Weinberg, hat eine von Vegetation wenig bedeckte Bodenoberfläche mit starker Hangneigung. Lediglich die oberhalb liegenden Felder sind an der Kaltluftentstehung stärker beteiligt. Das etwa gleichgroße Einzugsgebiet V hat bei gleicher Größe geringe Hangneigung, ist teils mit Feldern, teils mit Wiesen und teils mit Niederwald bedeckt. Hiervon ist gerade der Niederwald infolge seiner verfilzten Grasnarbe als gefährliches Kaltluftentstehungsgebiet gekennzeichnet. Das am meisten an der Kaltluftlieferung beteiligte Gebiet ist das Einzugsgebiet I. Es stellt einerseits die größte Fläche dar, ist ferner schwach geneigt und enthält Bodenoberflächen, die großenteils unter die an der Kaltluftbildung am meisten beteiligten zu rechnen sind.

Abgesehen von einer mit Hochwald bedeckten Fläche sind hier Felder und Wiesen vorhanden, vor allem aber die als stärkste Kaltluftbildner bezeichneten Bodenoberflächen: Niederwald, Sumpfwiese und Moor. Schätzungsweise ist die Fläche I im Verhältnis zur Fläche II zehnmal so stark als Kaltluftbildner zu bewerten.

An einem praktischen Beispiel soll gezeigt werden, daß die lokale Klimaverbesserung es ermöglicht, eine Geländestelle, die bisher stark frostgefährdet war, nach Durchführung gewisser Maßnahmen, die hauptsächlich in Eingriffen in die Bodendecke bestehen, erheblich günstiger zu stellen. Im Falle Abb. 161, Tafel 1 ist ein Weinberg als besonders frostgefährdet bezeichnet. Wenn man das Gesamtgelände betrachtet, welches auf die Frostgefährdung des Weinbergs einen Einfluß hat, so sieht man zunächst, daß nicht überall günstige Oberflächenverhältnisse vorliegen, daß vielmehr häufig ungünstige Bodenoberflächen vorhanden sind.

Die schwarzen Pfeile bedeuten den Fluß der nächtlichen Kaltluft. Wir sehen, daß im Vordergrund eine Wasserscheide verläuft und daß die Kaltluft teils auf den Beschauer zufließt, teils in das Tal, in welchem der Weinberg liegt. Ungünstige Bodenoberflächen sind das versumpfte Wiesental und die Hecken. Von allen Seiten kann die Kaltluft ungehindert den Weinberg überfluten; besonders ungünstig ist das Vorhandensein eines Gehölzstreifens unterhalb des Weinbergs, in welchem die Kaltluft zurückgestaut wird und zur Bildung einer lokalen Kaltluftzone Veranlassung gibt.

Die Verhütungsmaßnahmen sind folgende:

1. Ungünstige Bodenoberflächen, sogenannte Frostentstehungsgebiete, werden beseitigt oder in ihrer Wirkung gemildert. Der Niederwald wird in Hochwald verwandelt und das versumpfte Wiesental durch Entwässerung trocken gelegt.
2. Der Zufluß von Kaltluft wird gehindert. Um den Weinberg herum ziehen sich Windschutzstreifen, jedoch nicht auf den tiefer gelegenen Geländestellen! Die Seitentäler werden durch Windschutzstreifen abgeriegelt, welche aus dem Fallwind die Kaltluft herausfiltern sollen. Diese Windschutzstreifen, quer über das Tal hinweg, gehen dem Fallwind weit entgegen und überziehen in gewissen Abständen den Oberlauf des Haupttales.
3. Die Bildung eines Kaltluftsees an der zu schützenden Kultur wird verhindert. Der bisher die Kaltluft im Weinberg zurückstauende Gehölzstreifen wird abgetrieben, so daß keine Kaltluft im Weinberg liegen bleiben kann.
4. Der Fallwind wird vorgewärmt. Auf der Talsohle werden Stauweiher angelegt, deren großer Wärmeverrat und günstige Lage im Gelände die Anwärmung des sich auf der Geländestelle bewegenden Fallwindes ermöglicht.

Solche lokalen Klimaverbesserungen (Abb. 162, Tafel 1), wie die Anlage von Windschutzstreifen, die Entfernung rückstauender Hindernisse und die Vorwärmung durch Wasseranlagen auf der Talsohle könnten in Hunderten von Fällen auf natürlichem Wege jede Frostgefährdung des Geländes beseitigen. Es sind daher durch die Agrarmeteorologische Forschungsstelle Trier viele örtliche Klimaverbesserungsprojekte ausgearbeitet und manche schon in die Tat umgesetzt worden (z. B. Weingut Sommerau im Ruwertal). P. Lehmann<sup>215a)</sup> hat 1934 vor der Trockenlegung des Neusiedlersees gewarnt, als deren Folge er Verstärkung der Temperaturgegensätze und Auftreten von Spätfrösten erwartet.

Jedenfalls steht unzweifelhaft fest, daß eine sachgemäße Planung bei der Anlage von frostgefährdeten Kulturen der denkbar beste Frostschutz ist. Die Planung besteht in einem Aufsuchen frostfreier oder wenig frostgefährdeter Geländestellen und in einer Milderung oder Beseitigung ungünstiger lokalklimatischer Verhältnisse.

Die mit der Planung befaßten Behörden haben sich in Westdeutschland diesen Erkenntnissen nicht verschlossen. Es wird im Rheinland keine Rodung im Einzugsgebiet von Wein- und Obstflächen vorgenommen ohne vorheriges Anhören der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle Trier. Damit sollen ungünstige Folgeerscheinungen von Rodungen, bestehend in der Bildung neuer Frostentstehungsgebiete, welche die Frostschadengefahr für den Wein- und Obstbau vermehren könnten, vermieden werden. Der Regierungspräsident von Trier, die Landforstbehörden und die Landesplanungsgemeinschaft Rheinland, sowie nachgeordnete Behörden richten sich in ihren Entscheidungen nach den gutachtlichen Äußerungen der Forschungsstelle Trier.

## II. Die Frostvorhersage.

### A. Einleitung.

Die Frostvorhersage hat eine besondere Bedeutung bei der Frostscha­denverhütung, weil sie auf die Rentabilität der Schutzmaßnahmen entscheidenden Einfluß hat. Es erleichtert die Maßnahmen des Landwirts sehr, wenn er nicht während der gesamten Gefahrenzeit, die sich im Frühjahr auf zwei Monate und im Herbst auf etwa die gleiche Zeit erstreckt, eine ständige Überwachung des Verlaufs der Lufttemperatur während der Nacht vornehmen muß. Die Vorhersage, die teils von Zentralstellen, teils nach örtlichen Messungen versucht wurde, ist jedoch eine recht komplizierte Angelegenheit.

Wie es scheint, hat man in den Vereinigten Staaten von Amerika die Schwierigkeit einer genauen Frostvorhersage, die ein unter Umständen von den frostgefährdeten Gebieten weit abliegendes Zentralinstitut abgibt, nicht nur zuerst erkannt, sondern daraus auch die Folgerung gezogen. Schon 1912 ist man deshalb dort zur Errichtung des sogenannten Fruit-frost-Service geschritten; dieser verfügt zwar über eine große Reihe eigener meteorologischer Stationen inmitten der Frostgebiete, verzichtet aber keineswegs auf die Zusammenarbeit mit den öffentlichen Wetterdienststellen. Allerdings befaßt sich dieses Institut nicht ausschließlich mit dem Warndienst, sondern hat auch offenbar in allen praktischen Fragen einzugreifen, wie in der Beratung über die Methoden, Brennstoffbeschaffung, Tarife usw. Wie wir später zeigen werden, haben es die Amerikaner in ihren Frostvorhersagen zu einer schon beachtlich großen Treffsicherheit gebracht. Allerdings dürfen wir hier nicht verschweigen, daß die Eigenart des vorwiegend kontinentalen Klimas der an einer Frostvorhersage besonders interessierten Gebiete eine Vorhersage besser ermöglicht als bei uns.

In landwirtschaftlichen Kreisen ist man häufig der Ansicht, daß Frostwarnung gleichbedeutend sei mit der Angabe, ob die eintretende niedrige Temperatur in den Pflanzen Frostscha­den hervorrufen werde oder nicht. Für den praktischen Landwirt bedeutet eben der Frost nur dann eine Gefahr, wenn er seine Kulturen schädigt. Eine derart abgefaßte Fragestellung ist aber durch einen Meteorologen schlechterdings nicht zu beantworten. Wie wir bei dem Abschnitt Frost und Pflanze zeigen, gehört diese Frage in das Gebiet der Pflanzenphysiologie. Wir legen dort klar, daß das Erfrieren der Pflanze zwar von einer bestimmten Temperatur abhängt, diese aber ihrerseits wieder durch Alter und Zustand des einzelnen Individuums bedingt ist. Die Feststellung, welche Temperaturgrade von den einzelnen Pflanzen oder Pflanzenteilen bei ihrem derzeitigen Zustand gerade noch ausgehalten werden können, ohne daß sie erfrieren, ist selbstverständlich bei jeder Frostbekämpfung entscheidend; aber ihre Beantwortung kann nicht als Sache des prognosestellenden Meteorologen angesehen werden.

Aufgabe und Ziel der meteorologischen Frostvorhersage ist es vielmehr, anzugeben, welche niedrigsten Temperaturen wir während einer Frostnacht an einer bestimmten Stelle zu erwarten haben, oder aber — bei Kenntnis der für die einzelnen Pflanzenarten gefährlichen Temperaturgrenzen — die Angabe, ob diese Grenze im Laufe der Nacht erreicht oder sogar unterschritten werden wird.

Die Praxis verlangt also Angabe der zu erwartenden Temperatur der Pflanze, bzw. als Mindestforderung die der Luft in Pflanzenhöhe. „Weil nun frostgefährdete Pflanzen meist jung sind und fast immer im Luftraum wenige Dezimeter über dem Boden stehen, ist das Problem der praktischen Frostvorhersage zugleich ein Problem der bodennahen Luftschicht“ (Geiger). Eine Ausnahme machen nur Obstbäume, die entweder in der Blütezeit oder aber, wie die Citrusplantagen Nordamerikas, während der Fruchtreife vor niedrigen Temperaturen geschützt werden müssen.

Als besonders erschwerend für die Lösung der oben gestellten Aufgabe müssen wir die Tatsache ansehen, daß man sich erst seit jüngster Zeit stärker mit dem Klima der bodennahen Luftschicht befaßt, indes man bisher bestrebt war, alle Temperaturmeßgeräte gerade aus dieser „Störungszone“ herauszuheben, und so zu einer Aufstellung der Instrumente kam, die naturnotwendig keine in der landwirtschaftlichen Praxis direkt verwertbaren Zahlen liefern kann. Da aber bisher keine anderen Beobachtungsdaten als die aus etwa 2 m Höhe und dazu noch in thermisch trägen Hütten gewonnenen in ausreichendem Maße zur Verfügung standen, so ist es nicht weiter verwunderlich, daß die Regeln und Formeln zur Frostvorhersage fast durchweg auf diesen Angaben fußen und somit nur durch nachträgliches Anbringen von Korrekturen für die bodennahe Luftschicht Verwendung finden können. Hierauf werden wir weiter unten noch ausführlicher einzugehen haben.

### B. Die theoretische Berechnung des Temperaturminimums durch Berechnung der statischen Abkühlung.

#### 1. Allgemeines.

Angström<sup>20)</sup> hat darauf hingewiesen, daß der Fall der Lufttemperatur während der Nacht bis zum Minimum durch zwei Faktoren gegeben ist. Diese beiden Faktoren sind:

1. die statische Abkühlung; sie ist bedingt durch den physikalischen Zustand des Bodens und der darüber liegenden Luftmasse am betreffenden Beobachtungsort, umfaßt also die Abkühlung durch die Ausstrahlung;
2. die dynamische Abkühlung; sie betrifft die durch die Wetterlage bedingte Temperaturänderung über größeren Gebieten, bezieht sich somit auf das Heranführen von anders beschaffenen Luftmassen an den Beobachtungsort.

Jede Frostvorhersage muß also, sofern sie zuverlässig sein will, statische und dynamische Abkühlung in Betracht ziehen.

Die genaue mathematische Formulierung der nächtlichen Abkühlung, die alle dafür in Betracht kommenden Faktoren voll und ganz zu berücksichtigen versucht, stößt auf unüberwindliche Schwierigkeiten. Nur die statische Abkühlung ist unter Zugrundelegen vereinfachender Annahmen noch verhältnismäßig einfach mathematisch darstellbar; daher besteht zu ihrer Berechnung eine Reihe von Formeln, die wir anschließend näher zu besprechen haben. Daß die meisten derselben in Amerika aufgestellt wurden, ist nicht weiter verwunderlich. Liegen doch dort die an einer Frostvorhersage interessierten Gebiete größtenteils in einem Klima mit kontinentalen Eigenschaften, in welchem der Einfluß der dynamischen Temperaturänderungen sehr zurücktritt und die nächtliche Ausstrahlung fast ausschließlich den Temperaturgang bestimmt.

Daß die alleinige Benutzung von Formeln für die Frostvorhersage, also nur die Berechnung der Abkühlung durch Ausstrahlung, nicht für alle, zumal die östlichen (meeresnahen) Teile der Vereinigten Staaten zweckmäßig erscheint, geht aus einer Arbeit von Bennett<sup>55)</sup> hervor; er schreibt: „Es wäre aber ein großer Fehler, sich nur auf die Beobachtungen der relativen Feuchte und des Taupunktes zu verlassen, besonders in dem Fall, wenn ein Temperaturfall zu erwarten ist, der nicht allein auf die Strahlung zurückzuführen ist, sondern auch auf die Fortbewegung einer großen Kaltluftmasse. Diesen Fällen muß in Florida ganz besondere Beachtung geschenkt werden.“

„Für unsere Gegenden . . . wird es also von viel größerem Nutzen sein, die Vorhersage nach gründlichem Studium der Morgenwetterkarte zu geben und nicht nach Berechnung auf Grund der mittäglichen Beobachtungen von relativer Feuchte und Taupunkt.“

Auch in unserem ozeanischen Klima mit seinem raschen Luftmassenwechsel sind die Bedingungen für eine zufriedenstellende Frostvorhersage auf Grund von Formeln recht ungünstig, und wir brauchen uns nicht zu wundern, wenn sie in Mitteleuropa wenig Eingang gefunden hat.

Im Gegensatz zur Formel setzt uns die Wetterkarte nur von der dynamischen Temperaturänderung in Kenntnis; ihre Modifizierung durch die örtlichen Einflüsse wird allerdings mehr oder weniger eine Frage der örtlichen Beobachtung bleiben müssen.

Die Grundlage für die meisten Formeln, die, wie nochmals betont werden soll, die statische Abkühlung allein berücksichtigen, bildet die Feststellung von Defant<sup>85)</sup>, daß die im Laufe der Nacht erreichte Minimumtemperatur in der Hauptsache eine Funktion der Temperatur beim Sonnenuntergang und des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre ist. Der Wärmenachschub aus dem Erdboden wird, wenigstens direkt, nur von Franklin<sup>110)</sup> für die Vorhersage benutzt. Von dieser letzten Formel abgesehen, können wir die bisher aufgestellten Formeln zur Vorhersage der zu erwartenden Minimumtemperatur etwa nach den folgenden Gesichtspunkten in zwei Gruppen zusammenfassen:

1. Minimumtemperatur als Funktion der Lufttemperatur zu einer bestimmten Zeit (oder ihres zeitlichen Verlaufes);
2. Minimumtemperatur als Funktion der Temperatur und des Wasserdampfgehaltes der Luft zu einer bestimmten Zeit.

## 2. Die Frostvorhersage auf Grund der Lufttemperatur allein.

### a) Die „Median-hour“-Methode (Mittelzeittemperatur).

Beals<sup>39, 40)</sup> geht bei dieser von ihm entwickelten Methode davon aus, daß die Temperaturkurve bei gleichen Wetterlagen stets einen für die betreffende Station charakteristischen Verlauf aufweist. Zwar kann nach seiner Ansicht die Kurve als Ganzes je nach dem allgemeinen Temperaturenniveau höher oder tiefer liegen, und auch die Eintrittszeit der Temperaturextreme kann sich infolge Verschiedenheit des vorausgegangenen Wetters bisweilen etwas verschieben, die Kurve soll aber in jedem Fall ihre typische Gestalt beibehalten. Man bestimmt nun aus den Thermographenstreifen die genaue Zeit, zu welcher die zwischen Tagesmaximum und dem Minimum der folgenden Nacht gelegene Temperatur  $t_m = (t_{\max} + t_{\min}) : 2$  einzutreten pflegt. Nach Smith<sup>357)</sup> ist die Eintrittszeit dieser Temperatur auffallend konstant; er fand für die Station Delaware, Ohio, im Mai 1913 als durchschnittliche Stunde 19 Uhr 36, für 1914 19 Uhr 35. Auch die Streuung der Einzelwerte war nach seinen Beobachtungen recht

gering, nämlich zwischen 19 Uhr 15 bzw. 19 Uhr 50. Zur Voraussage bestimmt man zu der gegebenen Zeit die Lufttemperatur und subtrahiert von dieser die Differenz zwischen Maximum und Mittelzeittemperatur.

Als Nachteil dieser Methode wird von Ellison<sup>95)</sup> angegeben, daß sie ganz auf der Temperatur eines Augenblickes aufbaut, in dem diese unter Umständen gerade vorübergehend stärker beeinflusst sein kann; außerdem sei der Termin, an dem die Prognose abgegeben werden könne, doch schon recht spät.

Smith<sup>357)</sup> hat aus den Beobachtungen von 28 Frühjahrsnächten des Jahres 1915 in Ohio die prozentuale Häufigkeit der Fehler bei Anwendung der Median-hour-Methode berechnet.

Tabelle 3. Häufigkeit der Fehler bei Anwendung der Median-hour-Methode

Fehlergröße		Prozentuale Häufigkeit der Fehler
0 — 3° F	0 — 1,7° C	69 %
4 — 5° F	2,2 — 2,8° C	23 %
6 — 9° F	3,3 — 5,0° C	8 %

Wir haben diese Methode der Mittelzeittemperatur für die Station Trier-Berg und die in der Nähe liegende Station des Preußischen Staatsweingutes Avelsbach anwenden wollen und haben deshalb aus einer größeren Reihe von Frostnächten im Frühjahr und Herbst die jeweiligen Eintrittszeiten der Mitteltemperatur berechnet. Im Gegensatz zu Smith mußten wir jedoch eine außerordentlich starke Streuung dieser Werte feststellen. Wir geben deshalb in Tabelle 4 einige Zeitangaben, die wir aus den Thermographenstreifen der Stationen Trier-Berg und Avelsbach gewonnen haben.

Tabelle 4. Eintrittszeiten der Mitteltemperatur

Datum	Max.	Min. der folg. Nacht	Eintrittszeit der Mitteltemperaturen	Witterung von der Zeit des Eintritts des Maximums bis zu der des Minimums
6. 10. 36	7,3	— 0,4	19,00	Trier-Berg heiter bis wolzig
8. 10. 36	7,1	— 0,4	21,45	heiter, zeitweise wolkenlos
11. 10. 36	8,8	— 4,3	23,25	wolkenlos
27. 3. 37	5,8	— 0,4	17,40	Schauer p, meist bewölkt oder bedeckt
6. 10. 36	8,1	— 2,4	18,20	Avelsbach heiter bis wolzig
9. 10. 36	9,8	— 2,5	01,00	abd. bedeckt, dann wolkenlos bis heiter

Unter Heranziehen aller Frostnächte müssen wir für den Herbst 1936 demnach für die Station Trier-Berg als frühesten Eintrittstermin der Mitteltemperatur 19 Uhr 00, als spätesten 23 Uhr 25 annehmen, für Avelsbach 18 Uhr 20, bzw. 01 Uhr 00. Die entsprechenden Werte aus dem Frühjahr 1937 für Trier-Berg sind 17 Uhr 40 bzw. 21 Uhr 35.

Diese Beispiele dürften wohl genügen, um zu zeigen, daß wir bei unserem maritimen Klima mit seinen raschen Änderungen eine Konstanz der Eintrittszeit der Mitteltemperatur nicht annehmen können — die eben besprochene Methode also bei uns nicht angewendet werden darf.

b) Die „Post-median-hour“-Methode

Thomas nimmt den Temperaturabfall vom Maximum bis zu dem Stand um 22 Uhr als zwei Drittel des gesamten Abfalles vom Maximum bis zum Minimum an. Diese Methode fußt auf denselben Voraussetzungen wie die zuvor besprochene und zeigt daher auch etwa die gleichen Mängel.

Tabelle 5. Abweichungen der eingetretenen Minimumtemperaturen von den berechneten

Trier-Berg			
Datum	Tatsächliches Minimum — berechnetes Minimum	Datum	Tatsächliches Minimum — berechnetes Minimum
29. 9. 36	— 1,8°	10. 10. 36	+ 4,0
2. 10. 36	+ 1,0	11. 10. 36	+ 0,6
3. 10. 36	+ 1,1	26. 3. 37	— 1,9
5. 10. 36	— 0,5	27. 3. 37	— 0,1
6. 10. 36	— 1,0	28. 3. 37	+ 0,7
7. 10. 36	+ 1,9	29. 3. 37	+ 1,7
8. 10. 36	+ 2,0	30. 3. 37	+ 2,5
9. 10. 36	+ 2,8		

An Stelle der Werte von 22<sup>h</sup> benutzen wir die von 21<sup>33</sup>.

Die Prüfung dieser an sich recht einfachen Methode ergab für Trier-Berg die Tabelle 5, die nicht nur zeigt, daß bei der Berechnung Fehler von mehreren Graden auftreten, sondern außerdem noch, daß das berechnete

Minimum in zwei Dritteln der Fälle gegenüber dem tatsächlichen zu hoch ausfiel. Auch aus diesem Grund erscheint die Anwendung der „Post-median-hour“-Methode bedenklich.

c) Die „Pre-median-hour“-Methode.

Alter<sup>17)</sup> benutzt die Tendenz des Temperaturfalles am frühen Abend zur Bestimmung der Mittelzeittemperatur durch Extrapolation der bis dahin aufgezeichneten Kurve. Aus dieser so aufgefundenen Mittelzeittemperatur wird das Minimum nach der Median-hour-Methode bestimmt.

Die Möglichkeit, daß die Vorhersage der Niedrigsttemperatur schon früher als bei den anderen Methoden abgegeben werden kann, wird durch eine bei weitem geringere Treffsicherheit erkauft. Diese Methode haben wir einer weiteren Prüfung nicht unterzogen, da sie ja hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit infolge der durch die Extrapolation bedingten Unsicherheit der Mittelzeittemperaturbestimmung noch hinter der der Median-hour-Methode bleiben muß.

d) Die „Maximum-Minimum“-Methode.

Nichols<sup>276, 277, 278)</sup> nimmt an, daß die Differenz zwischen dem Maximum der Temperatur am Mittag und dem Minimum in der folgenden Nacht für einen bestimmten Ort nur von Jahreszeit und Bewölkung abhängt. Die Minimumtemperatur wird also direkt als eine Funktion der vorhergegangenen maximalen Temperatur angesehen. In Wirklichkeit kann aber das Maximum jeweils von anderen Feuchtigkeitswerten begleitet sein, so daß dann während der Nacht eine andere Ausstrahlung einsetzt, die ein anderes Minimum bedingt. In dieser Erkenntnis hat schon Nichols die Amplituden für fünf verschiedene Wettertypen berechnet.

Die Vorhersage nach dieser Methode ist sehr einfach; man benötigt nur die jeweiligen Temperaturamplituden der betreffenden Station in Abhängigkeit von Jahreszeit und Wettertyp.

Smith<sup>357)</sup> fand beim Prüfen der „Maximum-Minimum“-Methode unter Verwendung von 28 Frühjahrsnächten die in Tabelle 6 gegebene prozentuale Häufigkeit der Fehler.

Tabelle 6. Häufigkeit der Fehler bei Anwendung der „Maximum-Minimum“-Methode

Fehlergröße		Prozentuale Häufigkeit der Fehler
0 — 3° F	0 — 1,7° C	46 %
4 — 5° F	2,2 — 2,8° C	36 %
6 — 9° F	3,3 — 5,0° C	18 %

Die Methode der Frostvorhersage aus der täglichen Temperaturschwankung wurde auch von uns einer Prüfung unterzogen. Wir haben zu diesem Zweck die mittlere Differenz zwischen dem Maximum der Temperatur am Mittag und dem folgenden nächtlichen Minimum berechnet. Dabei fanden nur die Daten aus den Frühjahrsfrostperioden von 1931 bis 37 Berücksichtigung, bei denen das Minimum in der Hütte auf mindestens +0,5° C sank; außerdem wurde die Bestimmung der Amplitude gesondert für drei Typen von Nächten durchgeführt, nämlich für wolkenlose, halbbedeckte und bedeckte. Die dabei erhaltenen Werte sind in der Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7. Differenzen zwischen Maximum und dem darauffolgenden Minimum der Temperatur in Trier-Berg (Frühjahrsperiode 1931—37)

	wolkenlos (23 Nächte)	halbbedeckt (23 Nächte)	bedeckt (5 Nächte)
mittlere Amplitude . .	14,0	10,8	8,6
größte Amplitude . .	21,3	18,2	10,2
kleinste Amplitude . .	10,7	4,7	7,2
Streuung . . . . .	+ 7,3 / — 3,3	+ 7,4 / — 6,1	+ 1,6 / — 1,4

Eine Methode zur Vorausberechnung des Minimums, die derartig streuende Werte ergibt, ist selbstverständlich für die Praxis wertlos.

e) Die „Daily-temperature-range“-Methode.

Smith<sup>356)</sup> bestimmte aus halbmonatlichen Perioden die durchschnittliche, die größte und kleinste Temperaturschwankung der Lufttemperatur und benutzte diese Werte später je nach der Wetterlage zur Vorhersage, indem er die entsprechenden Beträge von dem Maximum abzog.

Diese Methode ist lediglich eine Variation der „Maximum-Minimum“-Methode und unterliegt der nämlichen Kritik.

Nach Ansicht von Ellison<sup>95)</sup> ist die „Post-median-hour“-Methode die genaueste, es folgen die „Median-hour“- und die „Pre-median-hour“-Methode. Die „Maximum-Minimum“-Methode ist am wenigsten zufriedenstellend. Die praktische Anwendung der Median-hour-Methoden ist jedoch dadurch stark eingeschränkt, daß die darauf begründeten Vorhersagen erst verhältnismäßig spät bekannt gegeben werden können.

### 3. Die Frostvorhersage auf Grund der Temperatur und des Wasserdampfgehaltes der Luft.

#### a) Die Kammermann'sche Vorhersage.

„Die Minimumtemperatur liegt über  $0^{\circ}$ , wenn der mittägliche oder noch besser der abendliche Taupunkt über  $0^{\circ}$  liegt, oder aber, was auf dasselbe hinausläuft, die absolute Feuchte mehr als 4,6 mm beträgt.“<sup>176)</sup> Die Regel ist für eine Vorhersage ziemlich bedeutungslos, da sie zu negativ gehalten ist und über den Wert des zu erwartenden Minimums überhaupt nichts aussagt.

Schubert<sup>347)</sup> hat 1915 noch einmal auf diese von Kammermann aufgestellte Regel zurückgegriffen. Zur Vorhersage von Maifrösten benutzte er die 14 Uhr-Beobachtungen; er trug die Psychrometer-Ablesungen für 19 Frostnächte in ein Koordinatennetz mit der Temperatur des trockenen Thermometers als Abszisse und der des feuchten Thermometers als Ordinate ein. Die dann eingetragenen Punkte ließen sich nach einer Seite durch eine Kurve begrenzen, so daß also alle Punkte auf eine Seite derselben zu liegen kamen. Lieferte nun die 14 Uhr-Beobachtung einen Punkt im Koordinatenfeld jenseits dieser Kurve, so dürfte man annehmen, daß sehr wahrscheinlich an dem betreffenden Ort ein Frost nicht eintreten werde.

Geiger<sup>121)</sup> hat diese Methode einer eingehenden Prüfung unterzogen. Er verwendete dazu Beobachtungen der Sternwarte Bamberg aus 88 Mainächten der Zeit 1879 bis 1923, in denen die Lufttemperatur unter  $+1,0^{\circ}$  sank; bei dieser Temperatur trat nämlich mit Sicherheit am Boden Frost auf. Auf Grund dieser Untersuchung beträgt die Wahrscheinlichkeit, daß die Temperatur während der Nacht nicht unter  $+1,0^{\circ}$  sinkt, sofern die 14 Uhr-Beobachtung einen Punkt jenseits der Kurve ergibt, 97 %. Geiger hat aber nun umgekehrt alle die Fälle aus den Tagebüchern ausgezählt, in denen die Beobachtungen am Mittag einen Punkt diesseits der Kurve ergaben und dabei festgestellt, daß nur in 13 % aller dieser Fälle auch tatsächlich eine Minimumtemperatur unter  $+1,0^{\circ}$  eintrat. Daraus geht einwandfrei hervor, daß man mit Hilfe dieser Methode zwar mit größter Wahrscheinlichkeit sagen kann, daß ein Nachtfrost nicht eintreten wird, man aber umgekehrt eine Vorhersage, daß Frost eintreten werde, nicht darauf gründen kann.

Infolge der eingehenden Prüfung der Kammermann'schen Methode durch Geiger haben wir auf eine eigene Nachprüfung verzichtet.

#### b) Die zweite Regel von Kammermann.

„Man erhält das Temperaturminimum der Nacht, wenn man von der am feuchten Thermometer zu einer bestimmten Zeit abgelesenen Temperatur einen konstanten Wert abzieht.“<sup>176)</sup>

Kieranowsky<sup>198, 199)</sup> hat diese Regel eingehend geprüft und dabei gefunden, daß die Fehler um 13 Uhr größer als um 21 Uhr waren. Unter Zugrundelegung eines Fehlers von  $\leq 2^{\circ}$  betrug die Treffsicherheit um 13 Uhr 64 %, um 21 Uhr 85,5 %, bei einem solchen von  $\leq 3^{\circ}$  84 % bzw. 94 %.

In den Vereinigten Staaten hat Keyser<sup>196, 197)</sup> die Vorhersage des nächtlichen Minimums mit Hilfe einer Ablesung am feuchten Thermometer um 17 Uhr versucht. Dague<sup>81)</sup> hat aber festgestellt, daß die Abweichung der Minimumtemperatur von der abendlichen Temperatur des feuchten Thermometers nicht konstant ist.

Bei der Anwendung der Kammermann'schen Regel auf die Station Trier-Berg ergab sich bei Benutzung der Beobachtungen des feuchten Thermometers von 21 Uhr 30 als Mittel aus allen Frostnächten im Frühjahr und Herbst der Periode 1931 bis 37 für die abzuziehende Konstante ein Wert von  $3,0^{\circ}$ . Die Treffsicherheit der Vorhersage bei der Annahme eines Fehlers von  $\leq 2^{\circ}$  betrug 87 %, war also etwas größer als die von Kieranowsky festgestellte. Die größten Abweichungen von dem erwähnten Mittelwert  $3,0^{\circ}$  erreichten  $+4,5^{\circ}$  bzw.  $-3,0^{\circ}$ . Desgleichen mußten auch wir feststellen, daß ein Vorverlegen des Ablesetermins des feuchten Thermometers auf 17 Uhr die Treffsicherheit der Prognose stark herabsetzt; für Trier-Berg betrug sie bei einer Fehlergrenze von  $\leq 2^{\circ}$  nur mehr 63 %. Die Streuung erreichte  $+5,3^{\circ}$  bzw.  $-3,2^{\circ}$ .

#### c) Die Formel von Ångström.

Ångström<sup>19)</sup> kam unter Zugrundelegen einer von Defant<sup>85)</sup> für die nächtliche Abkühlung entwickelten Formel zu der Gleichung:

$$T_{\min} = C_t t_t - C_i t_i - k$$

Darin bedeutet  $t_f$  die Temperatur des feuchten,  $t_t$  die des trocknen Thermometers;  $C_f$ ,  $C_t$  und  $k$  sind Konstanten. Diese Formel von Ångström setzt also voraus, daß die Defant'sche Gleichung der nächtlichen Abkühlung für die ganze Nacht Gültigkeit hat, was aber nach W. Schmidt<sup>339, 340</sup>) nicht zutrifft.

Die drei Konstanten  $C_f$ ,  $C_t$  und  $k$  werden empirisch aus einem möglichst umfangreichen Beobachtungsmaterial bestimmt. Für  $C_f$  fand Ångström nach Beobachtungen in Upsala Werte zwischen 0,91 und 1,12, für  $C_t$  zwischen 0,10 und 0,15.\*)

Ångström fand aus den Messungen zu Upsala (1915—1917) für  $k$  die Werte der Tabelle 8.

Tabelle 8. Werte der Konstanten  $k$ 

	heitere Tage		bewölkte Tage	
	April	Mai	April	Mai
13 h	6,0	5,1	3,5	4,4
15 h	6,4	5,8	3,4	4,2
17 h	5,8	5,5	3,1	3,6
19 h	4,3	4,1	2,5	2,5
21 h	2,6	2,3	1,3	1,5

Der Unterschied zwischen den Ablesungen des feuchten Thermometers und den Minimumtemperaturen ist also an heiteren Tagen um 15 Uhr am größten, von da ab wird er fortschreitend kleiner. An bewölkten Tagen nimmt er schon von 13 Uhr an stetig ab.

Des weiteren untersuchte Ångström<sup>19</sup>) die mit seiner Formel erzielbare Treffsicherheit in Abhängigkeit von der Beobachtungszeit, zu welcher er die Grundlagen zur Vorhersage gewann. Die Berechnung des Korrelationsfaktors und des wahrscheinlichen Fehlers ergab, daß die Genauigkeit nicht stetig zunimmt, je später die Beobachtungszeit liegt. Vielmehr besteht für den Nachmittag, also etwa für die Zeit zwischen 13 und 19 Uhr, ein relatives Minimum. Ångström führt diese Tatsache auf die stark turbulenten Störungen der Atmosphäre zu dieser Zeit zurück, wodurch die Augenblicksablesungen bei der dann bestehenden Luftunruhe größerer Zufälligkeit ausgesetzt sind.

Aus den Meßreihen und Vorhersagen von Upsala (April und Mai 1915 bis 1917) hat Ångström die Genauigkeit seiner Methode geprüft. Nach seiner Angabe beträgt die Sicherheit 89 %, wenn Fehler bis zu 3 % zugelassen sind.

Bei der Berechnung der Konstanten für Trier-Berg unter Zugrundelegen der Daten von wolkenlosen Frostnächten der Monate April und Mai der Jahre 1934—36 ergaben sich für die einzelnen Beobachtungszeiten die Werte der Tabelle 9.

Tabelle 9. Konstanten der Formel von Ångström für Trier-Berg

Zeit der Beobachtung	$C_f$	$C_t$	$k$
10 <sup>40</sup>	0,75	0,22	1,63
13 <sup>40</sup>	0,78	0,11	3,13
14 <sup>80</sup>	0,38	0,02	2,15

Mit Hilfe dieser Konstanten haben wir anschließend die Temperaturminima der Frühjahrsperioden 1931 bis 1933 berechnet und mit den tatsächlich eingetretenen verglichen. Dabei stellten wir fest, daß die berechneten Minima zwar meist um wenigstens zu hoch lagen, die Streuung der Einzelwerte sich jedoch in der Mehrzahl der Fälle innerhalb etwa  $+1,5^{\circ}$  hielt. Wir müssen aber besonders hervorheben, daß in Einzelfällen ganz beträchtliche Abweichungen vorkommen können; ergab doch das für die Nacht vom 29./30. III. 1931 berechnete Minimum  $+1,5^{\circ}$ , indes das tatsächlich eingetretene  $-5,1^{\circ}$  betrug.

Im großen und ganzen dürfte die von Ångström angeführte Treffsicherheit der Methode auch für Trier-Berg dieselbe sein.

#### d) Die Frostvorhersage nach der Taupunkt-Methode.

Unter der Annahme, daß im allgemeinen die Temperatur nicht unter den entsprechenden Taupunkt fallen könne, da der Luft nunmehr für jedes Gramm Niederschlagswasser die äquivalente Menge Kondensationswärme zugeführt werde, hat Humphreys<sup>166</sup>) die abendliche Taupunktsbestimmung direkt zur Angabe des zu erwartenden Minimums vorgeschlagen. Wie aber Smith<sup>356</sup>) schon 1914 feststellte, kann die Minimumtemperatur in Wirklich-

\*) Setzt man nun für  $C_f$  einen mittleren Wert von 1 und vernachlässigt ferner das Glied  $C_t t_t$ , da die Konstante  $C_t$  klein ist so kommt man zur zweiten Kammermannschen Regel.

keit weitgehend von ihm abweichen. So liege z. B. die Minimumtemperatur in Ohio meist höher als der Taupunkt, selbst in klaren ruhigen Nächten; in anderen Gegenden der Vereinigten Staaten sinke sie dagegen in Strahlungsnächten stets unter denselben. Smith hält daher die Methode der Taupunktsbestimmung zur Vorhersage der Minimumtemperatur für bedeutungslos. In der Tat kann man den von ihm veröffentlichten graphischen Darstellungen entnehmen, daß in El Paso, Texas, die Minimumtemperatur den Taupunkt einmal sogar um  $37^{\circ}\text{C}$  unterschritt; die relative Feuchte betrug allerdings an diesem Abend nur 2 %. Unterschiede von rund  $20^{\circ}\text{C}$  sind nicht selten. Diese Erscheinung des Unterschreitens des Taupunktes müssen wir uns so erklären, „daß der äußerst geringe Wasserdampfgehalt und die geringe ausscheidbare Wassermenge das Herabsinken der Temperatur bis tief unter den Taupunkt nicht merklich aufhalten können“.

Im Gegensatz zu diesen Gegenden darf unter Berücksichtigung der völlig anders gearteten Feuchteverhältnisse die Methode der Taupunktbestimmung zur Frostvorhersage für Mitteleuropa nicht von vornherein von der Hand gewiesen werden. Wir haben daher diese Methode gleichfalls einer Prüfung unterzogen und wollen im folgenden die wichtigsten Ergebnisse kurz wiedergeben.

Die Abbildung 13 a gibt die stündlich berechneten Werte des Taupunktes für die Station Trier-Berg vom 9./10. X. 1936 als Kurve wieder. Danach sinkt der Taupunkt vom Vormittag ab und die Kurve erreicht gegen Mittag ein Minimum, das recht breit ist. Erst gegen Abend steigen die Werte wieder an und erreichen ein sekundäres Maximum. Etwa von Mitternacht ab sinken die Werte erneut und bilden am Morgen ein zweites Minimum. Das tatsächliche Minimum der Lufttemperatur betrug in dieser Nacht  $-0,1^{\circ}$ . Zu seiner genauen Vorhersage auf Grund der Taupunktsbestimmung hätte man also dieselbe um 12 Uhr 40 oder zwischen 21 Uhr 30 und 0 Uhr 30 durchführen müssen. Die zu anderen Zeiten durchgeführten Taupunktsbestimmungen hätten sämtlich einen mehr oder weniger großen Fehler in der Vorhersage bedingt.

Wenn nun auch die Taupunktskurve im großen und ganzen in der eben beschriebenen Form meist wiederkehrt, so erscheint es dennoch als außerordentlich gefährlich, die dort angegebenen Zeiten etwa als konstant anzunehmen. Vor allem muß die Taupunktbestimmung zum mittäglichen Termin als bedenklich angesehen werden, da die Kurve gerade zu dieser Zeit besonders steil abzufallen pflegt, geringe Zeitunterschiede also große Unterschiede im Taupunkt bedingen.

Außerdem kommt es aber auch bisweilen vor, daß selbst das Minimum der Taupunktkurve am Nachmittag noch über der in der folgenden Nacht eintretenden Minimumtemperatur bleibt. Diese Erscheinung tritt vor allem an solchen Stationen auf, die im Laufe der Nacht in einen sich dann bildenden Kaltluftsee eintauchen. Als Beispiel geben wir die an der Station Avelsbach durchgeführten Messungen desselben Datums, 9./10. X. 1936, wieder (Abb. 13 b, 0,5 m Höhe).

Dieselbe Abbildung enthält auch noch den Verlauf des Taupunktes in etwa 13 m Höhe mitten über dem Talgrund. Der Unterschied zwischen den beiden Kurven ist außerordentlich groß. In Bodennähe ist das Kurvenminimum am Nachmittag nur angedeutet, in größerer Höhe dagegen sehr gut ausgeprägt. Wie schon erwähnt, bleibt der Taupunkt an der unteren Meßstelle weit über dem späteren Temperaturminimum, in 13 m Höhe wird der entsprechende Wert um etwa 12 Uhr 40 und später um 20 Uhr 40 und 2 Uhr 20 erreicht.

Der Vergleich des vorhandenen Beobachtungsmaterials zeigt, daß der tägliche Gang des Taupunktes durch die Lage der Meßstelle im Gelände wesentlich bedingt ist; und zwar ist es vor allem der Kurventeil des Mittags und Nachmittags, der starken Veränderungen unterliegt, also gerade derjenigen Zeit, die uns für eine rechtzeitige Frostwarnung als besonders wichtig erscheint. Während auf dem Grunde des Tales das mittägliche Minimum des Taupunktes nur schwach angedeutet ist und mit seinem niedrigsten Wert meist mehrere Grade über dem in der folgenden Nacht tatsächlich eingetretenen Temperaturminimum bleibt, prägt sich dasselbe mit zunehmender Höhe über dem Talgrund immer deutlicher aus. Hangstationen zeigen einen Taupunktverlauf, der etwa zwischen dem im Talgrund und dem in größeren Höhen liegt (Abb. 13 c).

Diese Ausführungen lassen erkennen, daß die mittägliche Taupunktbestimmung in Tallagen und Bodennähe, unter Umständen auch an Hangstationen, einen zu hohen Wert für das zu erwartende Minimum vermuten läßt; andere Hangstationen dagegen und Stationen in größerer Höhe über dem Talgrund ergeben zwar bei einer

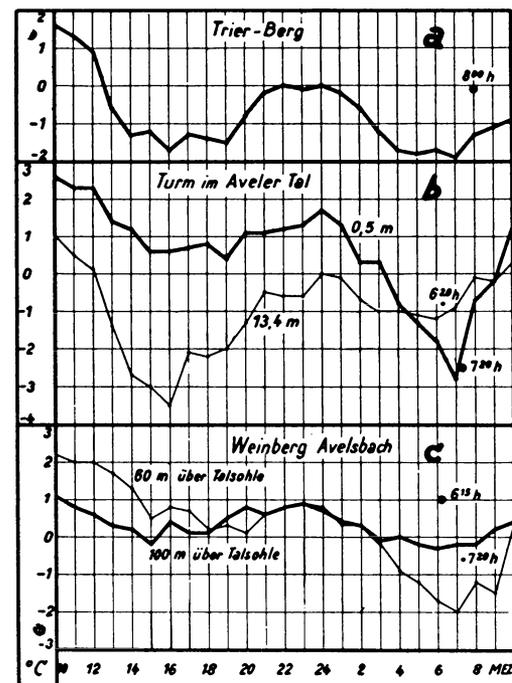


Abb. 13. Gang des Taupunktes an verschiedenen Meßstellen 9./10. Oktober 1936. Die Kreise bezeichnen Temperaturgrad und Eintrittszeit des Minimums.

zu bestimmter Zeit durchgeführten Taupunktbestimmung das tatsächliche Temperaturminimum der Nacht, jedoch kann dieser Zeitpunkt kaum als konstant angesehen werden, und der gerade hier besonders steile Kurvenabfall bedingt bei kleinen Zeitunterschieden verhältnismäßig große Unterschiede bezüglich des Taupunktes, das heißt der zu erwartenden Minimumtemperatur. Außerdem würde die Vorherbestimmung des Temperaturminimums für diese größeren Höhen eine Reduktion auf die bodennahe Luftschicht verlangen.

*e) Die in der Praxis gebräuchlichen Instrumente zur Bestimmung des Taupunkts.*

Erfahrungsgemäß weiß man, daß bei Erreichung des Taupunkts, d. h. der Temperatur, bei welcher die in der Luft vorhandene Wasserdampfmenge gerade Sättigungsmenge ist, der nächtliche Temperaturrückgang aufgehalten oder doch wenigstens stark abgebremst wird. Diese Beobachtung findet ihre Begründung darin, daß in dem Augenblick, in dem die Sättigung erreicht wird, Kondensation eintritt. Dabei werden erhebliche Wärmemengen als Kondensationswärme frei und zwar entweder bei der Beschlagsbildung an Pflanzen oder bei der Kondensation in der freien Luft, wobei sich Nebel und Wolken bilden. Wenn Nebelschwaden entstehen, bilden sie außerdem einen wirksamen Schutz gegen die abkühlende Wirkung der Ausstrahlung. In windstillen Nächten und in der Ebene entsprechen die tatsächlichen Verhältnisse weitgehend diesen Anschauungen (unter der Voraussetzung, daß keine Luftmassenveränderung eintritt). Bei Wind und in hängigem Gelände kommen indessen, wie auch alle unsere Versuche zeigen, erhebliche Abweichungen vor.

Zur Bestimmung des Taupunkts am Abend vor der fraglichen Nacht muß man den absoluten Wasserdampfgehalt der Luft durch Messung der Luftfeuchte ermitteln. Es gibt nur wenige Instrumente, sogenannte Taupunkt-Hygrometer, mit deren Hilfe man den Taupunkt direkt ablesen kann. Sie beruhen darauf, daß man eine blanke Metallfläche durch Verdunstung solange abkühlt, bis sich ein Beschlag bildet. Die in diesem Zeitpunkt abgelesene Temperatur des Meßkörpers ist dann der Taupunkt. Da diese Instrumente (nach Daniell, Regnault, Crova, Lambrecht, Bongards u. a.) aber schwer zu handhaben, von der Luftbewegung abhängig und daher auch ziemlich ungenau sind, finden sie heute in der Praxis kaum noch Verwendung, obwohl für wissenschaftliche Arbeiten wesentlich verbesserte Apparate herausgebracht wurden, so beispielsweise von Nippoldt, der den Beschlag auf der spiegelnden Oberfläche von Quecksilber beobachtet.

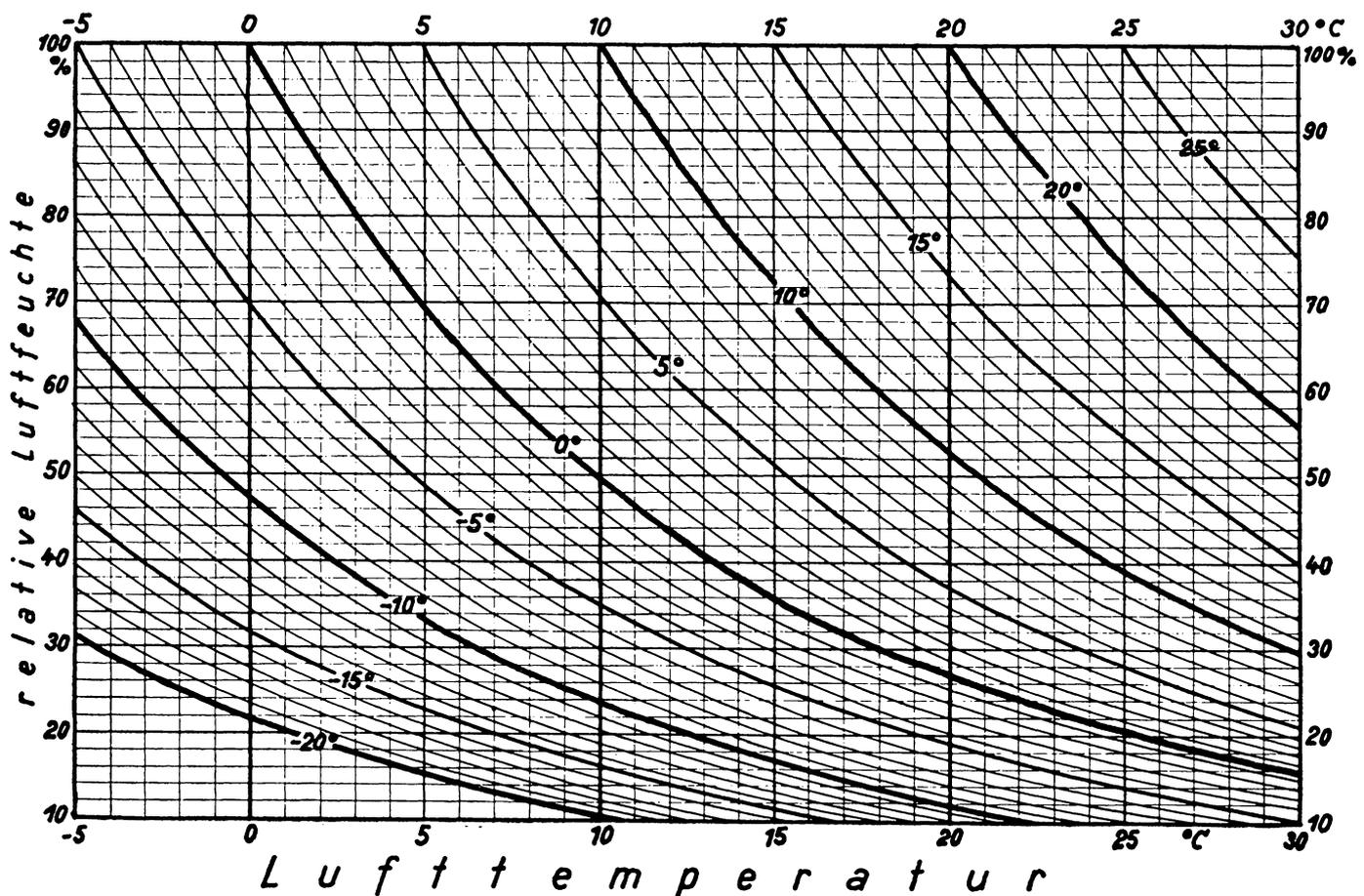


Abb. 14. Nomogramm zur Bestimmung des Taupunkts.

Sehr verbreitet sind die vor 100 Jahren in Gebrauch gekommenen Psychrometer. Sie bestehen im wesentlichen aus einem trocknen und einem feuchten Thermometer, welches letzteres mit Hilfe eines dünnen Musseline-läppchens an seinem Gefäß angefeuchtet wird. Ist die Luft verhältnismäßig trocken, so wird viel Wasser verdunstet und das Quecksilber im feuchten Thermometer auf eine verhältnismäßig tiefe Gleichgewichtstemperatur sinken; bei großer Luftfeuchte wird nur ein kleiner Temperaturunterschied zu beobachten sein. Aus der sogenannten „Psychrometrischen Differenz“ der beiden Thermometer läßt sich nach August der Wasserdampfgehalt der Luft berechnen, dem ein bestimmter Taupunkt entspricht.

Ein solches Psychrometer nach August ist in seinen Angaben von Wind und Strahlung abhängig. Deshalb muß, obwohl es in vielen Betrieben, besonders in Gärtnereien noch sehr verbreitet ist, von seiner Anwendung abgeraten werden. Praktisch zuverlässig sind nur die Aspirations-Psychrometer nach Aßmann, welche eine Vorrichtung besitzen, durch die fünf Minuten lang vor der Ablesung die Luft mit einer konstanten Mindestgeschwindigkeit von 2—3 m/sek an den gegen Strahlung geschützten Thermometern vorbeigesaugt wird.

Zur Ermittlung der Luftfeuchte aus den Ablesungen an beiden Thermometern dienen Tabellen und Kurventafeln. Bongards hat ein besonders einfaches und praktisches Nomogramm angegeben, auf dem ein Lineal an die auf zwei linearen Skalen befindlichen Temperaturpunkte angelegt wird, das dann auf einer dritten, leicht gekrümmten Feuchteskala den zugehörigen Feuchtwert in Prozenten angibt.

Wenn ein gutes Haarhygrometer zur Verfügung steht, das die Längenänderungen eines Haares oder mehrerer Haare in Harfenanordnung anzeigt, die durch Feuchteänderungen hervorgerufen werden, so läßt sich mit diesem und einem geeichten Thermometer, das so aufgestellt ist, daß es Lufttemperatur angibt, der Taupunkt meist hinreichend genau bestimmen. Freilich muß man dabei immer bedenken, daß Feuchtefehler von 5 %, die bei einem normalen Hygrometer vorkommen, bereits Taupunktfehler von 1—2° je nach Lage der abgelesenen Werte mit sich bringen. Für die Bestimmung des Taupunkts aus Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte gibt es wiederum verschiedene Nomogramme, die oft in Form von Uhren ausgeführt wurden, wie z. B. von W. Schmidt. Die Trierer Forschungsstelle hat ein Kurvendiagramm (Abb. 14) herausgebracht, das sich in zahlreichen praktischen Fällen bewährt hat.

Neuerdings sind auch registrierende Feuchtemesser von Fieß, Siemens, Hartmann und Braun und anderen Firmen ausgebildet worden, die mit Fernanzeiger versehen sind und die im Freien herrschende Luftfeuchte im Zimmer abzulesen und aufzuzeichnen gestatten. Wegen der hohen Anlagekosten dürften sie aber kaum in landwirtschaftlichen Betrieben zu allgemeiner Einführung gelangen.

#### f) Die Abweichung des Temperaturminimums vom Taupunkt.

Wir haben schon oben erwähnt, daß die Taupunktbestimmung als Frostvorhersage für die Gegenden der Vereinigten Staaten mit vorherrschend kontinentalen Luftmassen nicht in Betracht kommen kann, da das nächtliche Temperaturminimum dort vielfach außerordentlich tief unter den Taupunkt sinkt. Man hat daher in Amerika einige Methoden ausgearbeitet, die die Größe der Abweichung vom Taupunkt festlegen sollen.

Zu diesem Zweck bestimmte Smith<sup>360</sup>) den Unterschied zwischen abendlichem Taupunkt und gleichzeitiger Lufttemperatur und ferner den von der folgenden Minimumtemperatur und dem abendlichen Taupunkt. Er versuchte nun, eine Beziehung zwischen diesen beiden Werten festzustellen; wie es aber scheint, gestattet die Differenz Lufttemperatur-Taupunkt nur unter ganz bestimmten Verhältnissen einen Schluß auf die Lage des Minimums unter dem Taupunkt.

Nichols<sup>278</sup>) bildete einmal die Differenz zwischen Maximum der Lufttemperatur am Mittag und dem folgenden abendlichen Taupunkt und weiterhin die Differenz zwischen Maximum und Minimum der Lufttemperatur. Die jeweilige Minimumtemperatur wird aus der daraus abgeleiteten Beziehung berechnet.

#### g) Die hygrometrischen Formeln.

Allen sogenannten hygrometrischen Formeln liegt als Gedanke zugrunde, daß die zu erwartende Minimumtemperatur von dem abendlichen Taupunkt um einen Betrag abweicht, der von der relativen Feuchtigkeit abhängt. Es wird also der Unterschied zwischen Minimumtemperatur und abendlichem Taupunkt in Abhängigkeit von der relativen Feuchte gesucht und die sich ergebende Beziehung zur Vorhersage des Temperaturminimums benutzt.

Donnel hat schon 1910 unter der Leitung von Wells eine hygrometrische Formel linearer Funktion entwickelt, die jedoch in der Praxis nicht häufig Anwendung fand, da sie als ungenügend angesehen wurde; sie gibt nämlich nur in einem gewissen, eng begrenzten Bereich des Taupunktes und der relativen Feuchte gute Resultate. Später half sich Donnel dadurch, daß er für verschiedene Bereiche der relativen Feuchte verschiedene Geraden benutzte und so den tatsächlichen Verhältnissen besser gerecht zu werden versuchte.

Unter Heranziehen des vom Fruit-frost-service in Ohio gesammelten Beobachtungsmaterials hat auch Smith<sup>357)</sup> auf das wahrscheinliche Vorhandensein einer linearen Beziehung geschlossen und die folgende Formel aufgestellt:

$$y = a + bR,$$

worin  $y$  die Abweichung der nächtlichen Minimumtemperatur vom abendlichen Taupunkt,  $R$  die relative Feuchte darstellt;  $a$  und  $b$  sind Konstanten, die für jeden Ort aus längerdauernden Beobachtungen zu bestimmen sind.

Marvin<sup>233)</sup> hat gezeigt, daß diese Formel von Smith mit der von Donnel identisch ist.

Die lineare Beziehung zwischen  $y$  und  $R$  scheint nur in feuchteren Gegenden genügend erfüllt zu sein; in trockeneren Gegenden soll die Annahme einer parabolischen Beziehung bessere Resultate geben. Es gilt also nach Smith<sup>360)</sup>

$$y = a + bR + cR^2.$$

Wie die Erfahrung gezeigt hat, kann aber die Beziehung zwischen der Abweichung der Minimumtemperatur vom Taupunkt und der relativen Feuchte durch eine einfache mathematische Kurve meist nicht zufriedenstellend dargestellt werden. Deshalb kamen Nichols<sup>278)</sup> und Keyser<sup>196, 197)</sup> dazu, auf eine mathematische Formulierung zu verzichten und die „best-passende“ Kurve aus freier Hand zu zeichnen. Diese Freihandkurve kann dann ohne weitere Zuhilfenahme von mathematischen Methoden direkt zur Vorhersage verwendet werden. Die Freihandkurve von Nichols ähnelt bei geringer relativer Feuchte der Parabel von Smith, bei höherer mehr der Geraden von Donnel.

Beim Anwenden der Donnel'schen Formel für die Station Medford stellte auch Young<sup>414)</sup> fest, daß die erwähnten Beziehungen zum mindesten nicht durch eine gerade Linie darstellbar sind. Er folgerte nun so: die geforderte Beziehung kann nur durch eine unregelmäßige Kurve von einer bestimmten Gestalt wiedergegeben werden; die mathematische Formulierung derselben muß, sofern sie tatsächlich die passendste Kurve sein will, derart beschaffen sein, daß in keinem Fall Korrekturen auftreten. Andererseits zeigen die Beträge der Korrekturen, daß eine einfache Formel diese Forderung nicht erfüllen kann.

Wenn aber schon eine mathematische Formulierung gegeben werden soll, so ist es für die Praxis am zweckmäßigsten, eine möglichst einfache Formel zu wählen und an dieser die jeweiligen Korrekturen anzubringen.

Durch die Wahl der entsprechenden Korrekturen kann man aber jede beliebige Kurve zu der gewünschten „best-passenden“ umformen; man wählt also zweckmäßig die einfachste Gleichung, nämlich die der Geraden, deren Lage im Koordinatennetz jeweils von der Himmelsbedeckung zur Zeit der abendlichen Beobachtung abhängt. Die Benutzung der Gleichung einer bestimmten Geraden als Grundformel und das Anbringen von gewissen Korrekturen, die von den jeweils gegebenen Werten des Taupunktes und der relativen Feuchte am Abend abhängen, bilden die Idee der von Young ausgearbeiteten „method of arbitrary corrections“.

Ellison<sup>95)</sup> hält die Formeln, die auf der hygrometrischen Beziehung beruhen, für die brauchbarsten. Smith<sup>357)</sup> hat 28 auf Grund der Donnel-Smith'schen Formel abgegebenen Vorhersagen geprüft und festgestellt, daß 78 % derselben um höchstens 1,7° C von der tatsächlich eingetretenen Minimumtemperatur abweichen. Zieht man außerdem noch die von Young eingeführten Korrekturen heran, so gestatten die hygrometrischen Formeln sogar in gut 90 % der Fälle eine Berechnung der Minimumtemperatur auf 1,7° C genau.<sup>95)</sup>

Um die Anwendbarkeit der hygrometrischen Methoden für Mitteleuropa zu prüfen, haben wir nach amerikanischem Vorbild eine sogenannte Punktkarte<sup>95)</sup> entworfen, auf der die relative Feuchte als Abszisse, die Abweichungen des tatsächlichen Temperaturminimums vom mittäglichen Taupunkt als Ordinate aufgetragen sind (Abb. 15). Je nach dem Bewölkungszustand

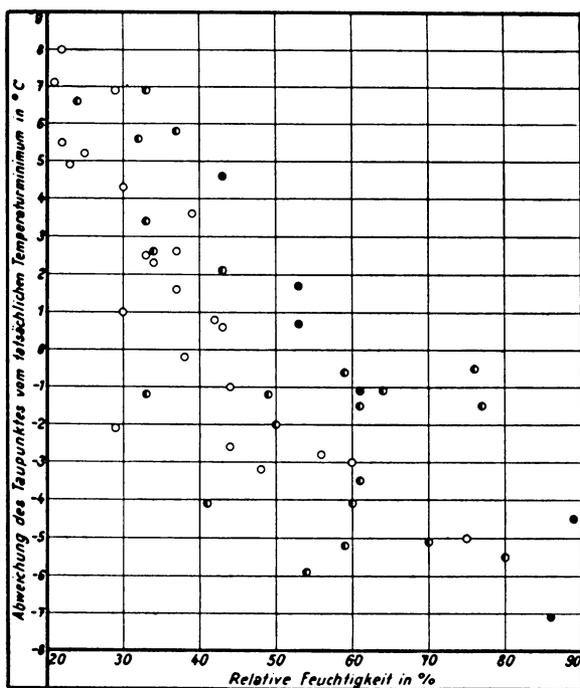


Abb. 15. Abweichung des Taupunktes vom tatsächlichen Temperaturminimum in Abhängigkeit von der relativen Feuchte. Nach 1430 h-Beobachtungen in Trier aus den Frühjahrsperioden 1931–37 (Minimum mindestens + 0,5°). Füllung der Kreise = mittl. Bewölkung zwischen 1430 u. 730 h.

wurden die die einzelnen Werte wiedergebenden kleinen Kreise gar nicht, zur Hälfte oder ganz ausgefüllt. Sicherlich läßt sich eine gewisse Beziehung zwischen Abweichung vom Taupunkt und relativer Feuchte nicht ganz ver-

kennen, jedoch ist die Streuung der einzelnen Werte derart groß, daß die Annahme irgendeiner bestimmten Funktion nicht zu rechtfertigen ist.

*h) Die Äquivalenttemperatur und das Prötmeter.*

Außer dem Taupunkt wird auch ein anderer Temperaturbegriff zur Durchbildung einer kurzfristigen Frostprognose herangezogen: die Äquivalenttemperatur. Dieser Begriff wurde von v. Bezold<sup>56)</sup> geprägt und von Knoche<sup>206)</sup> weiter entwickelt. Eine besonders anschauliche Darstellung der hierbei in Betracht kommenden Zusammenhänge hat Linke<sup>221)</sup> gegeben, der auch im einzelnen auf die praktische Anwendbarkeit der Methode hingewiesen hat.

Die Äquivalenttemperatur ist ein Maß für den Wärmegehalt der Luft. Dieser hängt ab von der jeweils herrschenden Temperatur und der in der Volumeneinheit vorhandenen Wasserdampfmenge. Bezeichnet man den Wärmegehalt eines Kubikmeters feuchter Luft mit  $W$ , die Lufttemperatur mit  $T$  (in absoluten Einheiten) und die absolute Feuchte mit  $f$ , so ist unter der Voraussetzung konstanten Druckes

$$W = c_p \cdot \rho \cdot T + r \cdot f \quad \text{kcal.}$$

Hierin bedeutet  $c_p$  die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck,  $\rho$  die Dichte der Luft und  $r$  die Verdampfungswärme des Wassers.

Will man hieraus die Temperatur berechnen, welche die Luft annähme, wenn die an den vorhandenen Wasserdampf gebundene Wärme frei würde, so muß man die Gleichung durch  $c_p \cdot \rho$  dividieren. Man erhält dann unter Umrechnung der Temperaturen auf den Gefrierpunkt als Nullpunkt die Äquivalenttemperatur

$$A = t + k \cdot f$$

in Celsiusgraden. Der Faktor  $k$  ergibt sich für mittleren Luftdruck und Lufttemperaturen um  $0^\circ$  zu 2,0 und erfährt im übrigen auch bei höheren Temperaturen nur geringe Abweichungen von diesem Wert, so daß er mit den gemachten Vorbehalten als Konstante angesprochen werden kann.

Zu einer analog gebauten Gleichung gelangt man für die Temperatur des feuchten Thermometers, wenn man von der Sprung'schen Aspirations-Psychrometerformel

$$f = F' - 0,5 (t - t') \frac{b}{755}$$

ausgeht.  $t'$  ist die am aspirierten feuchten Thermometer abgelesene Temperatur und  $F'$  der zu dieser Temperatur  $t'$  gehörige maximale Wasserdampfgehalt (Sättigungsmenge) der Luft.  $b$  bedeutet den jeweiligen Luftdruck. Wieder erhält man mit großer Näherung für mittleren Luftdruck und unter Vernachlässigung der durch die Erwärmung bewirkten geringen Ausdehnung

$$A = t' + k \cdot F',$$

worin  $k$  gleich 2,0 gesetzt werden kann. Diese Formel hat den Vorzug, daß sie im Gegensatz zur ersten nur noch ein Bestimmungsstück für die Äquivalenttemperatur  $A$  enthält, nämlich  $t'$ . Denn die andere Variable  $F'$  ist mit  $t'$  zwangsläufig gekoppelt. Es ergibt sich also, daß die Ablesung am feuchten Thermometer zur Beurteilung des Wärmegehalts der Luft allein ausreicht.

Diese einfache Beziehung hat Prött, Fabrikant von Befeuchtungsanlagen für Fabrikräume und Sanatorien in Rheidt, schon vor mehr als 20 Jahren empirisch gefunden und seinem Prötmeter zugrunde gelegt. Das Instrument besteht im wesentlichen aus einem feuchten Thermometer, dem neben der Temperaturskala noch eine Pröttkala beigegeben ist, deren Werte sich nach der Formel

$$P = t' + 2 F' = t + 2 f$$

berechnen. Unter der Voraussetzung genügender Aspiration lassen sich also am Prött-Thermometer mit großer Annäherung direkt Äquivalenttemperaturen ablesen.

Nun läßt sich aus der Prött-Temperatur eine einfache Regel herleiten, die zur Frostvorhersage verwendet werden kann. In windstillen und wolkenlosen Nächten mit starker Ausstrahlung tritt im allgemeinen kein Nachtfrost ein, wenn die absolute Luftfeuchte größer ist als der maximale Feuchtegehalt bei  $0^\circ$ . Dieser beträgt  $4,9 \text{ g/m}^3$ . Aus der umgewandelten Formel für die Prött-Temperatur

$$P - t = 2 f$$

ergibt sich dann für den hier ins Auge gefaßten Fall die Forderung

$$P - t > 9,8$$

für Frostfreiheit.

An Hand der Tabelle 10 soll die Brauchbarkeit dieser Methode beispielsweise für die ersten Hälften des Monats Mai 1935 und Oktober 1936 am Beobachtungsort Trier (200 m Meereshöhe) nachgewiesen werden.

Legen wir der Vorhersage zunächst die Ablesungen von 17 Uhr zugrunde, so sehen wir, daß im Mai 1935 die drei Frostnächte am 1., 2. und 13. alle richtig angezeigt wurden. Außer diesen hätten aber nach Angabe des Prötmeters auch noch die sechs Nächte nach dem 3., 4., 9., 12., 14. und 15. Frost haben müssen. Zur weiteren Untersuchung dieser Fälle sind in den Tabellen noch die zur Zeit des jeweiligen Sonnenuntergangs herrschenden Temperaturen notiert. Danach war am Abend des 3., 4. und 15. ein außergewöhnlich starkes Anwachsen der Größe  $P - t$  bis weit über die kritische Grenze 9,8 eingetreten. Am 9. und 15. bedeckte sich der Himmel zudem vollständig mit Wolken. Der 12. stellt mit  $P - t = 9,4$  einen Grenzfall dar, der immerhin noch eine Temperatur von  $+1,4$  in Gefrierpunktsnähe brachte. Am 14. kam mit einem Windsprung eine Luftmassenversetzung zustande, die bei fast allen Fehlprognosen für ein Versagen der Methode verantwortlich zu machen ist.

Im Gegensatz zu der unruhigen Wetterentwicklung im Mai 1935 zeichnet sich der Oktober 1936 durch eine stabile Wetterlage aus, die fast die ganze erste Hälfte des Monats beherrschte. Dementsprechend erhöht sich auch die Treffsicherheit der Prött-Vorhersage. Von den neun Frostnächten sind acht sicher vorhergesagt worden. Die einzige Fehlprognose fand am 2. statt, als bei einem plötzlichen Windsprung von SW auf NO mit dem Eintreffen einer arktischen Luftmasse die beständige Kaltwetterlage eingeleitet wurde.

Man kann also die Pröttmethode in höherem Maße als alle anderen als praktisch brauchbar ansprechen. Freilich darf auch hier die Großwetterlage nicht außer acht gelassen werden, wenn man vor Enttäuschungen bewahrt bleiben will!

Tabelle 10. Prött-Temperatur und Lufttemperatur in Trier (200 m)  
1.—15. Mai 1935 und 1.—15. Oktober 1936

Tag	1 9 3 5				1 9 3 6										
	Prött-Temp. P		Lufttemp. t		P - t		Minimum in folg. Nacht	Tag	Prött-Temp. P		Lufttemp. t		P - t		Minimum in folg. Nacht
17 Uhr	SonnU.	17 Uhr	SonnU.	17 Uhr	SonnU.	17 Uhr			SonnU.	17 Uhr	SonnU.	17 Uhr	SonnU.	17 Uhr	
Mai								Okt.							
1.	18,1	16,0	9,1	7,6	9,0	8,4	-1,5	1.	28,0	27,5	12,4	12,0	15,6	15,5	3,0
2.	21,6	23,0	14,8	13,5	6,8	9,5	-1,0	2.	20,6	16,9	8,7	5,3	11,9	11,8	-1,5
3.	26,9	28,9	19,5	17,1	7,4	11,8	2,5	3.	19,2	17,1	11,1	8,6	8,1	8,5	-1,5
4.	33,0	31,8	23,3	17,6	9,7	14,2	6,7	4.	29,1	25,1	16,6	12,9	12,1	12,2	2,0
5.	33,5	38,7	21,4	20,8	12,1	17,9	6,5	5.	17,1	14,3	9,2	6,9	7,9	7,4	-1,5
6.	38,5	35,7	25,0	19,6	13,5	16,1	8,1	6.	14,2	12,9	5,6	4,9	8,6	8,0	-0,4
7.	32,1	24,9	18,1	12,4	14,0	12,5	8,0	7.	12,9	12,5	5,2	4,7	7,7	7,8	-0,2
8.	24,7	22,0	10,8	9,0	13,9	13,0	5,0	8.	15,5	15,2	6,7	6,1	8,8	9,1	-0,4
9.	25,6	25,7	16,9	14,2	8,7	11,5	6,5	9.	16,0	14,6	7,3	6,4	8,7	8,2	-0,2
10.	36,5	35,2	22,9	19,0	13,6	16,2	8,7	10.	15,3	15,2	6,8	6,3	8,5	8,9	-1,0
11.	31,9	27,8	21,6	16,2	10,3	11,6	7,3	11.	15,5	14,2	8,3	6,9	7,2	7,3	-4,3
12.	23,1	19,6	13,8	10,2	9,8	9,4	1,4	12.	22,4	22,0	10,6	9,9	11,8	12,1	4,9
13.	19,6	16,4	12,5	9,1	7,1	7,3	-0,6	13.	24,7	24,7	11,7	10,8	13,0	13,9	6,6
14.	22,2	21,6	14,9	12,2	7,3	9,4	6,0	14.	24,1	23,4	12,1	10,6	12,0	12,8	8,0
15.	17,7	15,8	8,8	4,7	8,9	11,1	4,2	15.	31,6	31,4	12,8	12,3	18,8	19,1	11,9

#### 4. Die Frostvorhersage auf Grund des Wärmenachschubes vom Boden.

Franklin<sup>110)</sup> geht davon aus, daß die Temperatur der Erdoberfläche für das Auftreten von Frost maßgebend ist. Für die Vorhersage berücksichtigt er den Wärmenachschub, indem er die tägliche Schwankung der Bodentemperatur an der Oberfläche und in 10 cm Tiefe beobachtet; Ausstrahlung und Verdunstung finden durch das Einführen der zu erwartenden relativen Feuchte während der Nacht Berücksichtigung.

Zwar bezeichnet W. Schmidt<sup>341)</sup> die theoretischen Grundlagen für die von Franklin aufgestellte Formel als wohl nicht einwandfrei. Trotzdem soll sie aber für klare, windstille Nächte recht gute Resultate zeitigen; störend wirken jedoch die beim Gefrieren des Wassers am Boden frei werdende Wärme, der Ausstrahlungsschutz durch Bewölkung, Wind und eventuell auftretende Niederschläge. Die Formel ist also nur bei ganz bestimmten Wetterlagen anwendbar.

#### C. Die Versuche zur Frostvorhersage unter Berücksichtigung dynamischer Änderungen.

##### 1. Die Berechnungsversuche der dynamischen Änderungen.

Die dynamisch bedingten Änderungen der Lufttemperatur beeinflussen das nächtliche Minimum indirekt und direkt.

Indirekt dadurch, daß die Änderung der Wetterlage die Grundbedingungen für die statische Abkühlung

ändert (Änderung der Ausstrahlung durch Änderung des Wasserdampfgehaltes der Luft und der Bewölkung, Änderung des Wärmenachschubs vom Boden her durch Niederschläge usw.).

Direkt durch den Antransport von Luftmassen anderer Temperatur; dabei kann die Änderung kontinuierlich sein, meist jedoch ist sie an den Vorübergang von Diskontinuitätsflächen geknüpft.

Dynamisch bedingte, kontinuierlich ablaufende Temperaturänderungen können durch die Methode der korrespondierenden Temperaturen festgestellt werden. Der normale tägliche Temperaturgang ist ja derart gestaltet, daß eine bestimmte Temperatur am Vormittag zu einer ganz bestimmten Zeit am Nachmittag wiederkehrt. Bei einer langsamen dynamischen Abkühlung tritt diese Temperatur früher als sonst, im umgekehrten Fall später als gewöhnlich ein.

Der Durchzug einer Diskontinuitätsfläche ist ein Problem der allgemeinen Wettervorhersage auf Grund der Wetterkarte.

Wir hatten eingangs darauf hingewiesen, daß die Formeln zur Berechnung der statischen Abkühlung fast durchweg auf Beobachtungsmaterial fußen, das in größeren Höhen über der Beobachtungsfläche und außerdem in Hütten gewonnen wurde. Die Beobachtungen aus der bodennahen Luftschicht wurden bisher noch nicht zum Aufstellen von Formeln benutzt. Es bleibt also, sofern man die mit Hilfe der Formeln berechnete Minimumtemperatur auf die bodennahe Luftschicht übertragen will, noch übrig, an den berechneten Werten dementsprechende Korrekturen anzubringen. Im allgemeinen nimmt nun Stärke und Häufigkeit des Frostes mit Annäherung an den Boden zu<sup>350</sup>); jedoch hat Geiger<sup>120</sup>) deutlich gezeigt, daß „der Betrag dieser Zunahme örtlich außerordentlich verschieden ist“. Diese „örtliche Korrektur“ unter Zuhilfenahme eines mittleren Temperaturunterschiedes bringt aber wiederum eine vermehrte Unsicherheit in der Vorhersage mit sich.

## 2. Die Vorhersage der Wetterwarten.

Wir ersehen aus den vielfältigen Verfahren zur Berechnung eines eintretenden Frostes bzw. des nächtlichen Minimums und aus der Beurteilung, die sie bei kritischer Beobachtung erfahren, daß ohne Berücksichtigung zwischenzeitlich eintretender dynamischer Veränderungen alle Bemühungen, auf dem Wege der statischen Abkühlung zum Ziele zu kommen, in der Praxis erfolglos bleiben. Es wird auch nie gelingen, die dynamische Änderung durch Berechnung zu erfassen.

Diese dynamischen Änderungen der Wetterbedingungen, welche ausschlaggebend für das nächtliche Minimum sind, sind letzten Endes in ihrer Grundursache nichts anderes als Luftmassenänderungen. Es hat keinen Wert, eine noch so genaue mathematische Errechnung der statischen Abkühlung zu machen und umfassendes statistisches Material heranzuziehen, wie sich die Rechenergebnisse unter Berücksichtigung aller Faktoren praktisch bewähren, wenn zur Zeit des Eintritts des nächtlichen Minimums eine ganz andere Luftmasse wetterwirksam ist als diejenige, in welcher die Messung gemacht wurde. Welche Luftmassenveränderung eintreten wird, läßt sich aber nur in den seltensten Fällen vom Ort aus beurteilen. Möglicherweise kann man gelegentlich aus Zugrichtung, Zuggeschwindigkeit und Wolkenart abschätzen, ob und in welcher Hinsicht eine Luftmassenänderung eintreten wird. Das Höchstmaß an Sicherheit erzielt in dieser Hinsicht jedoch nur der Meteorologe an einer Wetterwarte, der das Wetterkartenbild und die Änderung der Wetterlage ständig vor Augen hat.

Mit den heutigen Hilfsmitteln der synoptischen Meteorologie kann man das Wandern der Luftmassen und die Veränderung, die sie dabei durch die Unterlage und durch das Auftreffen auf Luftmassen mit anderen Eigenschaften erleiden, mit recht großer Sicherheit voraussagen. So ist es heute praktisch kaum mehr möglich, den drohenden Einbruch arktischer Luftmassen in unserer Gegend zu übersehen. Diese Einbrüche sind die Grundursache der Früh- und Spätfröste bei uns, da sogenannte „Strahlungsfröste“ ohne vorhergehende Advektion arktischer Luft während der Vegetationszeit nicht vorkommen.

Mit dieser sehr sicheren Voraussage der Luftmassenänderung durch die Wetterwarten in Verbindung mit der heutigen schnellen Verbreitung der Wetternachrichten durch den Rundfunk entfällt aber die Notwendigkeit der örtlichen Vorhersage fast gänzlich. In West- und Süddeutschland verbreiten von Anfang April bis Anfang Juni, je nach dem Entwicklungsstand der Vegetation und damit der Möglichkeit des Eintritts von Frostschäden, die Rundfunksender zwei- bis dreimal täglich den „Frostwarnungsdienst für Wein- und Obstbau“. Er enthält nur drei Aussagen: 1. Es besteht keine Frostgefahr, 2. Es besteht in besonders gefährdeten Gebieten Frostgefahr, 3. Es besteht allgemeine Frostgefahr.

Diese Vorhersage gründet sich auf eine Schätzung, welche Luftmasse nachts wetterwirksam sein wird und wie das Gelände auf sie einwirkt. Eine Luftmasse arktisch-maritimen Ursprungs kann beispielsweise Frostgefahr mitbringen, doch ist die Auswirkung je nach der Lage der gefährdeten Stelle zum Gebirge grundverschieden. Stößt diese Luftmasse z. B. auf ein Gebirge, so ruft sie auf der Luvseite Wolkenstau hervor, in dessen Schutz keine starke Ausstrahlung und daher kein Frost auftreten kann. Auf der Leeseite des Gebirges wird dagegen die

Wolkendecke fehlen und starke Ausstrahlung und Abkühlung der bodennahen Luftschicht eintreten, da arktische Luft geringe Trübung und gute Durchlässigkeit für Strahlung zeigt.

In dieser Tatsache der Verschiedenartigkeit der Auswirkung derselben Luftmasse auf das nächtliche Minimum als Folge der Veränderung durch Geländehindernisse liegt die eine Unsicherheit der Zentralvorhersage. Die andere liegt darin, daß sich gerade in gebirgigem Gelände Reste alter Luftmassen in Tallagen halten können, die unter Umständen trotz des Einsatzbeginns der neuen Luftmasse noch teilweise wetterwirksam bleiben.

#### D. Die Verbindung der Zentralvorhersage mit örtlicher Beobachtung.

##### 1. Die Bestimmung der wetterwirksamen Luftmassen.

Wie wir festgestellt haben, ist Eintritt und Tiefe des nächtlichen Minimums davon abhängig, welche Luftmassen nachts wetterwirksam sind. Hierzu kann sich die Wetterwarte zunächst auf die synoptischen Bodenbeobachtungen stützen, welche in den meisten Fällen bereits die Luftmassenabgrenzungen am Boden erkennen lassen. Dies gilt besonders für das Vorrücken arktischer Kaltluftmassen, welches am Boden erfolgt. Da aber bei der Praxis nicht nur ein Interesse an der Vorhersage besteht, ob Frost droht, sondern auch daran, ob keine Frostgefahr besteht, ist auch das Verdrängen arktischer Luftmassen durch Luftmassen aus gemäßigten oder subtropischen Breiten sehr wesentlich. Diese Veränderung ist jedoch nur in seltenen Fällen schon im Bild der Bodenbeobachtungsstationen zu erkennen. Der Vorstoß der Warmluftmassen eilt normalerweise in der Höhe voraus. Es sind daher in verstärktem Maße für die Vorhersage des nächtlichen Minimums die Höhengaufstiege heranzuziehen, um Klarheit über die Wetterwirksamkeit der Großluftmassen zu schaffen.

Inwieweit die Geländehindernisse nunmehr eine Rolle spielen, z. B. in Bezug auf Stau oder Aufklaren, ist eine Frage der Erfahrung des geländekundigen Meteorologen innerhalb seines Dienstbezirks. Er hat jedoch in einer Hinsicht mit einem Unsicherheitsfaktor zu rechnen, nämlich in der Abschätzung noch vorhandener Restluftmassen in den Tälern. Häufig sind diese Luftmassen nur von geringer Mächtigkeit und nicht wetterwirksam. Manchmal jedoch reichen sie auch, wie unsere Erfahrungen zeigen, aus, die sicherste Prognose über den Haufen zu werfen. Der umgekehrte Fall ist häufig, daß eine örtliche Beobachtung, z. B. eine Taupunktmessung, in dem alten Restluftkörper gemacht wird, während bereits in der Höhe ein neuer Großluftkörper anderen Ursprungs eingedrungen ist.

Bei den Bodenbeobachtungen wird der Schluß, welcher Art die vorhandene Luftmasse ist, vorwiegend aus ihrer Temperatur und ihrer Feuchte gezogen. Die Messungen der Bodenbeobachtungsstationen können aber, zumal in gebirgigem Gelände, täuschen. Anders wäre es, wenn ein handliches Frostwarngerät gebaut würde, wie es Keßler und Albrecht versucht haben. Es handelt sich dabei darum, ein Gerät zu bauen, welches einmal die Stärke der effektiven Ausstrahlung sofort ablesen läßt und zweitens, etwa durch die Stellung eines Zeigers, erkennen läßt, ob infolge der Intensität der effektiven Ausstrahlung mit einer so starken Abkühlung der bodennahen Luftschicht zu rechnen ist, daß das Minimum unter  $0^{\circ}$  liegen wird. Leider konnte dieses Gerät bisher noch nicht fertiggestellt werden. Es hätte den Vorzug gegenüber den bisher üblichen Meßmethoden, daß man erstens nicht mehr indirekt aus Temperatur und Feuchte auf die wahre Abkühlung schließen muß, sondern den Hauptfaktor selbst, nämlich die effektive Ausstrahlung, bereits am Nachmittag feststellen kann. Dieses Verfahren hat zweitens den Vorzug, daß man die effektive Ausstrahlung in der gesamten wetterwirksamen Luftmasse erfaßt, im Gegensatz zur Temperatur- und Feuchtemessung an der Bodenstation, welche uns nur über die Zusammensetzung der Luftmasse in den untersten Schichten eine Aussage machen kann.

Die Wetterwarten, an denen keine Geräte zur Messung der effektiven Ausstrahlung zur Verfügung stehen, könnten den Versuch machen, auf dem umgekehrten Wege, nämlich aus der Bestimmung der Intensität der Einstrahlung auf die Intensität der zu erwartenden nächtlichen Ausstrahlung und damit des zu erwartenden nächtlichen Minimums Rückschlüsse zu ziehen.

##### 2. Die Einrichtung von Stationsnetzen.

Eine Wetterwarte ohne ein Stationsnetz in ihrem Dienstbereich, dessen Meldeergebnisse mehrmals täglich eingehen, ist eine heute überholte Einrichtung. Erst wenn der mit der Vorhersage betraute Meteorologe die Auswirkung jeder Wetterlage in den verschiedensten Teilen seines Dienstbezirks erfahrungsgemäß kennen gelernt hat, kann seine Vorhersage verbessert werden. Nur dann ist sie nicht mehr allgemein gehalten, sondern kann auch Einzelheiten berücksichtigen. Das bisher vorhandene Stationsnetz der Wetterwarten, das ständig meldet, ist jedoch zunächst aus dem Gesichtspunkt der Flugsicherung aufgebaut. Diejenigen Wetterwarten, in deren Bezirk die Frostvorhersage eine große Rolle spielt, weil dort bereits Frostschutzeinrichtungen vorhanden sind, mit denen Millionenwerte gerettet werden können, müssen auch über ein Stationsnetz verfügen, das ihnen aus den besonders frost-

gefährdeten Gebieten Meldungen abgibt. Wichtig sind hierbei Meldungen über Temperatur und Feuchte zu einer bestimmten Stunde am Nachmittag und über die Tiefe des nächtlichen Minimums. Dabei ist jedoch nicht nur wünschenswert zu wissen, welches Minimum in 2 m Höhe in der Wetterhütte eintrat, sondern auch, wie tief die Temperatur unmittelbar am Boden sank. Unseres Wissens hat in Deutschland außer der Forschungsstelle Trier nur die Wetterwarte Hamburg ein solches Stationsnetz aufgezogen, welches jahrelang in den Obstbaugebieten der Unterelbe gearbeitet hat. Über die praktischen Erfahrungen dabei berichtet Bender<sup>50-52)</sup> unter Beigabe von Übersichtskarten usw.

### 3. Die Alarmthermometer.

Der augenblickliche Stand der Frostwarnung ist der, daß die Zentralvoraussage infolge der Verbesserung des synoptischen Dienstes und der Nachrichtenübermittlung sehr große Fortschritte gemacht hat. Trotzdem sind auch hier noch, wie soeben ausgeführt, Verbesserungen möglich. Die örtliche Frostvorhersage hat dagegen keine besonderen Fortschritte gemacht. Wenn auch die Prötmethode oder das Verfahren, am Nachmittag die Stärke der effektiven Ausstrahlung zu bestimmen, eine Verbesserung darstellen, so sind doch auch diese auf örtlichen Voraussagen beruhenden Verfahren nur in Verbindung mit der Erkenntnis der dynamischen Veränderungen, insbesondere der Luftmassenversetzung, wirklich brauchbar. Es gibt augenblicklich keine Frostwarngeräte, und der Praxis muß ausdrücklich abgeraten werden, sich nur auf die Angabe solcher Geräte ohne Berücksichtigung der Vorhersagen der Wetterwarten zu stützen.

Auf der anderen Seite ist auch die Vorhersage der Wetterwarten für sich allein letzten Endes unbrauchbar, weil auf kleinstem Raum lokalklimatische Unterschiede von beachtlichem Ausmaß auftreten können. Wir erinnern dabei besonders an die Mitteilungen von Geiger über die Frosthäufigkeit und Stärke im Anzingerforst gegenüber den Messungen der Stadt München und fügen hier ein ähnliches Beispiel an: Die in Trier-Ost in einem großen Garten freigelegene Wetterstation Trier zeigte im März 1937 zwei Frostnächte, die Station im Weinberg der Weinbaudomäne Avelsbach, etwa 800 m Luftlinie davon entfernt, meldete 17 Frostnächte und die auf der Talsohle unterhalb des Weinbergs errichtete Station nicht weniger als 22. Ebenso war die Intensität der Fröste in hohem Maße verschieden. Während die Station in Trier als tiefstes Minimum  $-2,8^{\circ}$  hatte, hatte die Station Avelsbach  $-4,2^{\circ}$  und die auf der Talsohle in der gleichen Nacht  $-7,5^{\circ}$ .

Es wäre eine unsinnige Forderung, wollte man verlangen, daß sich die Vorhersage in Zukunft auch auf kleinste Gebiete erstreckte. Es ist unmöglich, derart in die Einzelheiten einzudringen, um auch nur in einem kleinen Gebiet präzisierte Vorhersagen über die Tiefe des nächtlichen Minimums in Bodennähe zu machen.

Der Praktiker kann nur durch eigene Beobachtungen feststellen, ob und wann der kritische Temperaturgrad erreicht wird, der ihn veranlaßt, seine Frostabwehr in Gang zu setzen. Er bedient sich dazu zweckmäßig frei aufgestellter Minimumthermometer, die an der Stelle stehen, an der er Frostschäden verhüten will, und die in Höhe seiner Pflanzen angebracht sind. Diese erst können ihm sagen, ob und wann er mit der Frostschadenverhütung beginnen muß.

Um nun die ständige nächtliche Überwachung der Geräte in einer Frostnacht zu vermeiden, kann man sich auch einer Alarmeinrichtung bedienen, welche durch temperaturempfindliche Geräte in Gang gesetzt wird. Man nennt diese Geräte, welche man auf eine Temperatur in der Nähe des Gefrierpunktes einstellt, so daß sie bei Erreichen dieser Temperatur Alarm geben, Alarmthermometer im Gegensatz zu Frostwarngeräten, die der Vorhersage dienen sollen, und die es bekanntlich augenblicklich noch nicht gibt.

Das einfachste Alarmgerät besteht aus einem Quecksilberthermometer, in dessen Kapillare zwei Kontakte eingeschmolzen sind. Der eine Kontakt führt den elektrischen Strom einer kleinen Batterie dem Quecksilbergefäß zu, während der andere Kontakt an der Stelle der Skala angebracht ist, bei welcher Temperatur im allgemeinen mit der Annäherung der Gefahr zu rechnen ist. In den meisten Fällen wird hierbei eine Temperatur von  $+1^{\circ}$  gewählt, doch läßt sich hierfür keine allgemeingültige Regel aufstellen. Die Festlegung eines solchen Temperaturpunktes ist nicht nur von der Örtlichkeit und dem Bodenabstand, sondern auch davon abhängig, ob das Thermometer frei exponiert oder mit einem Schirm gegen Ausstrahlung geschützt wird.

An solchen Geländestellen, an denen wegen hereinbrechender Kaltluft mit einem schnellen Temperaturrückgang gerechnet werden muß, ist das Alarmthermometer auf eine höhere Temperatur (etwa  $+2^{\circ}$ ) einzustellen, damit die Dauerablesungen und die letzten Vorbereitungen zur Frostschadenverhütung rechtzeitig begonnen werden können. Auch bei einem geschützten Thermometer, das etwa in einer Wetterhütte untergebracht ist, muß eine höhere Alarmtemperatur vorgesehen werden, da sich die Pflanzenteile gegenüber Luft wesentlich unterkühlen können, und weil sich das Thermometer in der Hütte nicht in Pflanzennähe, sondern in einer meist wärmeren Luftschicht mit größerem Bodenabstand befindet.

Der Nachteil eines einfachen Kontaktthermometers besteht in zwei Dingen: 1. reagiert ein solches Thermo-

meter stets nur auf eine bestimmte Temperatur, die bei Lieferung ausgemacht ist; 2. schaltet das Thermometer bei Abkühlung unter den Kontaktpunkt den Strom aus, so daß das Instrument vor dem Alarm stets unter Strom steht, während zur Betätigung einer Alarmvorrichtung ein besonderer zweiter Stromkreis geschlossen werden muß.

Eine Verbesserung dieses Thermometers stellt das in Abbildung 16, I gezeigte „Voltex-Thermometer“ dar. Ihm haftet zwar auch noch der Nachteil an, daß der Strom bei Erreichung des Alarmpunktes ausgeschaltet wird, so daß zur Betätigung des Warnsignals ein Relais benötigt wird. Es ermöglicht aber durch eine sinnreiche Vorrichtung die Einstellung des Alarmpunktes auf verschiedene Temperaturgrade. Bei diesem Thermometer ist die obere Hälfte der Kapillare stark erweitert, so daß innerhalb der Glasröhre eine lange Schraubenspindel Platz findet, die an ihrem unteren Ende einen dünnen Draht trägt, der bis an die Quecksilbersäule in die Kapillare hineinreicht. Die Schraubenspindel wird im oberen Teile des Glasrohres durch eine eiserne Mutter gehalten und im unteren Teile durch einen Laufdraht derart geführt, daß der angelötete Kontaktdraht keine Drehungen, sondern nur Verschiebungen von oben nach unten und umgekehrt ausführen kann. Die Eisenmutter wird von außen durch einen starken Hufeisenmagneten derart beeinflusst, daß sie den Drehungen des Magneten folgt. Auf diese Weise kann die Schraubenspindel und mit ihr der dünne Kontaktdraht beliebig verschoben werden.

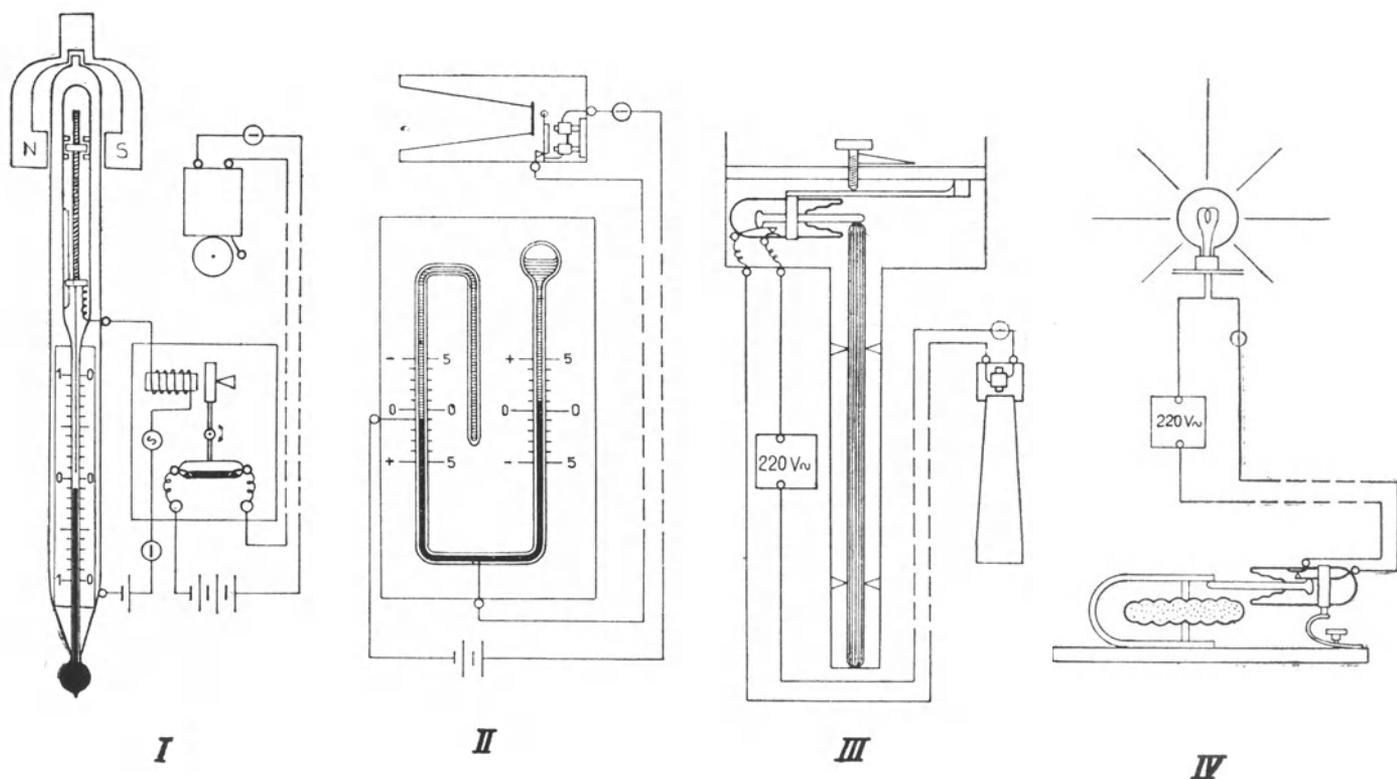


Abb. 16. Schaltschema für verschiedene Frostalarmgeräte.

In der Zeichnung ist das Thermometer auf einen Alarmpunkt von  $+1/2^{\circ}\text{C}$  eingestellt. Die Kuppe der Quecksilbersäule ist in dem abgebildeten Beispiel bereits auf  $-1^{\circ}\text{C}$  gesunken. Die Stromverbindung ist also abgerissen. Damit bei der Stromunterbrechung keine zu starken Funken auftreten können, die Materialschaden anrichten, muß für diesen Primärstrom eine schwache Batterie von nicht mehr als 4 Volt Spannung verwendet werden.

Bei Inbetriebnahme des Alarmthermometers ist der Primärstromkreis zunächst noch geschlossen und erregt einen Elektromagneten im Relais. Wird der Primärstrom dann bei Unterschreitung des Alarmpunktes geöffnet, so verliert der Elektromagnet seine Anziehungskraft und läßt den vorgelagerten Anker los. Dadurch wird ein mit Quecksilber gefüllter Vakuumschalter, der vorher schräg lag, in die Horizontale gekippt, wobei das Quecksilber die beiden Einschmelzkontakte miteinander verbindet und den Sekundärkreis schließt. Jetzt wird die Alarmglocke im Hause durch eine stärkere Batterie oder einen an das Netz angeschlossenen Transformator über eine Fernleitung betätigt.

Um auch den zweiten Nachteil des gewöhnlichen Kontaktthermometers, nämlich die Tatsache, daß bei Unterschreitung des Alarmpunktes der Strom unterbrochen wird, zu beseitigen, bedient man sich eines Maximum- und Minimumthermometers nach Six. Dieses in Abbildung 16, II dargestellte Instrument besteht im wesentlichen aus einer zweimal gebogenen dünnen Glasröhre, die an ihrem rechten oberen Ende zu einer Kugel ausgeweitet ist. Der große untere Bogen ist mit Quecksilber gefüllt, während der kleine Bogen am oberen linken Ende Wein-

geist enthält. Der Weingeist ist der Stoff, der in erster Linie auf die Temperaturänderung reagiert, während das Quecksilber hier die Rolle des Indikators übernimmt. Steigt die Temperatur an, so dehnt sich der Weingeist im kleinen Bogen stark aus und drückt die linke Quecksilbersäule herunter, die rechte hinauf. Bei abnehmender Temperatur tritt die umgekehrte Bewegung des Quecksilberfadens ein, so daß links die negativen Temperaturen oben liegen.

Werden nun an diesem Thermometer zwei Kontakte angebracht, wovon der eine in den unteren Bogen der Glasröhre eingeschmolzen, der andere bei  $+1^{\circ}\text{C}$  gelegen ist, so wird ein Stromkreis zwischen den beiden Kontakten bei Absinken der Temperatur auf  $-1^{\circ}$  und weniger geschlossen. Neuerdings werden solche Thermometer wie das vorher beschriebene mit einer Reguliervorrichtung versehen, welche die Einstellung auf verschiedene Alarmtemperaturen gestattet. Häufig sind auch Kontaktdrähte an zwei oder drei verschiedenen Temperaturgraden eingeschmolzen, so daß man die Wahl zwischen zwei oder drei Stufen, etwa  $+2$  oder  $-2^{\circ}$  hat.

In dem gezeichneten Beispiel erkennt man, daß zur Inangsetzung der Alarmvorrichtung nur mehr ein Stromkreis erforderlich ist. Dies gilt allerdings nur für den Fall, daß es sich um Vorrichtungen handelt, die wenig Strom verbrauchen, da eine starke Belastung nicht angängig ist. Die Abbildung 16, II sieht als Alarmgerät einen Summer vor, der durch einen Schalltrichter mit Resonanzkasten in seiner akustischen Wirkung verstärkt wird.

In neuester Zeit bringt die Firma Siemens & Halske elektrische Temperaturregler auf den Markt, die auf der Wärmeausdehnung fester und gasförmiger Körper beruhen und mit einem besonderen Vakuumschalter versehen sind. Wenn diese Regler auch in erster Linie als Thermostaten gedacht sind und dazu dienen sollen, die Temperatur einer Flüssigkeit oder eines Raumes in engen Grenzen konstant zu halten, so lassen sie sich doch auch vorteilhaft zum Einbau in Frostalarmeinrichtungen verwenden.

Abbildung 16, III gibt eine Schaltskizze des Siemens'schen Stabreglers wieder. Er besteht aus einem langen Invarstab, der auf dem Boden einer etwas kürzeren Metallröhre aufsteht. Während sich die Metallröhre bei wechselnder Temperatur in ihrer Längenerstreckung ändert, bleibt der aus der temperaturunempfindlichen Invarlegierung bestehende Stab bei allen Temperaturen fast gleich lang. Infolgedessen wird das freie obere Ende des Stabes bei Temperaturschwankungen auf- und abbewegt. Diese Bewegungen werden auf einen Siemens'schen Vakuumschalter übertragen, der bei Aufwärtsbewegung des Stabes, d. h. bei Verkürzung des Metallrohres infolge eintretender Abkühlung den Alarmstrom einschaltet.

Der Siemens'sche Vakuumschalter besteht aus einem kurzen weiten Glasrohr, das an seinem einen Ende normal zugeschmolzen ist und am anderen Ende eine federnde Einstülpung besitzt, durch die ein langer dünner Glasstab führt. Das herausragende Ende des Glasstabes liegt dem oberen Ende des Invarstabes federnd auf. Das Ende des Glasstabes, das sich im Innern des evakuierten Glasröhrchens befindet, berührt mit einer Verdickung eine Metalllamelle, deren Ende beim Herunterdrücken auf einem Metallplättchen Kontakt gibt.

Die beiden Kontaktstellen sind durch die Glaswand hindurch mit zwei äußeren Verbindungsklemmen verbunden. An diese kann die vorhandene Netzspannung von 110 oder 220 Volt unmittelbar angelegt werden. Selbst ein starkes Boschhorn läßt sich ohne Relais schalten, da die Siemens'schen Vakuumschalter mit mehreren Ampère belastet werden können.

Der Vakuumschalter ist in einer größeren Metalldose des Stabreglers derart montiert, daß er sich durch eine Rändelschraube mit einem Einstellzeiger etwas auf- und abbewegen läßt. Dadurch wird eine Einstellung auf verschiedene Warntemperaturen ermöglicht.

Ist der Stabregler vorwiegend zum Eintauchen in Flüssigkeiten bestimmt, weshalb er bei Messungen in Luft eine verhältnismäßig große Trägheit aufweist, so ist der Raumregler eigens für Messungen in Lufträumen konstruiert.

Der temperaturempfindliche Teil des Raumreglers von Siemens ist ein Aneroid mit Gasinhalt. Das ist eine elastische Metalldose in der Art, wie sie von den Barometern her bekannt ist. Bei zunehmender Temperatur dehnt sich das Füllgas aus und treibt die Wände der Dose auseinander. Diese Bewegungen werden auf einen hufeisenförmigen Metallbügel übertragen. Das freie Ende dieses Bügels betätigt bei seinen Bewegungen wiederum den Glashebel des Siemens'schen Vakuumschalters. Auch hier ist der Vakuumschalter wieder so montiert, daß er durch kleine Verstellungen bei verschiedenen Temperaturen zum Ansprechen gebracht werden kann.

In Abbildung 16, IV ist die Schaltskizze eines Siemens'schen Raumreglers wiedergegeben. Der Raumregler, der nur wenig Platz einnimmt, wird, von einem durchlöcherten Blechgehäuse geschützt, an der Gefahrenstelle im Gelände montiert. Von da geht eine Fernleitung nach der Alarmstelle. In dem gewählten Beispiel ist diesmal ein optisches Signal in Form einer starken Glühbirne angebracht. Bei Verwendung des Siemens'schen Vakuumschalters ist auch hier ein direkter Anschluß an die Netzleitung möglich.

Wegen elastischer Nachwirkungen und anderer Alterserscheinungen ist bei den Temperaturreglern von

Siemens von Zeit zu Zeit eine Nacheichung erforderlich. Diese wird am einfachsten dadurch ausgeführt, daß man den Regler auf  $0^{\circ}$  einstellt und prüft, ob er bei Eintauchen des temperaturempfindlichen Teils in Eiswasser anspricht. Dabei ist darauf zu achten, daß die Kältemischung etwa aus gleichen Teilen Eis und Wasser zusammengesetzt ist, und daß das Eis möglichst feinkörnig beigemischt wird. Durch ein gleichzeitig eingetauchtes geprüftes Thermometer wird festgestellt, ob die Temperatur den Gefrierpunkt tatsächlich erreicht.

Bei der Montierung jeder Alarmeinrichtung ist darauf zu achten, daß der Geber, d. h. das eigentliche Kontaktthermometer, an der am meisten frostgefährdeten Stelle des Geländes aufgestellt wird. Zweckmäßig ist eine Höhe über dem Boden zu wählen, die den frostempfindlichen Pflanzenteilen entspricht. Wenn möglich, exponiert man wenigstens den empfindlichen Teil frei dem Nachthimmel, damit das Thermometer annähernd die Temperaturen der Pflanzenorgane erreicht. Bei sehr langen Fernleitungen ist es zweckmäßiger, das Relais unmittelbar neben dem Thermometer anzubringen.

Bei ergangener Frostwarnung ist dann im Falle des Voltex an Ort und Stelle durch einen Schalter eine kleine Akkumulatorenbatterie von 2—4 Volt einzuschalten, welche den Elektromagneten im Relais zum Ansprechen bringt, wodurch der Anker angezogen und der Quecksilber-Kippschalter derart geneigt wird, daß der Sekundärkreis unterbrochen ist. Zur Kontrolle, ob der Primärstrom fließt, ist in den Primärkreis noch eine kleine Glühbirne eingeschaltet, die bei Inbetriebnahme aufleuchtet. Durch einen zweiten Schalter wird die stärkere Batterie (oder Transformator) von 6—8 Volt im Sekundärkreis eingeschaltet, die im Gefahrenfall die Alarmglocke mit Strom versorgt. Dieser Schalter liegt unmittelbar vor der Alarmglocke, damit die Glocke nach dem Wecken abgestellt werden kann.

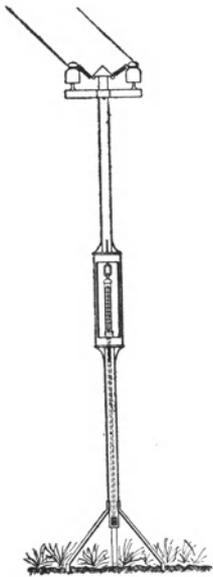


Abb. 17. Anordnung des Frostalarmgerätes „Voltex“ bei Konz.

Bei kürzeren Fernleitungen kann das Relais auch im Hause neben der Alarmglocke montiert werden. In diesem Falle liegen die beiden Schalter für Primär- und Sekundärkreis nebeneinander. Auch können die beiden Stromkreise dann von der gleichen Batterie im Hause gespeist werden. An Stelle der Batterien können mit Vorteil Transformatoren verwendet werden, die an das bestehende Netz angeschlossen sind. Dabei fällt vor allem die wiederholte Aufladung der Akkumulatoren fort.

Derartige Einrichtungen haben sich in vielen praktischen Fällen schon gut bewährt. So wurde beispielsweise im Jahre 1931 nach Angabe der Trierer Forschungsstelle eine große Alarmanlage von der Gemeinde Enkirch an der Mosel errichtet. Sie ist heute noch in Betrieb und besteht aus einem Siemens'schen Stabregler, der in einem frostgefährdeten Seitental an einem Telefonmast in Mannshöhe montiert ist, als Geber und in einem großen Bosch-Horn als Empfänger, das am Giebel einer Scheune befestigt ist, die oben am Hang der Moselberge liegt und im Gefahrenfall einen großen Teil der Anwohner aus dem Schlaf schreckt.

Kürzlich wurde bei Konz an der Mosel ein „Voltex“ an gefährdeter Stelle montiert, das ein Warnsignal über eine Freileitung in das Schlafzimmer des Weinbergbesitzers weitergibt. Die Aufstellungsweise des Voltex bei Konz zeigt Abbildung 17. Das empfindliche Quecksilbergefäß befindet sich am Ende des Eisenrohres dicht über dem Boden. In der Rohrerweiterung ist die Ableseskala mit Einstellvorrichtung für die Kontakte untergebracht.

In Abbildung 215, Tafel 9, sind die Photos der gebräuchlichsten Geber und Empfänger zusammengestellt. Auf der linken Seite sieht man der Reihe nach das Voltex- und Six-Thermometer, den Siemens'schen Oberflächen- (ähnlich Stab-) und Raumregler, sowie ein ThermindeX der thüringischen Glasindustrie, dessen Kontaktgebund bei Maximal- und Minimaleinstellung nur bei ständiger Wartung zuverlässig ist. Auf der rechten Seite sind ein einfacher Klopfer mit Schalltrichter und Resonanzkasten, eine Klingel und ein Bosch-Horn abgebildet.

### E. Zusammenfassung.

1. Es sind unzählige Versuche gemacht worden, auf Grund örtlicher Messungen das zu erwartende Minimum vorherzusagen. Die Verfahren sind zum Teil brauchbar, aber nur in Gegenden mit einem Klima, das charakterisiert ist durch längeres Verweilen der Luftmassen am Ort. Sie versagen in Gegenden mit schnellem Luftmassenwechsel, zu denen auch Deutschland gehört.

2. Von den bereits vorhandenen Verfahren ist das Verfahren, mit Hilfe der Äquivalenttemperatur bzw. nach Prött das Minimum vorauszusagen, das augenblicklich beste, jedoch müssen auch hier etwa eintretende Luftmassenversetzungen berücksichtigt werden.

3. Die Zentralvorhersage der Wetterwarten, begründet auf den synoptischen Beobachtungen, hat sehr gute Fortschritte gemacht und die Notwendigkeit einer Vorhersage mit örtlichen Messungen praktisch stark zurück-

treten lassen. Besondere Fortschritte sind gemacht auf dem Gebiet des synoptischen Dienstes und der Vorhersageverbreitung durch Rundfunk. Verbesserungsfähig sind die Vorhersagen noch unter stärkerer Berücksichtigung der Höhengestaltung, unter Heranziehung von Strahlungsmessungen und unter Verstärkung der Erkenntnisse der Auswirkung entsprechender Wetterlagen im Gelände durch ein Stationsnetz in den bedrohten Gebieten.

4. Der Praktiker soll sich auf die Aussagen des Frostwarnungsdienstes stützen und dann örtliche Beobachtungen anstellen, da bei den zum Teil sehr beträchtlichen Temperaturunterschieden auf kleinstem Raum die örtliche Überwachung der Temperatur nicht ersetzt werden kann.

### III. Frost und Pflanze.

#### A. Der Frostschaden ist eine pflanzenphysiologische Frage.

Landläufig spricht man gewöhnlich von Frostbekämpfung, meint aber damit die Bekämpfung von Frostschäden. Daß die Temperatur unter Null Grad sinkt, ist an sich wirtschaftlich ohne Bedeutung; erst die Folgeerscheinung, wenn nämlich daraufhin Schäden an Pflanzen auftreten, verdient Beachtung.

Das Kränkeln oder Absterben der Pflanzen oder einzelner Teile ist keineswegs an bestimmte Temperaturgrade gebunden. Nicht nur schwankt der entscheidende Grad von einer Pflanzenart zur anderen, er schwankt auch von Sorte zu Sorte, ja sogar innerhalb der gleichen Sorten treten Unterschiede in der Frostempfindlichkeit des einzelnen Pflanzenindividuums auf. O. Kessler hat die Beobachtung gemacht, daß Klone (also ungeschlechtlich vermehrte Pflanzen) des gleichen Rebstockes sich nach Frost verschieden verhielten; und allgemein ist im Weinbau bekannt, daß bei völlig gleichen äußeren, also meteorologischen Einwirkungen, ein Teil der Pflanze beschädigt werden kann, während der andere keinen Schaden nimmt. Häufig erfrieren bei einer Bogrebe alle Triebe und bei dem Nachbarzweig derselben Pflanze nur einige oder gar keine. Da es unmöglich ist, bei einer Entfernung von wenigen Zentimetern und dem Fehlen irgendwie komplizierender Einflüsse anzunehmen, daß hier verschiedenartige äußere Umstände eine Rolle gespielt haben, kann man nur auf Ursachen schließen, die in der Pflanze selbst liegen, die also physiologischer Natur sind.

Wenn wir diese Ursachen kennen, können wir sie uns zunutze machen, denn wir können auch auf physiologische Zustände der Pflanze Einfluß gewinnen. Hierzu sind uns insbesondere zwei Wege gegeben, der Weg der Pflanzenzüchtung und der Weg der Pflanzenernährung. Da das gestellte Problem der Frostschadenverhütung nicht allein ein meteorologisches, sondern vielmehr ein wirtschaftliches ist, sind andere Lösungen als meteorologische hier auch zu behandeln. Wir haben uns daher bemüht, die pflanzenphysiologischen Fragen und ihre praktischen Schlußfolgerungen ebenso ausführlich darzustellen wie den meteorologischen Fragekomplex mit seinen Folgerungen.

#### B. Die Kardinalpunkte der Temperatur für den Pflanzentod.

Nicht allein das Wachstum, sondern überhaupt das ganze Leben der Pflanze spielt sich innerhalb bestimmter Temperaturgrenzen ab. Ein gewisser Temperaturbereich ist einer der unentbehrlichsten Außenfaktoren für die Lebenstätigkeit.

Unterhalb einer bestimmten Temperaturgrenze, dem Minimum, wird nicht nur das Wachstum eingestellt, sondern ist der Pflanzenorganismus mit wenigen Ausnahmen in seiner Existenz bedroht. Bei steigender Temperatur nimmt oberhalb des Minimums das Wachstum immer mehr zu und erreicht schließlich ein Optimum; von da ab geht das Wachstum zurück bis zum Temperaturmaximum, oberhalb dessen das Wachstum wiederum aufhört.

Diese drei Punkte, das Minimum, Optimum und Maximum, heißen die Kardinalpunkte der Temperatur (Benecke-Jost<sup>53, 54</sup>). Ihre Lage ist nicht ganz fest, sondern hängt von einer Reihe von Faktoren ab, wie von der Außentemperatur, Nahrung, Sauerstoffzufuhr und Licht.\*). Bei Pflanzen, die kalte Standorte bevorzugen, liegen beide extremen Kardinalpunkte tief, bei denen, die in warmer Umgebung zu leben pflegen, hoch; die Spanne zwischen beiden Extremen wechselt außerordentlich. Außerdem bestehen auch noch Unterschiede bei den einzelnen Pflanzenorganen und den verschiedenen Entwicklungsstadien.

\*) Eingehendere Darstellungen bei I. Bělehrádek (42—49), *Temperature and living matter* (49), dem zahlreiche Einzelangaben entnommen sind, und bei Sorauer (361—366).

Wenn keine Nummerangabe des Schriftennachweises hinter dem Autorennamen steht, dann handelt es sich um Zitate aus Nr. 49 des Literaturverzeichnisses.

### C. Die inframinimale Temperatur.

#### 1. Allgemeine Wirkungen der inframinimalen Temperatur.

Die unterhalb des Minimums gelegene Temperaturzone, die sogenannte inframinimale Temperatur, wirkt, wie erwähnt, zunächst wachstumshemmend. Die Temperatur, unterhalb der eine Pflanze unter keinen Umständen mehr wachsen kann, heißt spezifischer Nullpunkt der Vegetation. Er fällt keineswegs immer mit Null Grad Celsius zusammen, sondern liegt oft darüber.

Im weiteren Verlauf führt dann die inframinimale Temperatur zu einer Kältestarre. Aber während nun manche Organismen in kältestarrem Zustand monate-, ja jahrelang verharren können, gehen andere rasch durch Erfrieren zugrunde. So stellt schon Bierkander fest, daß gewisse Pflanzen noch über dem Nullpunkt gelegene Temperaturen nicht lange aushalten können.

Dieser sogenannte Tötungspunkt der Temperatur ist keine konstante Größe; denn er ist nicht nur für die verschiedenen Organismen verschieden, sondern ändert sich auch mit der Dauer der Kälteeinwirkung und hängt sehr stark von dem Zustand der einzelnen Pflanze und anderen äußeren Faktoren ab, denen sie unterworfen ist.

Das Absterben bei thermophilen Pilzen und Bakterien erfolgt z. B. schon bei längerer Einwirkung von Zimmertemperatur, bei gewissen tropischen Pflanzen von etwas über Null Grad Celsius. Bei den meisten Pflanzen liegt jedoch der Tötungspunkt unter Null Grad Celsius.

Im Gegensatz zu turgeszenten Organen, die auch bei sogenannter Eisbeständigkeit nicht beliebig tief abgekühlt werden können, ohne Schaden zu nehmen, sind wasserfreie Organe, wie Sporen und Samen, gegen tiefe Temperaturen besonders unempfindlich. Sie können angeblich auch durch außergewöhnlich tiefe Temperaturen nicht getötet werden, z. B. durch  $-200^{\circ}$  bei fünftägiger Einwirkung oder durch kürzere Abkühlung auf  $-253^{\circ}$ . Es ist kaum daran zu zweifeln, daß sie auch der Einwirkung flüssigen Heliums (etwa  $-272^{\circ}$ ) eine Zeit lang widerstehen können.

Ferner haben junge Pflanzen eine andere Tötungstemperatur als ältere.

Schon Molisch<sup>262, 263</sup>) hat deutlich zwischen Erfrieren und Gefrieren unterschieden. Unter Erfrieren versteht er jede Schädigung der Pflanzen durch niedrigere Temperaturen, gleichgültig, ob diese schon wenige Grade über Null oder bei Minustemperaturen erfolgt, während er mit Gefrieren nur die Eisbildung in den Pflanzen bezeichnet, die aber nicht ohne weiteres schädlich zu sein braucht, wie eben bei den eisbeständigen Pflanzen.

Erfrieren und Gefrieren sind also keineswegs identisch. Manche Pflanzen wie Melonen, Gurken, Tomaten und Bohnen erfrieren, d. h. sie sterben ab, ohne daß die Temperaturen auf Null Grad gesunken und die Pflanzen gefroren wären. Andere Pflanzen wie Reben und Obstblüten erfrieren, sobald sie gefroren sind; wieder andere, Gräser und Futterpflanzen, können gefrieren, tauen auf und sind nicht erfroren.

Vom meteorologischen Standpunkt erscheinen diese von botanischer Seite gemachten Angaben, die man immer wieder in der botanischen Literatur weiterzitiert findet, als ungesichert. Wir haben bisher vergeblich genaue Angaben über die gemessenen Temperaturen und die Art, wie diese Temperaturen gewonnen wurden, gesucht. Die Behauptungen über das Absterben von Bohnen, Tomaten usw. bei Temperaturen über Null sind vor etwa 50 Jahren aufgestellt und inzwischen nicht neu bestätigt worden. Zu dieser Zeit war aber weder eine Messung von Pflanzentemperaturen, ja eigentlich kaum eine Lufttemperaturmessung in Pflanzenhöhe üblich, praktisch oft nicht einmal möglich. Wenn man sich damals auf die Temperaturangabe von benachbarten meteorologischen Stationen verlassen hat, in welchen die Thermometer 2 m vom Boden unter gutem Strahlungsschutz und außerdem in einem thermisch trägen System standen, dann sind die Behauptungen selbstverständlich hinfällig. Wir haben in vielen Versuchen Tomaten und Bohnen Temperaturen unter Null Grad ausgesetzt und in einigen Fällen selbst bei Blattemperaturen von  $-1,8^{\circ}$  keine Schäden bemerkt. (Vergleiche die unter X mitgeteilten Messungen).

Neben der im allgemeinen schädlichen oder gar tödlichen Wirkung niederer Temperatur konnte allerdings auch schon eine fördernde, stimulierende beobachtet werden; hat doch Kinzel<sup>202</sup>) gezeigt, daß Samen von Saxifraga, Gentiana und Primula, die jahrelang ungekeimt lagen, nach Durchfrieren in einigen Tagen oder Wochen ausgezeichnet keimten. In der Mehrzahl der Fälle wirken jedoch niedrigere Temperaturen schädigend.

#### 2. Das Erfrieren.

##### a) Kältestarre und Kältetod bei Temperaturen um Null Grad.

Erfrieren stellt den Tod eines Organismus durch Kälte dar, ist also das Absterben einer Pflanze oder eines Pflanzenteiles durch Wärmemangel.

## α) Die Tötungstemperatur.

Der Kältegrad, der in dem jeweiligen Organismus unterschritten werden muß, damit die Erscheinung der Starre oder des Erfrierens auftritt, ist, wie schon erwähnt, keineswegs konstant, sondern hängt von einer Reihe innerer Faktoren ab.

Von diesen inneren Bedingungen, die das Erfrieren beeinflussen, sind die folgenden hervorzuheben:

Nach Ewart<sup>97)</sup>, auch nach Sellschop und Salmon<sup>351)</sup>, sowie nach unseren Erfahrungen sind ältere Teile einer Pflanze widerstandsfähiger. Némec<sup>272)</sup> und Möbius<sup>260)</sup> behaupten jedoch gerade das Gegenteil.

An hohe Temperaturen gewöhnte Organismen sind sehr empfindlich für niedrige Temperaturgrade. Die sich bei dieser Anpassung vollziehenden Vorgänge sind noch ungeklärt. Hörstadius<sup>163)</sup> glaubt, daß eine Veränderung in den kolloidalen Eigenschaften des Protoplasmas während des Prozesses der Anpassung vor sich geht. Er wird damit das Richtige treffen.

Man nimmt im allgemeinen an, daß das Wachstum von Pflanzen durch Kältegrade schon früher beeinflusst wird als ihre Atmung oder ihre Photosynthese. Sachs<sup>326)</sup> hat beobachtet, daß die Produktion des Chlorophylls in gewissen Pflanzen bei Kältegraden aufhört, die keineswegs mit den Kältegraden, bei denen die Keimung aufhört, zusammenfallen.

Es ist möglich, daß eine Substanz, die bei höheren Temperaturen unschädlich ist, bei niederen giftig wirkt und einen Stillstand der Lebenstätigkeit hervorruft. So haben Weber<sup>395)</sup> und Moder<sup>261)</sup> neuerdings den schädlichen Einfluß des Harnstoffs auf Pflanzenzellen, die auf 1° bis 3° abgekühlt waren, festgestellt.

## β) Der Einfluß der Zeit.

Alle angestellten Beobachtungen haben immer wieder einwandfrei ergeben, daß bei der Erscheinung des Erstarrens und Erfrierens, gleichzeitig mit dem Temperaturgrad selbst, unbedingt auch die Dauer der Einwirkung niedriger Temperatur berücksichtigt werden muß. So bemerkte Askenasz<sup>27)</sup> daß das Wachstum der Wurzeln von *Zea Mays* bei Temperaturen in Nullpunktnähe erst nach 1—5 Stunden mehr oder weniger vollständig aufhört. Nach Klemm<sup>203)</sup> wird das Fließen im Protoplasma durch eine Abkühlung der Zellen auf — 2° nur ganz langsam aufgehalten.

Das Erfrieren tritt also erst dann ein, wenn eine gegebene Temperatur eine ganz bestimmte Zeit auf den betreffenden Organismus eingewirkt hat (sog. Zeitfaktor). In sämtlichen Versuchen übertraf nach Bělehrádek<sup>49)</sup> dieser Zeitfaktor die nur für das Herstellen des Temperaturgleichgewichtes nötige Zeit bei weitem.

## γ) Die Veränderungen in der Zelle durch Erstarren und Erfrieren.

Das Erstarren und Erfrieren bewirkt eine Reihe von Veränderungen innerhalb der Zelle, die kurz etwa folgendermaßen zusammengefaßt werden können: Aufhören der vitalen Funktionen, chemische Veränderungen des Protoplasmas, Erhöhung der Viskosität, Verlagerung des Zellinhaltes, Vakuolisierung und Körnerbildung im Plasma.

Nach den bisherigen Erfahrungen entsteht durch das Erfrieren keine spezifische Änderung in der Zelle. Die eben erwähnten Änderungen der Protoplasmastruktur sind nicht typisch, sondern werden auch als Begleiterscheinungen von Hitzeschaden und anderen Einflüssen gefunden. Die durch das Erfrieren hervorgerufenen Veränderungen stellen wohl einen Komplex von Erscheinungen dar; keine von diesen kann allein als diejenige angesprochen werden, die letzten Endes den Kältetod verursacht.

## δ) Theorien des Kältetodes.

Eine einheitliche Auffassung über die Ursache des Kältetodes bei Temperaturen über Null besteht nicht; eine definitive Stellungnahme ist auch heute wohl noch nicht möglich.

Die frühere Annahme, daß Schaden oder Tod durch Kälte ohne Eisbildung von einem Mißverhältnis zwischen den Geschwindigkeiten verschiedener vitaler Funktionen herrühre, also ein reiner Vertrocknungstod sei, ist nicht haltbar, da der Erfrierungstod in Pflanzen erfolgt, selbst wenn die Transpiration durch eine wasserdampfgesättigte Atmosphäre unterbunden ist.

Bekanntlich hatte Sachs<sup>324, 325, 326)</sup> an Tabak-, Kürbis- und Schminkbohnenpflanzen gezeigt, daß die Wurzeln bei niederen, jedoch noch über Null Grad gelegenen Temperaturen kein Wasser mehr aufnahmen, während die Blätter weiter transpirierten, so daß schließlich der Tod durch Vertrocknung eintrat. Bei Verhinderung der Transpiration und Ausstrahlung durch Verbringen unter einen Glassturz ertrugen die genannten Pflanzen die gleichen Temperaturen ohne Schädigung. Die Wirkung der niederen Temperatur war also ziemlich eindeutig auf eine ganz bestimmte Stoffwechselstörung zurückzuführen. Wir können aber auch hier nicht ohne weiteres der Folgerung beipflichten, daß tatsächlich die Temperaturen der Pflanzenteile in beiden Fällen gleich waren.

Schutz gegen Ausstrahlung bedeutet in Strahlungsnächten um 1—2° höhere Pflanzentemperaturen! Der Glassturz, der keine langwellige Strahlung durchläßt, stellt einen solchen Strahlungsschutz dar. Wenn Sachs mit strahlungsgeschützten Thermometern gemessen hat, um wahre Lufttemperatur zu erfassen, hat er nicht die Pflanzentemperatur bestimmt.

Molisch<sup>262)</sup> dagegen mußte bei *Episcia bicolor* Hook auch bei Verhinderung der Transpiration und Ausstrahlung ein Erfrieren schon bei Temperaturen über Null Grad feststellen, ohne daß er dabei eine bestimmte Stoffwechselstörung beobachten konnte.

Nach verschiedenen Autoren tritt der Kältetod ein, wenn das für jede Pflanze spezifische Temperaturminimum unterschritten wird.

Die überwiegende Mehrheit der modernen Forscher erklärt den Erstarrungsschlaf und Tod durch Erfrieren als eine Folgeerscheinung der Anhäufung von giftigen Produkten, die bei normalen Temperaturen verbrannt oder nach außen befördert werden.

Payne<sup>304)</sup> schreibt den Schaden durch Erstarren den Veränderungen in den fettigen Substanzen des Protoplasmas zu.

Weit mehr Bedeutung wird den Veränderungen zugewiesen, die in der Viskosität des Protoplasmas vor sich gehen. Es ist denkbar, daß die Zunahme der Viskosität des Protoplasmas die freie Bewegung der reagierenden Moleküle so beträchtlich behindern kann, daß die biochemischen Reaktionen in der Zelle zum Stillstand gebracht werden. In diesem Falle würde also die Erhöhung der Viskosität und die gleichzeitige Verminderung der Permeabilität Störungen im biologischen Zustand der Zelle hervorrufen; d. h. die tatsächliche Ursache des Erstarrens beruhte zuletzt auf chemischer Grundlage. Diese Annahme wird dadurch gestützt, daß sich die Lage des chemischen Gleichgewichtes tatsächlich mit der Viskosität des Protoplasmas ändert.

Nach chemischen Analysen von Pantanelli<sup>300, 301, 302)</sup> bewirkt Kälte ein Anhäufen organischer Säuren im Zellsaft, Bildung von Nebenprodukten des Stickstoffs als Folge einer erhöhten Zersetzung der Protoplasmaproteine und ferner eine Erhöhung der Konzentration des Zellsaftes und seiner Permeabilität. Mudra<sup>265)</sup> sowie Schaffnit und Wilhelm<sup>329)</sup> bestätigen den Verlust an Wasser und die Erhöhung des kristalloiden Inhaltes als eine Folge des Erstarrens. Außerdem hat Steward<sup>370)</sup> gefunden, daß das Eindringen von Bromsalzen in die Kartoffelknolle bei 3—5° aufhört; als Ursache wird die Zunahme der protoplasmatischen Viskosität angenommen.

Für das Aufhören der Lebenstätigkeit durch Kälte und für den Tod durch Erfrieren wären also wohl verantwortlich zu machen:

1. Veränderungen im zellularen Stoffwechsel.
2. Veränderungen in der chemischen Zusammensetzung des Protoplasmas und seiner Produkte.
3. Veränderungen in der Löslichkeit und in der Absorption verschiedener Substanzen, vor allem in einer Änderung der kolloidalen Zustände.
4. Veränderungen im chemischen Gleichgewicht im Innern der Zellen.
5. Veränderungen in der relativen Geschwindigkeit der ineinandergreifenden biochemischen Prozesse.

#### e) Das Wiederaufleben nach dem Erstarren.

Es ist sehr wohl möglich, daß ein Organismus, der nur für eine gewisse Zeit erstarret, nicht aber erfroren war, durch eine nachfolgende Erwärmung wieder belebt werden kann. Bei einer zu langen Einwirkung der Kälte sind die hervorgerufenen Veränderungen nicht wieder rückgängig zu machen, weshalb der Tod durch Erfrieren eintritt.

Es braucht nicht weiter zu überraschen, daß der Zeitfaktor in ähnlicher Weise wie beim Erstarren und beim Erfrieren auch im Prozeß des Wiederauflebens nach dem Erstarren mitspielt. Die Schnelligkeit, mit welcher die Wiederbelebung stattfindet, hängt von der Intensität des vorhergegangenen Erstarrens ab. Je niedriger die Temperatur war oder je länger der Erstarrungsschlaf dauerte, um so langsamer erfolgt im allgemeinen die Wiederbelebung. Großenteils geht also die Wiederbelebung nur langsam von statten; teilweise geht sie allerdings bedeutend rascher als das vorausgegangene Erstarren vor sich. So nahm nach Stevens<sup>369)</sup> das Myzel von *Endothia parasitica* nach vorsichtigem Abkühlen bis zum völligen Aufhören des Wachstums dasselbe sofort wieder auf, sobald es in Zimmertemperatur gebracht wurde.

#### b) Kältestarre und Kältetod bei Temperaturen unter Null Grad.

Bei Abkühlung eines wäßrigen Systems bis zu seinem Gefrierpunkt tritt Eisbildung ein, unter Umständen allerdings erst Unterkühlung.

### α) Der Gefrierpunkt des Zellsaftes.

Der Gefrierpunkt des Protoplasmas hängt von der Gegenwart aufgelöster Kristalloide ab, er liegt meist um wenig unter Null.

Für die Größe der Gefrierpunktserniedrigung müssen folgende Faktoren als entscheidend angesehen werden:

Nach Müller-Thurgau<sup>267)</sup> zeigt sich bei Kartoffeln, die lange Zeit kühl lagerten, eine Anhäufung von Zucker; er sieht darin aber nur eine Stoffwechselstörung.

Lidforß<sup>220)</sup> konnte in vielen wintergrünen Pflanzen bei niedriger Temperatur einen Reichtum an Zucker bei gleichzeitigem Fehlen von Stärke feststellen. In vielen Pflanzen steigt nach seiner Aussage der Zuckergehalt beträchtlich, sobald der Winter naht, indem die Stärkereserven in Zucker umgewandelt werden. Dies ist besonders bekannt bei *Fagus silvatica*.

Bei unter gleichen Verhältnissen gezogenen Pflanzen verschiedener Weizensorten stellte Åkerman<sup>5, 6)</sup> Unterschiede im Zuckergehalt bzw. in der Reduktionsfähigkeit des Zellsaftes gegenüber Fehlingscher Lösung fest. Das deckte sich mit den gemachten Beobachtungen, daß Sorten mit der größten Winterfestigkeit auch den höchsten Zuckergehalt hatten.

Lidforß<sup>220)</sup> wie auch Maximow<sup>236, 237)</sup> und Åkerman<sup>5, 6)</sup> haben experimentell eine Erhöhung der Widerstandskraft gegen Gefrieren durch Zuckermanreicherung nachgewiesen. Der erstere faßt die Wirkung des Zuckers rein chemisch auf, d. h. nach ihm spielt er die Rolle eines Schutzkolloides gegen die Koagulation des Plasmas. Åkerman und Maximow glauben dagegen an eine Wirkung rein physikalischer Natur durch Erniedrigung des Gefrierpunktes.

Nach Maximow und Pantanelli<sup>302)</sup> können aber auch andere Salze den Gefrierpunkt verändern.

Nach Roemer, Rudorf und Lueg<sup>320)</sup> ist die gesamte Zellsaftkonzentration für die Erniedrigung des Gefrierpunktes maßgebend.

Des weiteren sind alle die Faktoren von Bedeutung, die eine starke Wasseranreicherung in den Zellen hervorrufen; diese wirkt der Erniedrigung des Gefrierpunktes entgegen. Hierher gehören Bodenfeuchtigkeit und Art des Wurzelwerks (bei den Reben also auch die Unterlage). Von weiterer Bedeutung in dieser Hinsicht sind die im Boden enthaltenen Salze. So regt z. B. eine einseitig starke Stickstoffgabe zur Bildung eines üppigen wasserreichen Gewebes an, das also gegen Frost verhältnismäßig wenig widerstandsfähig ist. Im Gegensatz dazu verleihen Kalisalze eine größere Widerstandsfähigkeit. Ihre Wirkung ist sicher nicht nur als Salzwirkung anzusehen; so drückt zum Beispiel Natriumchlorid die Wasserabsorption der Pflanzen durch die Wurzeln wesentlich herab und vermindert bei seiner Aufnahme in dem Pflanzenkörper erheblich die Transpiration.

Unsere Meinung dazu ist folgende:

Die Wirkung des Kaliums auf den Zellsaft scheint entgegengesetzt der Wirkung des Kalziums zu sein. Letzteres ruft bekanntlich in kolloidalen Substanzen Auflockerung hervor. Damit würde ein Teil der wirklich oder teilweise gelösten Stoffe als Gel ausgeschieden, und die Restsubstanz gefriert bei höherer Temperatur. Im Gegensatz dazu bewirkt Kalium in einer kolloidalen Lösung eine stärkere Dispersion, also eine Neigung nach der Solseite des Systems, womit eine Erniedrigung des Gefrierpunktes bei Anwesenheit von Kalium in der Lösung verbunden ist (siehe Seite 54).

### β) Die Unterkühlung.

Bei Abkühlung eines wäßrigen Systems unter seinen Gefrierpunkt tritt, wie schon oben angedeutet, nicht immer sofort ein Gefrieren ein, es ist vielmehr häufig ein Unterkühlen festzustellen.

Die Erscheinung der Unterkühlung der Säfte in lebenden Körpern hängt mit vielen äußeren und auch inneren Bedingungen, die oft unbestimmt sind, zusammen. Daher kann man bei ein- und demselben Organismen-typ häufig eine ganz verschiedene Möglichkeit der Unterkühlung feststellen.

Als Faktoren, die die Unterkühlung beeinflussen, kommen vor allem die folgenden in Betracht:

Eine trockene oder mit einem in Wasser unlöslichen Stoff (Wachs, Fett) überzogene Oberfläche begünstigt die Unterkühlung; die Eisbildung geht nämlich von Kristallisationszentren aus, welche sich an nassen Oberflächen bilden.

Auch der anatomische Bau beeinflusst den Unterkühlungsgrad außerordentlich. Nach Åkerman<sup>5, 6)</sup> kann in kapillaren Räumen die Unterkühlung sehr weit getrieben werden. Er erwähnt, daß nach Wiegand in kleinzelligen embryonalen Geweben (Knospen der Holzgewächse) bei niedrigem Wassergehalt die Eisbildung bis zu  $-18^{\circ}$  ganz unterbleiben kann. Als Gegenstück mögen hier die großzelligen Gewebe der Kartoffel angeführt werden.

Erschütterungen können eine Unterkühlung verhindern oder aber ein schon unterkühltes System zum sofortigen Ausfrieren bringen. Es ist ja bekannt, daß die Kartoffel bei gleichen Frosttemperaturen auf dem Transport leichter Schaden nimmt als bei ruhigem Lagern.

## γ) Der Kältetod unter Null ohne Eisbildung.

Für die Fälle, in denen das Absterben ohne die Bildung von Eis durch die direkte Einwirkung von Temperaturen unter Null eintritt, wissen wir nicht, ob sich dabei das Protoplasma in irgendeiner charakteristischen Weise ändert. Zwischen dem Einfluß der Temperaturen über Null, welche Erstarren zur Folge haben, und den Temperaturen unter Null, unter deren Einfluß gleichfalls der Lebensprozeß zeitweilig oder dauernd aufhört, ohne daß Eisbildung eintritt, besteht ziemlich sicher große Ähnlichkeit oder gar völlige Übereinstimmung. Molisch<sup>262</sup>), Mez<sup>257</sup>) und Bartetzko<sup>36</sup>) betrachten die Vorgänge als gleich; als einziger Unterschied wird von Akerman angegeben<sup>5</sup>), <sup>6</sup>), daß der Schaden bei Temperaturen unter Null rascher eintritt als bei Temperaturen darüber.

## δ) Kältestarre und Kältetod bei Temperaturen unter Null bei gleichzeitiger Eisbildung.

Bei genügender Abkühlung bildet sich unter Umständen nach einer Unterkühlung in turgeszenten Organen Eis.

Als Gefrieren bezeichnet man die durch Kälteeinfluß verursachte Eisbildung innerhalb der Pflanze. Diese Eisbildung braucht keineswegs immer sofort tödlich zu wirken; das zeigen die sogenannten eisbeständigen Pflanzen. Dabei ist nach Müller-Thurgau die Dauer des Frostes wirksamer als seine Stärke. Nach Benecke-Jost<sup>53</sup>, <sup>54</sup>) kann keine turgeszente Zelle beliebig tief abgekühlt werden; durch allzu starke Abkühlung werden alle gefrorenen Organe schließlich getötet.

Wie schon angedeutet, spielt auch bei dem Vorgang des Gefrierens der Zeitfaktor eine wesentliche Rolle. Bei einer gegebenen Temperatur steigt der Effekt mit der Dauer der Einwirkung, bzw. bei einer höheren Temperatur ist eine längere Einwirkung notwendig, um einen gewissen Effekt hervorzurufen, als bei einer niederen.

Schon Molisch<sup>262</sup>) hat gezeigt, daß bei einer raschen Abkühlung die Wirkung von Frosttemperaturen auf Pflanzen größer ist, als wenn das Gewebe allmählich abgekühlt wird. Bei langsam fortschreitender Abkühlung bildet sich Eis nur um die Zellen, bei plötzlicher Abkühlung dagegen auch im Innern. Nach Akerman und Pütter<sup>312</sup>) begünstigt langsames Abkühlen die Unterkühlung. Stiles<sup>371</sup>) hat darauf hingewiesen, daß die Eiskristalle um so kleiner sind, je schneller ihre Bildung vor sich geht. Der Grad des Frostschadens sollte daher bei langsamem Gefrierprozeß an Stärke zunehmen, eine rasche Abkühlung also weniger gefährlich sein als eine langsam fortschreitende. Zur Stütze seiner Ansicht bringt er die Versuchsergebnisse von Kühne<sup>211</sup>) und Molisch,<sup>262</sup>) von denen der erstere seine Versuchsobjekte rasch abkühlte und beim Auftauen wieder aufleben sah, während Molisch die Temperatur nur langsam änderte und die Zellen später tot auffand. Man darf dabei aber nicht unerwähnt lassen, daß Molisch und Kühne mit zwei verschiedenen Arten von Tradescantia arbeiteten.

Auch De Jong<sup>86</sup>) und Zandbergen fanden bei Trypanosomen, die Temperaturen zwischen  $-20^{\circ}$  und  $-191^{\circ}$  ausgesetzt waren, in bestimmten Fällen eine Bestätigung dieser Regel; bei der Mehrzahl der untersuchten Arten waren jedoch die Temperaturen von  $-20^{\circ}$  und  $-30^{\circ}$  schädlicher als die von  $-190^{\circ}$ . Pütter<sup>312</sup>) nimmt daher an, daß der Tod infolge Anhäufung schädlicher Stoffwechselprodukte eintritt, die sich bei höheren Temperaturen rascher entwickelten. Bělehrádek hält es für natürlicher, diese Erscheinung auf physikalischer Basis zu erklären. Denn nach Tammann weist die Schnelligkeit der Kristallisation in unterkühlten Lösungen bei einer bestimmten Temperatur ein Optimum auf. Bei der Annahme, daß in den Versuchen von De Jong und Zandbergen der Tod durch Auskristallisieren von Eis im unterkühlten Protoplasma verursacht war, müßte dann die Temperatur von  $-20^{\circ}$  als Optimum für die Schnelligkeit der Kristallisation angenommen werden.

Die Eisbildung tritt nach Göppert<sup>127</sup>) in den Zellen selbst ein; nach Sachs, Müller-Thurgau, Molisch<sup>262</sup>) u. a. dagegen in der Regel in den Interzellularen und nur selten in den Zellen selbst.

Infolge des Gefrierens geht eine Reihe von Veränderungen im Organismus vor sich.

Nach Molisch<sup>262</sup>) wird durch die Bildung von Eiskristallen um die Oberfläche dem Zellinnern Wasser entzogen. Dadurch wird eine außerordentlich starke Schrumpfung der Zelle bewirkt. Auch nach Müller-Thurgau beruht die schädliche Wirkung der Eisbildung vor allem auf der Entziehung des Wassers und damit einer Fällung der Protoplasmakolloide.

Pfeffer<sup>305</sup>) sieht in der durch die Eisbildung bedingten Wasserentziehung nicht die einzige Ursache des Kältetodes, da ja bei Tomaten und Gurken bereits bei ganz geringer Eisbildung Schädigungen eintreten, ohne daß dabei von einer wesentlichen Wasserentziehung gesprochen werden kann. Auch Mez<sup>257</sup>) hat diese Ansicht lebhaft bekämpft, jedoch haben neuere Studien von Maximow<sup>236</sup>, <sup>237</sup>) die Annahme eines Wasserentzuges bestätigt. Allerdings glaubt Maximow, daß nicht nur durch Wasserentzug, sondern auch durch die mechanische Wirkung des Eises die Koagulation eintritt. So wäre denn auch verständlich, daß Austrocknen und Ausfrieren recht verschieden wirken können, so daß Pflanzen, die gegen Austrocknen resistent sind, keineswegs auch immer frostresistent sein müssen.

Akerman<sup>5, 6)</sup> erklärt den Wasserentzug wie folgt. Er hält den Dampfdruck in den Interzellularen für höher als in den Zellen. Bei langsamer Abkühlung geht daher zuerst der Wasserdampf in den Interzellularen in Eis über. Infolgedessen wird nun der Dampfdruck in den Zellen höher als über dem Eis, so daß das Wasser in die Interzellularen hinausströmt, dem Plasma also Wasser entzogen wird. Bei schneller Abkühlung tritt auch nach Akerman Eisbildung in den Zellen selbst auf.

Walter<sup>392, 393)</sup> untersuchte die Winterfrostschäden an immergrünen Pflanzen der Rheinebene während der Kälteperiode von Januar bis März 1929 und ihre Ursachen. Er teilte die untersuchten Pflanzen ein nach ihrer zunehmenden Winterfestigkeit in

1. sommergrüne Pflanzen, deren beblätterte Sprosse hier und da milde Winter in der Rheinebene überdauern;
2. sommergrüne Pflanzen, die in der Rheinebene normalerweise überwintern;
3. immergrüne Zwergsträucher, die in strengen Wintern Schneeschutz verlangen;
4. immergrüne Pflanzen, die nur im Winter 1928/29 geschädigt wurden;
5. immergrüne Pflanzen, die nur in sonnigen Lagen geschädigt wurden;
6. immergrüne Pflanzen, die auch in sonnigen Lagen nur geringe Schäden aufwiesen;
7. immergrüne winterharte Nadelbäume.

Die Kälteschäden bei Pflanzen können entweder eine direkte Frosteinwirkung sein, d. h. durch die niederen Temperaturen und die dadurch bedingte Eisbildung in der Pflanze hervorgerufen werden, oder aber sie können die Folge von der auch während der Kälte weitergehenden Transpiration sein, also auf Austrocknung beruhen, da ja ein Ersatz des verlorenen Wassers vom Wurzelsystem aus nicht möglich ist. Die von Walter ausgeführten Untersuchungen haben eindeutig ergeben, daß die meisten Schäden durch die Wasserverluste der Pflanzen während der langandauernden Kälteperiode, die meist mit klarem, sonnigem Wetter zusammenfiel, verursacht wurden.

Durch Wasserverluste können Pflanzen nur dann Schaden leiden, wenn die lebende Substanz das Plasma-wasser verliert. Der Wassergehalt des Plasmas, d. h. sein Quellungs-zustand, hängt aber direkt von der Konzentration des Zellsafts ab. Seine Erhöhung bedingt eine Entquellung des Plasmas. Bei einem bestimmten, für jede Pflanzenart charakteristischen maximalen Konzentrationswert des Zellsafts stirbt das Plasma ab. Deshalb wurde die Bestimmung des osmotischen Wertes der Untersuchung zugrunde gelegt.

Je höher der maximale osmotische Wert liegt und vor allen Dingen, je niedriger die winterliche Transpiration ist, desto widerstandsfähiger werden die Pflanzen gegen die Winterkälte sein.

Ferner wäre hier die mechanische Einwirkung des Eises zu erwähnen, also das Zerreißen der Gefäßwände durch die Eisbildung, wodurch die normale Zirkulation der Flüssigkeit gestört wird. Nach Göppert<sup>127)</sup> werden jedoch die Zellwände nicht beschädigt, sie sollen nur nach dem Auftauen schlaff sein und eine stärkere Permeabilität aufweisen.

Des weiteren hat Kühne<sup>211)</sup> gewisse Veränderungen in der Protoplasmastruktur beobachtet, die unter Umständen völlig reversibel sind. Nach Klemm<sup>203)</sup> können dagegen viele Objekte ohne irgendeine nennenswerte Veränderung der Protoplasmastruktur durch Gefrieren sterben. Nägeli<sup>271)</sup>, Molisch u. a. bezeichnen die plasmatische Vakuolisierung als eine typische Folgeerscheinung des Gefrierens; nach Matruchot und Molliard<sup>234)</sup> bilden sich beim Gefrieren Vakuolen auch im Zellkern.

Auch in den chemischen Eigenschaften treten Veränderungen ein. So weist nach Harvey<sup>147, 148)</sup> der ausgepreßte Saft von gefrorenen Blättern einen niedrigeren  $P_H$ -Wert auf als der Saft normaler Blätter.

Nach Dexter, Tottigham und Graber<sup>87, 88)</sup> ist die Konzentration der Elektrolyte in einer aus Pflanzengewebe stammenden Flüssigkeit größer, wenn die Pflanzen vorher gefroren waren. Ivanov<sup>173)</sup> hat gefunden, daß die Konzentration der Elektrolyte schon eine merkliche Zunahme aufweist, ehe überhaupt irgendeine morphologische Veränderung beobachtet werden kann. Diese Erscheinung ist anfangs umkehrbar und nimmt mit der Dauer der Kälteeinwirkung bis zum Eintritt des Todes andauernd zu; danach ist keine Steigerung der Leitfähigkeit mehr wahrzunehmen.

Über die Erscheinung des Todes durch Gefrieren hat sich eine große Zahl von Theorien angesammelt. Es besteht jedoch kein Zweifel, daß keiner der folgenden Vorgänge allein als der Grund für den Tod durch Gefrieren betrachtet werden kann:

1. Bildung von Eis in der Zelle, Zerreißen der Zellwände durch die Ausdehnungskraft des gefrierenden Wassers, dadurch Störung der normalen Zirkulation.
2. Eisbildung an sich ist unschädlich, die Zelle wird erst beim Auftauen zerstört.
3. Eisbildung rings um die Zellen und Beschädigung von außen. Dabei Todesursache durch
  - a) mechanische Pressung der Zelle,

- b) Entziehung des Wassers der Zellen durch Eisbildung, was starke Konzentration der aufgelösten Substanzen in der Zelle oder Vakuole und Schädigung des kolloidalen Zustandes der lebenden Materie zur Folge hat,
  - c) Zerstörung der Protoplasmaober-schicht durch das außerhalb der Zelle gebildete Eis.
4. Bildung von Eis im Innern der Zellen und außerhalb; dadurch mechanische Verletzung durch Eiskristalle und Koagulation des Protoplasmas infolge des Frostes.

Da der Tod durch die direkte Einwirkung von Kälte auch ohne Eisbildung eintreten kann, wenn die Temperatur unter ein spezifisches Minimum fällt, glaubt Mez<sup>257)</sup> bei den Pflanzen, die der Eisbildung widerstehen, sogar an eine schützende Rolle des Eises, da infolge der Gefrierwärme die Erreichung des spezifischen Temperaturminimums verzögert werde.

In ähnlicher Weise, wie nach einer Kältstarre eine Wiederbelebung möglich ist, können auch schon gefrorene Pflanzen oder Pflanzenteile durch langsames Auftauen unter Umständen vor dem Kältetod bewahrt werden. Über den Vorgang des Auftauens liegen recht zahlreiche Beobachtungen vor.

Sachs hält für die Erhaltung gefrorener Pflanzen schnelles Auftauen für schädlicher als langsames. Bei langsamem Auftauen sollen die Zellen in der Lage sein, das allmählich sich bildende Schmelzwasser wieder zurückzusaugen, während bei schnellem Abschmelzen der inneren Eismassen ein großer Teil des Wassers sich in die größeren Hohlräume des Gewebes verlaufe und für die Zellen verloren gehe. Das habe einen Zerfall der protoplasmatischen Substanz des Zelleninhalts zur Folge. Er ging sogar bis zu der Behauptung, daß nicht der Frost als solcher das Gewebe zerstöre, sondern erst die beim Auftauen auftretenden Vorgänge.

Nach Müller-Thurgau jedoch „fehlt vorläufig jeglicher Grund, den Augenblick des Absterbens in die Zeit des Auftauens zu verlegen“.

Göppert<sup>127)</sup> hat durch seine Versuche mit indicanführenden Orchideenblüten gezeigt, daß der Tod schon während des Gefrierens eintrat.

Müller-Thurgau konnte nie eine Pflanze oder einen Pflanzenteil durch langsames Auftauen retten, wenn es sich bei schnellem Auftauen zweifellos als getötet erwiesen hätte. Später soll Müller-Thurgau<sup>262)</sup> jedoch bei gewissen Apfel- und Birnsorten durch langsames Auftauen eine günstigere Wirkung gegenüber schnellem beobachtet haben.

Molisch<sup>262)</sup> kam bei Blättern von *Agave mexicana* zur gleichen Ansicht.

Akerman hat festgestellt, daß bei Rotkohl, *Viburnum Tinus* und *Aucuba japonica* rasches Auftauen schädlicher wirkt. Dasselbe hat er auch, ebenso wie Wright, bei Gefrierversuchen mit Winterweizen gefunden. Er betont jedoch, daß ein Unterschied nur dann zu beobachten war, wenn das Auftauen ganz besonders rasch vorgenommen wurde.

Zillig<sup>429)</sup> führte Versuche mit Topfreben, die etwa 1 cm lange Knospen trugen, durch. Bei 1½ Stunden langer Einwirkung von künstlichen Temperaturen von  $-2^{\circ}$  und Auftauen im Schatten blieben 75 % der Pflanzen am Leben, beim Auftauen in direktem Sonnenlicht starben sie zu 100 % ab. Bei Temperaturen bis  $-3^{\circ}$  waren die Unterschiede bei langsamem und schnellerem Auftauen wesentlich geringer. Bei  $-4^{\circ}$  starben in beiden Fällen alle Knospen ab. Die Versuchsbedingungen waren durch allmähliches Senken der Temperatur den Verhältnissen in der Natur möglichst angepaßt.

Allerdings macht Zillig bei dem Versuch bei  $-2^{\circ}$  keine Angaben darüber, ob die jungen Rebtriebe sämtlich gefroren oder teilweise nur unterkühlt waren.

Zahn<sup>425, 426)</sup> berichtet, wie im Rebzuchtgarten zu Veitshöchheim, nachdem bei einem Spätfrost trotz des Räucherns die Temperatur auf  $-4^{\circ}$  gefallen war und die jungen Rebtriebe steif gefroren waren, sechs Stücke vor Sonnenaufgang mit Sackleinwand bedeckt wurden. Bei Wegnahme der Decken am Nachmittag erwiesen sich die Stücke ebenso wie die unbedeckten zu 100 % geschädigt. Außerdem wurde eine größere Anzahl von Stöcken vor Sonnenaufgang ganz leicht mit Wasser überbraust. Während die jungen Triebe der anderen Stöcke noch steif gefroren waren, hingen sie an den überbrausten Stöcken schlaff und aufgetaut herunter. Das Überbrausen mit Wasser hatte demnach eine starke Beschleunigung des Auftauens zur Folge. (Die Angabe der Wassertemperatur fehlt!) Der Grad der Schädigung war der gleiche wie bei den überdeckten. Bei der Temperatur von  $-4^{\circ}$  war also der Tod schon während des Gefrierens eingetreten.

O. Kessler hatte Gelegenheit, in zahlreichen Fällen das Verhalten von Tomaten, Kartoffeln, Bohnen, Erdbeeren und Reben während der Frostschutzberechnung zu prüfen. Nähere Ausführungen hierüber sind in Abschnitt: „Die Berechnung als Frostschutz“ gemacht (siehe Seite 221). Außerdem hat er zusammen mit Schanderl Versuche angestellt, ob berechnete Reben in höherem Maße frostgefährdet sind als unberechnete. Bei Topfreben, welche mit Wasser fein übersprüht waren, wurde im Vergleich mit unberechneten Reben durch Ausplanimetrieren der erfrorenen

Blattflächen festgestellt, daß bereits 45 % der Blattflächen der berechneten Reben erfroren waren, ehe sich Schäden an den unberechneten einstellten.

Nach Geiger<sup>122, 124)</sup> kann durch Besprengen mit Wasser infolge der hohen spezifischen Wärme des Wassers, eventuell durch die Bildung einer isolierenden Eisschicht, der Temperaturanstieg erheblich verzögert werden. In Amerika hat man sogar besondere Verfahren zum Auftauen entwickelt. Dabei wird von hohen Masten aus Wasser in feinsten Verteilung über die Anlagen gesprengt.

Åkerman und Müller-Thurgau haben Versuche mit Eintauchen in Wasser gemacht. Dieses bewirkte infolge seiner hohen Wärmekapazität ein wesentlich schnelleres Auftauen als in Luft.

Wie Bělehrádek<sup>49)</sup> mitteilt, scheint es nach neueren Beobachtungen nahezu sicher zu sein, daß viele Pflanzen, die dem Gefrieren widerstehen können, unter gewissen Temperaturbedingungen bei einem raschen Auftauen getötet werden.

#### ε) Die Frostresistenz.

Unter Frostresistenz verstehen wir die Fähigkeit der Pflanze, Temperaturen unter Null Grad Celsius im unterkühlten Zustand oder die Eisbildung in ihrem Innern zu ertragen.

Wir haben schon oben darauf hingewiesen, daß Eisbildung und Absterben des Organismus keineswegs immer Hand in Hand gehen müssen. So können nach Bartetzko<sup>36)</sup> gewisse Gebilde auch in unterkühltem Zustand ohne irgendwelche Eisbildung absterben. Des weiteren haben einige Autoren aber auch festgestellt, daß viele Pflanzen durch tiefe Temperaturen erst dann zugrunde gehen, wenn Eisbildung in ihnen stattfindet; sie können, wenn sie vorsichtig abgekühlt werden, bei Temperaturen von einigen Graden unter Null noch am Leben bleiben, während sie infolge sehr geringer Eisbildung schon bei höheren Temperaturen geschädigt werden (Kartoffeln, Tomaten, Gurken, nach Molisch auch die Rebenblätter). In solchen Fällen muß also die Bildung des Eises die Todesursache sein. Auf der anderen Seite können gewisse Pflanzen, wie unsere Bäume und manche auch im Winter wachsende Unkräuter, ein völliges Durchfrieren und ebenso das Wiederauftauen eventuell mehrmals hintereinander aushalten.

Die Folgerung, daß eine Begünstigung der Unterkühlung eine Erhöhung der Frostresistenz bedinge, ist also nur mit Einschränkung gültig. Andererseits braucht aber ein Gewebe selbst noch nicht erfroren zu sein, auch wenn sich Eiskristalle um es herum oder in seinen Innenräumen gebildet haben.

Für die Größe der Frostresistenz ist also bedeutungsvoll, ob der betreffende Organismus eine weitgehende Unterkühlung aufweisen und aushalten kann oder aber, ob er befähigt ist, die Eisbildung ohne schwerwiegende Schädigung zu ertragen.

Für das Ausmaß des Schadens bei Temperaturen unter Null kommt eine Reihe biologischer Faktoren in Betracht.

Bei niederen Temperaturen herangezogene Pflanzen widerstehen der Frostgefahr gewöhnlich besser als bei höheren Temperaturen gezogene. Die Pflanzengewebe können sich also der Kälte anpassen; doch sind die Grenzen ihrer Anpassungsfähigkeit eng. Nach Apelt<sup>25)</sup> erfroren Kartoffeln, die mehrere Wochen bei 22,5° gelegen hatten, bei -2,10°, solche, die bei 18° gelagert hatten, bei -2,36°; bei 0° aufbewahrte Kartoffeln erfroren erst bei -3,08°. An sich recht widerstandsfähige Pflanzen können durch kurzen Aufenthalt in der Wärme an ihrer Kälteresistenz einbüßen. Ein rascher Wechsel der Temperaturen ist für die Pflanzen besonders schädlich. Bei starker Erwärmung erhalten die im Ruhezustand befindlichen Pflanzen einen Anreiz zum Wachstum, das sie dann beim Einsetzen der Kälte nicht sofort wieder einstellen können. Die Pflanzen scheinen eine schnellere Anpassungsfähigkeit an höhere als an niedere Temperaturen zu besitzen.

Diese Anpassungsfähigkeit wird meist auf die Anhäufung von Zucker zurückgeführt; Schaffnit<sup>328)</sup> hält den Zucker zusammen mit Proteinen für das Hauptschuttmittel. Wahrscheinlich sind die hydrophilen Kolloide in den Zellen oder in den Zellwänden in dieser Hinsicht die wirksamsten Faktoren.

Der Wassergehalt der Gewebe ist zweifelsohne von nicht geringem Einfluß. Die Tatsache, daß die Süd- oder Sonnenseite von Holzgewächsen nach sonnigen Wintertagen mehr als die Nordseite leidet, erklärt Müller-Thurgau mit der Annahme einer verschiedenen großen Wasseraufnahme; er konnte nämlich einwandfrei feststellen, daß die Südseite an solchen Tagen wasserreicher war als die Nordseite.

Nach Whitten<sup>102)</sup> wurden purpurrote Pfirsichzweige in den auf sonnige Wintertage folgenden kalten Nächten empfindlich geschädigt, grüne dagegen nicht. Bei den ersteren begannen die Knospen infolge der stärkeren Erwärmung zu wachsen, wobei das Gewebe reicher an Wasser wurde, so daß dann infolge der niederen Zellsaftkonzentration in den kalten Nächten eine Eisbildung leichter möglich war. Durch Kalkanstrich, dessen weiße Farbe die Erwärmung verminderte, konnten die Schädigungen an den purpurroten Zweigen verhütet werden.

Das Alter ändert die Widerstandskraft nicht in einer einheitlichen Weise ab. Die für solche Altersunterschiede verantwortlichen biochemischen oder kolloidalen Faktoren sind noch ungenügend bekannt. Fischer<sup>106)</sup>

nimmt an, daß in jungen Geweben das Wasser durch eine größere Kraft zurückgehalten wird und daher ihre Zellen größere Widerstandskraft aufweisen. Nach Hooker<sup>161)</sup> bedingt ein hoher Pentosengehalt die größere Widerstandsfähigkeit in älteren Pflanzengeweben im Vergleich zu jüngeren Teilen.

Schon Haberlandt<sup>137)</sup> wußte von den Unterschieden verschiedener Zellen bezüglich ihrer Frostwiderstandsfähigkeit, so daß z. B. die Chloroplasten der Randzellen widerstandsfähiger sind als die der Zellen des Mesophylls.

Nach Molisch sind die Stomata-Zellen weniger empfindlich als andere Zellen derselben Pflanze; nach Zacharowa<sup>424)</sup> sind die Wurzelhaare und die Rinde empfindlicher als das Meristemgewebe. Wurzeln scheinen weniger widerstandsfähig zu sein als die oberen Teile der Pflanze, und selbst die einzelnen Teile der Wurzel können verschiedene Widerstandsfähigkeit aufweisen.

Demnach sind die Ursachen der Frostresistenz also etwa folgende:

1. Anatomische Verhältnisse, Zellgröße und thermische Isolierschichten;
2. physiologische Faktoren.

Anhäufung osmotisch wirksamer Substanzen in der Zelle verhindert allzu großen Wasserentzug. Pütter<sup>312)</sup> nimmt an, daß die osmotische Konzentration bei der Frostresistenz im allgemeinen die Hauptrolle spielt, daß aber die Auswirkung infolge der Unterkühlung häufig nicht in Erscheinung tritt. Nach Rein<sup>317)</sup> zeigen Pflanzen, deren Zellsaft stets den gleichen osmotischen Druck aufweist, ganz bemerkenswerte Unterschiede in der Frostwiderstandsfähigkeit. Der Gang der Resistenz und des osmotischen Druckes zeigt bisweilen deutliche Abweichungen; es liegt daher nach W. Keßler<sup>195)</sup> nur eine reine Parallelerscheinung ohne kausalen Zusammenhang vor.

Nach Sellschop und Salmon<sup>351)</sup> erhöht das Hinzufügen von Pottasche die Frostresistenz in Pflanzen. Schaffnit und Wilhelm<sup>329)</sup> haben später bestätigt, daß das Vorhandensein von Pottasche in den Pflanzen die Widerstandskraft gegen Kälteeinflüsse erhöht, und festgestellt, daß andererseits die Gegenwart von Stickstoff und Phosphor sie herabsetzt.

Viele Forscher sprechen von einem Schutz gegen Wasserentzug durch Anhäufung hydrophiler Kolloide, wie Kohlehydrate und Eiweiße, in der Zelle, die das Wasser in gebundenem Zustand flüssig erhalten. Die neuesten Untersuchungen von Meyer<sup>254)</sup> konnten aber keine Übereinstimmung zwischen Kolloidgehalt und Resistenz feststellen.

Zucker wirkt als Schutzkolloid und verhindert Aussalzung und Denaturierung der Plasmakolloide.

Mez<sup>257)</sup> nimmt eine schützende Rolle der Fette an, und es ist tatsächlich beim Herannahen der kalten Jahreszeit eine bemerkenswerte Anhäufung von Fett festzustellen.

Die Frostresistenz ist nach Zacharowa<sup>424)</sup> mit einem höheren  $P_H$ -Wert verbunden. Nach ihrer Ansicht macht Säure die Proteine weniger widerstandsfähig, so daß sie bei Frost leichter koagulieren. Der im allgemeinen gleiche Gang der Resistenz und des  $P_H$ -Wertes läßt durch einige deutliche Abweichungen erkennen, daß ein kausaler Zusammenhang zwischen beiden nicht bestehen kann.

Die Resistenz hängt von dem jeweiligen Zustand oder der Struktur des Plasmas ab. Angesichts der hohen Resistenz in vollkommener Entwicklungsruhe, wobei das Plasma besonders zäh ist, glaubt W. Keßler<sup>195)</sup> an einen Zusammenhang zwischen Resistenz und Viskosität. Dieser Zusammenhang wird so erklärt, daß durch Hydratation dem Plasma freies Wasser entzogen wird und so die Viskosität steigt.

3. Äußere Lebensbedingungen: Die Fähigkeit einer Pflanze, niedere Temperaturen zu ertragen, ist gerade bei sehr langsamer Abkühlung wirksam. Bei raschem Temperaturwechsel geht die Kälteresistenz zurück. —

Für die Frostbekämpfung ist zu beachten, daß die inneren Faktoren, die die Resistenz bedingen, nicht ohne weiteres in kurzer Zeit zu ändern sind. Dagegen lassen sich die äußeren Bedingungen bis zu einem gewissen Grade künstlich ändern.

## IV. Physiologische Maßnahmen zur Frostschadenverhütung.

### A. Die Pflanzenzüchtung als Mittel gegen Frostschäden.

Von den vielen Problemen, die bei der Züchtung frostwiderstandsfähiger Kulturpflanzen auftreten, kann man sich am besten ein Bild machen, wenn man sie an einer bestimmten Pflanze erörtert. Hierzu eignet sich die Rebe besser als eine annuelle Pflanze, weil bei ihr die verschiedensten Ursachen den Frostschaden bedingen und damit mannigfaltige Probleme der Züchtung deutlich werden.

#### Die Züchtung von Reben auf Frostwiderstandsfähigkeit.

Frostschäden an Reben treten unter den verschiedensten meteorologischen Umständen ein. Die Züchter müssen die verschiedenen Gründe des Frosttodes der Reben kennen, weil sich daraus beachtenswerte Unterschiede bei der Erfassung des Zuchtzieles ergeben.

Wir müssen unterscheiden zwischen den Frostschäden, die außerhalb der Vegetationszeit, also im Winter auftreten, und denen, welche während der Vegetationszeit auftreten und als sogenannte Spät- und Frühfröste Folgen der Kälterückfälle im Frühjahr oder der Kälteinbrüche im Herbst darstellen. Die Ursachen der Schäden sind verschieden; infolgedessen müssen diese auch durch verschiedene züchterische Maßnahmen bekämpft werden.

Die Winterfrostschäden in der kalten Jahreszeit treten zwar häufig bei manchen Rebsorten und unter mannigfachen äußeren Umständen auf, wobei besonders Bodenverhältnisse und die Exposition zur Sonne eine Rolle spielen, sie werden jedoch nicht in dem eigentlichen Umfang als solche erkannt, weil sie nicht eindeutig auf Winterfröste als Ursache zurückgeführt werden können. Der Winterfrostschaden äußert sich darin, daß erfrorene Augen nicht austreiben. Meistens sind es nur wenige Augen an einer Bogrebe, manchmal jedoch auch sämtliche. Da man vorher nicht sieht, ob die Augen gesund waren, kann die Schlußfolgerung auf Frostschaden nur indirekt geführt werden. Nur sehr selten erreichen die Winterfrostschäden das Ausmaß einer Katastrophe. Für manche deutschen Weinbaugebiete geschah dies allerdings nach dem überaus strengen Winter 1929. Die davor liegende, noch umfangreichere Schädigung wurde hervorgerufen durch den Winter 1879/80, der sich durch eine andauernde Periode von Eistagen auszeichnete, wenn er auch nicht die tiefen Temperaturen des Winters 1928/29 erreichte.

Nimmt man dazu noch die Berichte aus alter Zeit, so ist mit bedeutenden Winterfrostschäden nur etwa zweimal in einem Jahrhundert zu rechnen. Nach den Beobachtungen, die nach den beiden angeführten Wintern gemacht wurden, ist festzustellen, daß besonders die Reben in sonnigen Lagen und trockenen Böden gelitten haben. Der Frosttod ist vorwiegend im März 1929 eingetreten. Der Boden war teilweise bis zu einem Meter tief gefroren, taute aber an der Oberfläche unter den wärmenden Strahlen der Sonne stellenweise auf. Die Luft war ungewöhnlich trocken. Trotz der Einschränkung der Transpiration in der vegetationsfreien Jahreszeit traten infolge der verhältnismäßig hohen Temperaturen der Pflanzenteile und der Trockenheit der umgebenden Luft Wasserverluste ein. Dieser Wasserverlust der oberirdischen Teile konnte nicht ersetzt werden durch Zuleitung von Wasser aus dem Erdboden, weil die Wasserleitungsbahnen der Reben und des Bodens gefroren waren. In erster Linie ist also zweifelsohne der Winterfrostschaden des Jahres 1929 auf einen Austrocknungstod zurückzuführen. In den lockeren und sonnigen Böden der Pfalz sind sehr große Rebflächen völlig vernichtet worden, aber auch in allen anderen Weinbaugebieten unter den gleichen Bedingungen, z. B. in Franken.

Auffallende Unterschiede in der Frostresistenz waren zu verzeichnen, und zwar Unterschiede unter den einzelnen Viniferasorten wie auch solche von Stock zu Stock. Die überalterten Anlagen haben besonders gelitten. Hier traten neben dem Erfrieren des jungen Holzes auch Frostrisse am alten Holz auf.

Die Winterfrostschäden von 1929 erfuhren in den Fachzeitschriften eine ausführliche Besprechung. Zusammengefaßt gehen die Ansichten dahin, daß mangelnde Holzreife im Herbst die Hauptursache für Frosttod in dem darauffolgenden Winter ist. Dem Winter 1879/80 ging ein Herbstfrost voraus, der die Blätter früh zum Abfallen brachte und die weitere Bildung von Assimilationsprodukten ausschloß. Ähnlich war es im Herbst 1928, der durch Frühfrost anfangs Oktober die Vegetation beendete.

Über die verschiedene Empfindlichkeit der Rebsorten ist folgendes aus den Beobachtungen von 1929 zu entnehmen:

Am empfindlichsten geschädigt waren Reben mit mastigem Holz. In erster Linie ist hier der Portugieser zu nennen, dessen Holz sehr viel Mark und wenig stärkereiches festes Holz enthält. An zweiter Stelle wurden genannt Muskat-Sylvaner, dann Sylvaner, Traminer, Welsch-Riesling, Gutedel, Weißer Burgunder, Blauer Burgunder und Riesling.

So betragen bei Auszählung der erfrorenen Augen in österreichischen Untersuchungen die Frostschäden bei Portugieser und Muskat-Sylvaner zwischen 64 und 88, bei Riesling dagegen nur 23 %.

Über die Widerstandsfähigkeit gegen Winterfrostschaden bei den Amerikanermutterreben gehen die Feststellungen stark auseinander. Jedoch steht ohne Zweifel fest, daß sie durchwegs besser einen Winterfrostschaden überwinden als Europäerreben (*vitis vinifera*). Meistens waren nur die obersten Augen der über 4 Meter langen Triebe erfroren. Löschnig hat eine eingehende Untersuchung über die Bedeutung und die Ermittlung der Holzreife bei Reben im Jahr 1929 durchgeführt. Von besonderer Wichtigkeit ist dabei die Prüfung des Verhältnisses Mark zu Holz. Je markreicher das Holz ist, um so ungünstiger ist die Holzreife. Es bestehen hierbei große Unterschiede.

Während Solonis ein Verhältnis Holz zu Mark von 2,64 hat, besitzt Riparia 'Portalis 3,9, Kober 5 BB dagegen bereits 4,8 und die Berlandieri-Riparia R 17 6,3, mit anderen Worten einen sechsmal so starken Holzanteil gegenüber dem Mark.

Über das Verhalten der veredelten Reben liegen gleichfalls Beobachtungen von 1929 vor. So berichtet Decker, daß sich in einem Weinberg an der Obermosel veredelte Reben, die zu gleicher Zeit gepflanzt waren

aber verschiedene Unterlagen hatten, ganz verschieden gegen Frostschäden verhielten. Die auf 41 B als Unterlage stehenden Rieslingreben sind ganz erfroren, während die auf 101/14 und Riparia 1 Geisenheim stehenden Rieslingreben den scharfen Winter sehr gut überstanden haben. (Veredlungen auf 41 B haben besonders starken Austrieb.)

Es ist demnach bei den Winterfrostschäden nicht nur das verschiedene Verhalten der unveredelten Europäer- und der Amerikanermutterreben gegen Frostschäden zu untersuchen, sondern auch das Verhalten der Veredlungen. Decker macht mit Recht darauf aufmerksam, daß, wenn auch heute die Winterfrostschäden nur sehr selten katastrophenhaft werden, ein unabsehbarer Schaden entstehe, wenn bei der Umstellung des deutschen Weinbaues eine Unterlagsrebe benutzt werde, die bei einem Winterfrost so gänzlich versagt wie z. B. die 41 B.

Über das Verhalten der Veredlungen bei den Winterfrostschäden von 1928/29 haben wir einige Angaben aus Österreich von Unterlagen, die in Westdeutschland nicht verwendet werden, und die sich verschieden gut bewährt haben. Dagegen finden wir in der Literatur mehrfach, daß sich die weitverbreitete Kober 5 BB als widerstandsfähige Unterlage bewährte.

Die von Löschnig angeregte und verschiedentlich durchgeführte Prüfung auf Holzreife gibt vermutlich sehr gute Anhaltspunkte für eine Beurteilung der Widerstandsfähigkeit gegen Winterfrost. Da sich unreifes Holz nicht zur Veredlung eignet und ein gut Teil des Versagens der Veredlungen in der Praxis auf unreifes Holz zurückzuführen ist, erachten wir eine ständige Überprüfung der Holzreife durch zahlenmäßige Untersuchung des Verhältnisses Holz zu Mark und Beobachtungen der geprüften Veredlungen auf ihr späteres Verhalten für eine sehr wichtige Aufgabe der deutschen Rebenveredlungsanstalten. Es ist möglich, daß die einfache Prüfung des Holz-Mark-Verhältnisses uns erlaubt, auf verhältnismäßig einfache Weise ein Merkmal für Frostresistenz gegen Winterfrostschaden zu finden. Die eigentliche Erprobung läßt sich nur als Laboratoriumsversuch durchführen. Wir können nicht Jahrzehnte abwarten, bis die meteorologischen Umstände wieder einmal einen auffallend starken Winterfrostschaden veranlassen. Wir müssen diese Winterfrostschäden künstlich hervorrufen durch Erfrierungsversuche. Daß dabei große Schwierigkeiten zu überwinden sind, glauben wir nicht. Besonders sind wir überzeugt, daß es der Rebenzüchtung sehr bald gelingen wird, gegen Winterfrost widerstandsfähige Europäer- und Amerikanerveredlungen herzustellen, da eine ganze Reihe recht widerstandsfähiger Sorten bereits vorhanden zu sein scheint.

Da nach allem die Winterfrostwiderstandsfähigkeit sehr mit der Holzreife zusammenhängt und die Holzreife hauptsächlich von der rechtzeitigen oder von der vorzeitigen Beendigung der Vegetationsperiode im Herbst abhängig ist, sind Herbst- und Winterfrostschäden sehr eng verknüpft.

Die Frühfröste im Herbst beenden die Vegetation zu früh, d. h. von ihrem normalen Abschluß. Es tritt Blattfall ein, und damit stellt die Pflanze ihre Assimilation ein. Ist bis dahin das Holz nicht genügend ausgereift, ist besonders nicht genügend Stärke abgelagert, dann ist die Gefahr des Erfrierens der Reben und eines mangelhaften Austriebes im Frühjahr sehr groß.

Nebenbei wirkt sich der Herbstfrost, wenn er unreife Trauben antrifft, in einer Qualitätsverschlechterung, weniger in einer quantitativen Verminderung, recht erheblich aus. Ganze Jahrgänge sind früher unverkäuflich gewesen, z. B. der Jahrgang 1912\*) wegen eines ausgesprochenen Frostgeschmackes. Zwar ist die Kellertechnik in der Lage, den Frostgeschmack zu beheben, doch ist die Tatsache eines unreifen und dadurch minderwertigen Erntegutes nicht aus der Welt zu schaffen. Das Zuchtziel zur Beseitigung der Herbstfrostschäden ist daher: frühreife Trauben und frühreifes Holz. Dieses Zuchtziel ist sicherlich zu erreichen. Wir haben bereits eine Reihe von Rebsorten, die ihre Vegetation so früh beenden, daß selbst ein früh auftretender Frost ausgereifte Trauben antrifft. Diesen schadet ein Frost durchaus nichts, weil bereits hohe Zuckerkonzentration in den Trauben vorhanden ist. An frühreifen Sorten haben wir die Massenträger Malinger, Portugieser und Elbling, die sämtlich geringwertige Weine liefern. Als Frühsorten mit geringer bis mittlerer Qualität sind der Goldriesling und einige rote Trauben anzusprechen, mittlere bis gute Qualität zeigen die Weine aus der Sylvaner mal Rieslingrebe, der Müller-Thurgau.

Ausgesprochene Edelweine erzielt man mit den frühreifenden Sorten: Weißer Burgunder und Sauvignon. Leider wird Sauvignon in Deutschland praktisch überhaupt nicht angebaut; sie ist die Rebe der weißen Spitzenweine von Bordeaux. Mittelfrüh sind der Sylvaner und alle übrigen bisher nicht genannten in Deutschland angebauten Sorten. Praktisch kommen auch für diese Rebensorten kaum mehr Herbstfrostschäden an Trauben vor. Sehr spätreifend von den in größerem Umfang bei uns angebauten Edelsorten ist der Riesling, der in den westdeutschen Weinbaugebieten sehr häufig infolge von Frühfrösten absolut unreif geerntet werden muß. Daß es gelingt, auf Frühreife zu züchten, und daß selbst unter den bisher vorhandenen spätreifenden Sorten schon genügend frühreifende Klone herauszufinden sind, ist gewiß.

Viel wichtiger ist die Züchtung auf Holzreife, weil damit die Widerstandsfähigkeit gegen Winterfrostschaden und die Fruchtbarkeit im nächsten Jahr eng zusammenhängen. Frühreife der Trauben ist nicht gleich-

\*) In Deutschland.

bedeutend damit, daß nun auch das Holz sehr widerstandsfähig gegen Winterfrostschaden ist. Das zeigt am deutlichsten die frühreife Portugieserrebe, deren mastiges, weiches Holz besonders in der Pfalz so häufig leichteren Winterfrostschäden ausgesetzt ist; der allmähliche Rückgang dieser Traubensorte ist dort wahrscheinlich auf ihr Versagen bei Winterfrostschaden zurückzuführen. Dagegen hat beispielsweise der Riesling von allen bekannten Europäern, trotz der Spätreife seiner Trauben, am wenigsten unter Winterfrostschäden zu leiden. Steimer, Avelsbach, teilte uns die Beobachtung mit, daß Rieslingreben mit roten Trieben bei mittleren Herbstfrösten nicht erfroren, daß sie also nicht wie die grüntriebigen ihre Blätter verloren.

Bei Klonen mit sehr hohen Erträgen finden wir häufig geringere Widerstandsfähigkeit gegen Frostschaden. So wurde in der Pfalz 1929 festgestellt, daß gerade die reichtragenden Stöcke mehr dem Winterfrost zum Opfer fielen. Die Zuchtziele für Resistenz gegen Herbstfrostschaden sind demnach:

1. Frühreife der Trauben. Dieses Ziel ist leicht zu erreichen, und Prüfungen auf Zusammensetzung des Mostes sind einfach.
2. Das wesentlichere Zuchtziel ist die Erzielung eines Holzes, das so gut ausgereift ist, daß ihm weder die Herbst- noch die Winterfröste Schaden zufügen. Die Prüfung wäre die gleiche wie gegen Winterfrostschäden, und vermutlich wird die laboratoriumsmäßige Prüfung auf Frostresistenz zeigen, daß die Reben mit günstigem Holz-Mark-Verhältnis die geeigneten sind, so daß diese einfache Untersuchungsmethode bei Massenuntersuchungen genügt.

Auf 60 Millionen RM in einem Jahr können sich die Frühjahrsfrostschäden im Weinbau belaufen (1926). Auf 80 Millionen sogar wurden sie 1928 geschätzt! Manche besonders gefährdeten Gegenden an der Mosel, der Saar und der Ahr haben mit einem mehr oder weniger großen Ertragsausfall der Nebenlagen in jedem zweiten Jahr durch Frühjahrsfrostschäden zu rechnen. Das Auftreten der Frühjahrsfrostschäden ist weit mehr als das der Winterfrostschäden vom Gelände abhängig. Die besonders gefährdeten Lagen sind bekannt; sie liefern zwar selten besonders reife, aber durchaus nicht immer qualitativ geringwertige Weine. Mengenmäßig stehen sie in den Jahren, in denen kein Frostschaden eintritt, sogar an der Spitze aller Lagen. Der Schaden tritt dadurch ein, daß die jungen Triebe abfrieren. Das bedeutet einen Ausfall an Trauben, aber auch, wenn der Austrieb schon weit gegangen ist, eine Schwächung des Stockes, die sich noch 2—3 Jahre später bemerkbar machen kann.

Je weiter der Austrieb erfolgt ist, um so gefährlicher ist die Wirkung des Frostes. Die Beiaugen, die dann, wenn der Haupttrieb noch sehr klein war, als er erfroren, unter Umständen recht gut austreiben und eine ganz beachtliche Ernte liefern können, sind bei starkem Austrieb des Hauptauges meist ohne Reservenährstoffe und Triebkraft.

Nur wenige Rebsorten sind auch auf Trieben fruchtbar, die aus dem alten Holz kommen. Aus den Wasserschossen läßt sich wohl der Stock wieder aufbauen und fruchtbares Holz für das nächste Jahr gewinnen, doch ist die Ernte im laufenden Jahre in den meisten Fällen gleich Null und nur bei wenigen Rebsorten, beispielsweise beim Riesling, nennenswert.

Sind die Augen eben erst geschwollen, dann ertragen die Reben viel niedrigere Kältegrade als bei stärkerem Austrieb. Der Grund ist in dem physiologischen Zustand des Zellsaftes zu suchen (siehe Zahn<sup>425, 426</sup>).

Wichtig ist für uns die Tatsache, daß ein später Austrieb einen Schutz der Reben gegen Frühjahrsfrostschaden bedeutet, und daß eine zweite Möglichkeit des Überwindens des Frostschadens darin besteht, daß Rebsorten mit gut austreibenden Beiaugen und fruchtbaren Geiztrieben auch einen kräftigen Frostschaden auszuhalten vermögen. Hier ist besonders die Müller-Thurgau-Rebe hervorzuheben, welche selbst nach katastrophalen Frösten im Frühjahr und restlosem Erfrieren aller grünen Triebe, selbst wenn diese schon recht lang waren, erstaunlich hohe Erträge aus den Beiaugen lieferte.

Die Zuchtziele bei Frühjahrsfrösten sind demnach:

1. Später Austrieb.
2. Guter Austrieb der Beiaugen und hohe Fruchtbarkeit der Beiaugen, wenn durch Frostschäden die Triebe aus den Hauptaugen zerstört sind.

Die Prüfung des ersten Zuchtzieles, des späteren Austriebes, ist sehr einfach und kann durch die Aufzeichnungen der Vegetationsphasen, also durch phänologische Beobachtungen, welche anlässlich der Züchtung der Reben auf andere Eigenschaften erfolgen, mit durchgeführt werden.

Die Prüfung auf Fruchtbarkeit der Beiaugen ist durch Anbau der Züchtungen an besonders frostempfindlichen Stellen, wo mit Sicherheit jährlich ein oder mehrere Frühjahrsfröste zu erwarten sind, möglich, notfalls auch durch Erfrierenlassen von Topfreben.

Es steht fest, daß die wirtschaftliche Bedeutung der Rebenzüchtung auf Resistenz sowohl gegen Frühjahrs- als auch gegen Herbst- und Winterfröste sehr groß ist. Die Schäden, die die Fröste anrichten, aber auch die hohen

Kosten der Schadenverhütung durch Heizen usw. lassen uns das klar erkennen. Die Aussicht auf baldige erfolgreiche Zuchtergebnisse ist gerechtfertigt, wenn man sieht, daß ein Teil der heute vorhandenen Sorten bereits in dem einen oder anderen Falle dem Zuchtziel nahe kommt und daß die Möglichkeit, geeignete Typen zu finden, bei dem ungeheuer reichhaltigen Material, das in den Rebanlagen des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Züchtungsforschung in Müncheberg vorhanden ist, sehr nahe liegt.

Es ist hier nicht möglich, alle Kulturarten aufzuzählen, bei denen eine Züchtung auf Frostresistenz in Frage kommt. Denken wir nur an unsere Obstarten, an die Gemüse, aber auch an unsere Feldfrüchte. Gerade die letzteren, bei denen infolge der Größe der Anbauflächen und des geringeren Hektarwertes die Aufwendungen für künstliche Frostschadenverhütung nie zu beschaffen wären, spielt die Züchtung als Frostschadenverhütung eine ausschlaggebende Rolle. In den Mooregebieten Deutschlands kann nur mit großem Risiko Winterroggen angebaut werden, weil seine Blütezeit, in der er empfindlich gegen Frost ist, noch in die Frühjahrsfrostperiode fällt. Vielfach wird hier der weniger ertragreiche Sommerroggen nur aus diesem Grunde angebaut, weil dessen Blütezeit entsprechend später liegt. Sicherlich lassen sich Roggensorten züchten, die während der Blüte widerstandsfähig gegen Frost sind.

Die Kartoffel wird durch Fröste im Frühjahr teilweise erheblich geschädigt, zumal die Frühkartoffel. Viele Millionen Mark Ertragsausfall an Frühkartoffeln brachte allein das Jahr 1936 durch einen Kälterückfall im April. Hier ist es bereits ganz sicher, daß in absehbarer Zeit frostwiderstandsfähige Sorten vorhanden sein werden. Das Kaiser-Wilhelm-Institut für Züchtungsforschung hat durch Expeditionen aus der Urheimat der Kartoffel, den Anden, Wildkartoffeln holen lassen, die an ihrem Standort in 2—3000 m Höhe jährlich viele scharfe Fröste während der Vegetationszeit überstehen. Wenn auch ihre Einkreuzung mit den in Europa angebauten Sorten Schwierigkeiten macht, so sind diese doch überwindbar.

Jedenfalls ist die Züchtung auf Frostwiderstandsfähigkeit die zweifellos beste und sicherste Art der Frostschadenverhütung und dazu noch die wirtschaftlichste.

### B. Die Pflanzenernährung und Düngung als Mittel gegen Frostschäden.

In dem Abschnitt über Kältetod bei Temperaturen unter Null Grad sind verschiedene Autoren angeführt, die über die Zusammensetzung des Zellsaftes in Bezug auf Frostschäden gearbeitet haben. Zusammenfassend ist zu sagen, daß der Zellsaft aus einem Gemisch von gelösten, ungelösten und kolloidalen Stoffen besteht. Die ungelösten Stoffe, die sich also, wenn man vom kolloidalen System spricht, im Gelzustande befinden, sind scheinbar ohne Einfluß auf den Gefrierpunkt des Zellsaftes. Von Einfluß hierauf sind dagegen offensichtlich die gelösten Stoffe. Je größer der Gehalt an gelösten Stoffen im Zellsaft ist, seien es Nährsalze oder Assimilate (Zucker usw.), um so niedriger liegt der Gefrierpunkt.

Die zwischen beiden Systemen, zwischen dem gelösten und ausgeflockten stehenden kolloidalen Stoffe stellen einen labilen Zustand dar. Sie wirken teilweise, wenn auch entsprechend schwächer, im Hinblick auf die Gefrierpunktserniedrigung wie die gelösten Stoffe. Es gibt nunmehr offensichtlich Salze, die vom Saftstrom der Pflanze aufgenommen und in die Zellen transportiert werden, welche den labilen Zustand des kolloidalen Systems nach der Solseite zu, und solche, welche ihn nach der Gelseite zu verschieben können.

(Wir haben auf Seite 45 bereits angeführt, daß die beiden Nährstoffe Kalium und Kalzium sich im Zellsaft entgegengesetzt verhalten müssen, und zwar scheint Kalium in der kolloidalen Lösung den Zustand des Systems mehr zur größeren Dispersion hin zu verschieben, Kalzium dagegen Ausflockung hervorzurufen.)

Bestätigt nun die Praxis, daß Kalium und Kalksalze von Einfluß auf die Frostschäden sind? Es liegen hierzu eine große Menge von Einzelbeobachtungen vor, jedoch sind uns leider keine exakten wissenschaftlichen Versuche bekannt. Immer wieder betonen die Praktiker, daß auf kaligedüngten Teilstücken eine sehr viel geringere Frostgefährdung vorhanden ist gegenüber kaliarmen Parzellen. Das hängt nicht nur damit zusammen, daß die Pflanzen unterernährt sind, weil solche Fälle bei Stickstoff- oder Phosphorsäuremangelparzellen fast nicht auftreten.

Als eklatantes Beispiel hierfür führen wir die Düngungsversuche auf dem Lehr- und Versuchsgut Blankenhornsberg in Baden nach dem Winterfrost 1929 an (Kessler, O.<sup>192</sup>). Deutlich zeigte sich bei diesen Versuchen, daß die gänzlich ungedüngte Parzelle gegenüber der Volldüngungsparzelle einen erheblich größeren Frostschaden aufweist (Abb. 163, Taf. 2).

Aber nicht nur die völlig ungedüngte Parzelle fällt durch ihre hohe Zahl von Rebstöcken auf, die unter dem Einfluß des Winterfrostes 1929 abgestorben sind, sondern in noch höherem Maße die gedüngte Parzelle, welche kein Kali erhalten hat, also nur mit Phosphorsäure und Stickstoff versehen war. Dem Augenschein nach sind die Schäden hier noch viel größer, unseres Erachtens ein Beweis dafür, daß Kalimangel erhöhten Frostschaden bedeutet (Abb. 164, Taf. 2).

In einem 41 Jahre alten Rieslingweinberg in Blankenhornsberg lief gleichfalls ein Kalidüngungsversuch, der im Frühjahr 1929 beim Austrieb große und unterschiedliche Winterfrostschäden zeigte (Tabelle 11).

Tabelle 11.

	Ungedüngt	Volldüngung mit 50 % Kalisalz	Volldüngung mit schwefelsaurem Kali	Düngung ohne Kali
Von je 1200 Stück waren				
ganz erfroren . . . . .	71	84	56	283
schlecht ausgetrieben . . . . .	446	361	304	608
gut ausgetrieben . . . . .	683	755	840	309

Wenn die schlecht ausgetriebenen Stöcke zur Hälfte den erfrorenen und zur Hälfte den gesunden zugerechnet werden, ergibt sich das in Abbildung 18 gegebene Bild des Stockausfalles.

Auch dieser Versuch ergab das gleiche Bild, und wiederum war in auffallender Weise das Fehlen des Kalis ausschlaggebend; denn die Ausfälle auf dem ungedüngten Teilstück waren mit 25 % nur wenig höher als die normalerweise zu erwartenden. Ihnen gegenüber betrug die auf dem kalifreien Feld das Doppelte.

An weiteren Versuchen dieser Art sei der Düngungsversuch an Sylvanerreben auf dem Weingut Geheimrat Lichtenberg bei Wachenheim in der Pfalz angeführt, bei welchem gleichfalls auf dem Kalimangelteilstück fast völlige Vernichtung der Reben nach dem Winterfrost von 1929 zu verzeichnen war, während im Gegensatz dazu die mit Kali gedüngten Teilstücke ausgezeichneten Wuchs und keinen Ausfall zeigten (Abb. 165, 166, Taf. 2).

Im Fall Blankenhornsberg handelt es sich um einen ausgesprochenen Kalkboden, der zu über 50 % aus kohlen-saurem Kalk besteht. Nirgendwo treten die Erscheinungen des Kalimangels als Frostschutz so scharf hervor wie gerade auf Kalkböden. Auch der Boden bei Wachenheim ist ein kalkhaltiger Boden, wenn auch nicht in dem Maße wie der Boden von Blankenhornsberg.

Von allen deutschen Weinbaugebieten werden bei Winterfrösten am schwersten das nordbadische Weinbaugebiet bei Tauber-Bischofsheim und das fränkische Weinbaugebiet heimgesucht, und zwar auch dort wieder im besonderen Maße die schweren Kalkböden.

Das staatliche Weingut Lauda in Nordbaden mit extrem-schweren Kalkböden hat häufig neben Frösten in der Vegetationszeit auch unter Winterfrostscha-den zu leiden. O. Kessler konnte im Frühjahr 1937 nach dem Austrieb feststellen, daß in einem Düngungsversuch bei Sylvanerreben verschiedenartige Frostschäden auftraten, und zwar waren die stickstofffreien Parzellen geschädigt und im besonderen Maße die mit sehr hohen Stickstoffgaben) die Düngung betrug 80 kg K<sub>2</sub>O, 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und 40, bzw. 60, bzw. 80 kg N). Hier erscheint ein neuer Faktor in der Ernährungsfrage, der frostscha-denverstärkend wirkt. Dies ist Unterernährung am Nährstoff Stickstoff (N), die sich in mangelnder Holzreife im Herbst bemerkbar macht. In unserem Fall war der Wachstumsfaktor Stickstoff allzusehr im Minimum.

Übermäßige Ernährung mit Stickstoff hat die gleiche ungünstige Folge. Starke Stickstoffdüngung treibt die Stöcke zum mastischen Wachstum an und verlängert die Vegetation. Es kommt auf den stark mit Stickstoff gedüngten Pflanzen nicht zu einem rechtzeitigen Abschluß der Vegetation und zur rechtzeitigen Holzreife. Unreifes Holz aber erliegt, wie wir häufig dann sehen können, wenn die Pflanzen im Herbst infolge von Frühfrösten ihre Vegetation zu früh beenden mußten, im darauffolgenden Winter leichter den Winterfrösten.

Überstarke Stickstoffdüngung führt, besonders wenn sie einseitig vorgenommen wird und andere Nährstoffe im Minimum bleiben, auch bei Frühjahrsfrösten häufig zu auffallenden Schädigungen. So klagten württembergische Weinbauern über große Ausfälle bei Weinbergen, die stark mit Kalkstickstoff gedüngt waren, wobei es offensichtlich nicht an der Form des Düngemittels lag, sondern an einem stürmischen Austrieb mit mastischem Wuchs als Folge starker Stickstoffdüngung. Die vorhandenen Reservestoffe, die in den Knospen und im reifen Holz abgelagert waren, werden bei dem starken Austrieb im Frühjahr auf größere Zellsaftmengen verteilt. Die Zellsaftkonzentration ist dort demnach geringer, zumal keine Stickstoffsalze im Zellsaft gelöst sind, sondern die Stickstoffverbindungen ausschließlich der ungelösten Phase angehören.

Morphologisch kommt zweifelsohne noch hinzu, daß auch die Gestalt der Zellen auf den zu erwartenden Frostschaden von Einfluß ist. Kleinzellige Pflanzen haben höhere osmotische Drucke als großzellige, und da bei starker Stickstoffdüngung großzelliges Wachstum eintritt, wird auch der osmotische Druck geringer sein als bei

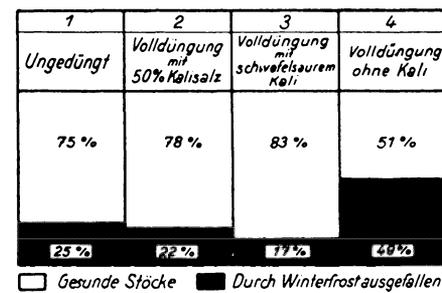


Abb. 18. Verstärkter Winterfrostscha-den bei Kalimangel. Beobachtet 1929 im langjährigen Rebdüngungsversuch Blankenhornsberg.

normalem Wachstum mit kleineren Zellen. Die Folge ist, daß bei relativ geringem osmotischen Druck eher Wasser aus dem Zellsaft in die Interzellularräume austritt und dort gefriert.

Häufig findet man, daß starke Stallmistgaben höhere Frostgefährdung bei Frühjahrsfrösten hervorrufen. Zunächst wird auch hier die Ursache in einer reichlichen Stickstoffaufnahme der Pflanzen bestehen. Wir wissen aus Analysen von Pflanzen aus Rieselfeldern, daß übermäßige Stickstoffmengen von Pflanzen aufgenommen werden können und daß demnach Überdüngungen mit Stallmist gleichbedeutend sind mit überstarker Stickstoffaufnahme.

Aller Wahrscheinlichkeit nach ist aber der größere Einfluß der so häufig beobachteten frostverstärkenden Wirkung einer frischen Stallmistdüngung im Frühjahr darin zu suchen, daß das Wärmeleitvermögen des Bodens ungünstiger wird. Nähere Ausführungen hierzu bringen wir auf Seite 234.

Um nun die Frage zu klären, ob Kalisalze die Frostgefährdung der Pflanze beeinflussen, hat Kessler 1934 mit Unterstützung der Landwirtschaftlich-Technischen Kalistelle begonnen, in 15 Weinbergen an der Obermosel, der Sauer und der Ruwer Düngungsversuche einzurichten, bei welchen Kalimangelparzellen solche mit sehr starker Kalidüngung gegenüberstanden. Diese Versuche sind 1936 durch die Provinzial-Lehranstalt für Weinbau, Obstbau und Landwirtschaft Trier übernommen worden und werden heute noch weitergeführt. Ohne dem abschließenden Ergebnis vorzugreifen, können wir augenblicklich etwa folgendes sagen:

Die kaligedüngten Teilstücke brachten durchschnittlich mehr Trauben als die ungedüngten. In den wenigsten Fällen konnte jedoch festgestellt werden, ob es sich hier um eine Düngewirkung oder um eine frostschadenmindernde Wirkung handelt. Nur in einigen wenigen Fällen zeigten die Versuche bereits jetzt geringere Frostschäden auf den Volldüngungsteilstücken mit Kali gegenüber dem kalifreien Versuchsfeld. Die Versuche werden fortgesetzt, da einschneidende Ergebnisse erst dann zu erwarten sind, wenn auf den ungedüngten Versuchsfeldern ein gewisser Kalihunger eingetreten ist. Es mußten zunächst einmal bestehende Weinberge benutzt werden, und da Weinberge üblicherweise reichlich gedüngt werden, enthielten die Böden Vorräte an Kali.

Kessler setzte bei der Anlage der Versuche einen Teil auf schwere Kalkböden der Obermosel und der Sauer, während der Rest auf kalkarmen Schieferböden angelegt ist. Leider zeigten die Versuche auf den Kalkböden nicht, was ursprünglich erwartet wurde, ein besonders gutes Wechselspiel zwischen Kalk und Kali. Die nachgeholteten Bodenanalysen ergaben die überraschende Tatsache, daß bei diesen Kalkböden ungewöhnlich reiche Kalivorräte vorhanden sind, die bis zu 6 % Gesamtkali ausmachen. Daß hier keine Kaliwirkung zu erwarten war, ist klar. Die Forderung für das Versuchswesen ist daher die, daß solche Versuche zunächst einmal durchgeführt werden sollten auf schweren Kalkböden, die kaliarm sind; denn hier wird sich die Kaliwirkung am ehesten zeigen können.

Die praktischen Schlußfolgerungen, die aus den Düngungsmaßnahmen zu ziehen sind, sind an anderer Stelle behandelt (siehe Seite 234).

### C. Die Auswirkung der Frostschäden und die Behandlung frostgeschädigter Pflanzen.

Das Handbuch von Sorauer<sup>365</sup>), das neben der Arbeit von Bělehrádek<sup>49</sup>) die umfangreichste Literaturzusammenstellung über Gefrieren und Erfrieren, sowie überhaupt über die Einwirkung niederer Temperaturen auf die Pflanzen gibt, berichtet auch ausführlich über das Aussehen der Frostschäden bei den verschiedensten Pflanzen. Darauf einzugehen würde hier zu weit führen, jedoch ist es notwendig, festzustellen, daß auch nach dem Eintritt von Frostschäden, sofern sie nicht zum völligen Absterben der Pflanzen geführt haben, Maßnahmen ergriffen werden können, die die Folgeerscheinungen mildern.

Als Folgeerscheinung von Winterfrösten treten z. B. vielfach Frostwunden auf, in die sich, wenn sie nicht rechtzeitig behandelt werden, Pilzkrankheiten einnisten. Der Baumkrebs bei Obstbäumen, die Mauke bei Reben und eine Reihe ähnlicher Erscheinungen sind mittelbare Folgen von Frostschäden.

Wenn bei Frühjahrsfrösten die grünen Triebe von perennierenden Pflanzen geschädigt sind, so ergreift man hier besondere Maßnahmen in Schnitt und Laubbehandlung, die die Folgeerscheinungen der Frostschäden mildern. Wir wollen einen solchen Fall kurz an den Reben erläutern, um dadurch ein Musterbeispiel zu geben, wie man in ähnlichen Fällen verfahren kann. In erster Linie folgen wir hierbei den Ausführungen von Lüstner-Molz<sup>226</sup>), Wolf<sup>407, 408</sup>) und Scheu<sup>335</sup>).

Wenn der Frost schon weit ausgetriebene Reben betroffen hat, kann unter Umständen nicht nur der Ertrag des laufenden Jahres völlig verloren sein, sondern auch der nächstjährige Traubenertrag geschädigt werden. Die Fälle sind nicht selten, wo sich die Schädigung sogar auf zwei Jahre erstreckt. Der Direktor der Preußischen Weinbaudomänen in Trier, Dr. Decker, hat auf dem etwa 100 Morgen großen Weingut Avelsbach, seit er dort jedes Jahr durch Heizung Frostschadenverhütung betreibt, 200 000 Liter jährlich mehr geerntet. Das Holzwachstum war nach den Frostjahren 26, 27, 28 so kümmerlich, daß auch in den Nichtfrostjahren nur mäßige Ernten möglich waren.

Wird der Stock stark zurückgeworfen, weil er schon weit im Austrieb war und die Triebe restlos erfroren, dann muß man ihn unter Umständen völlig neu aufbauen. Man kann diesen Aufbau des Stockes mit Hilfe von Wasserschosse vornehmen, und man läßt dann, wenn die jungen grünen Triebe völlig erfroren sind, mehr Wasserschosse am Stock als in normalen Jahren. Diese Wasserschosse werden als Zielhölzer für den weiteren Aufbau des Stockes an den Pfahl aufgebunden, geheftet und im nächsten Jahr als Büglinge verwendet. Sie bringen zwar nur wenig Trauben, weil Wasserschosse erst im zweiten Jahr fruchtbar zu sein pflegen. Man muß aber zu dieser Maßnahme greifen, wenn der Austrieb soweit erfolgt war, daß die Beiaugen schon weitgehend geschwächt waren und keine gesunden Triebe mehr zeigten.

Ist der Stock in noch nicht weit ausgetriebenem Zustand von Frostschaden befallen worden oder sind nur Teile des Triebes (es sind dann stets die jüngsten Teile) erfroren, so baut man den Stock mit Hilfe des Grünschnittes auf. Man versteht darunter den Rückschnitt der Sommertriebe und das Ausschneiden der erfrorenen Schosse bis auf gesunde und lebensfähige Triebteile. Je nach dem, ob der Frost den Trieb ganz oder nur teilweise zerstört hat, ist der Grünschnitt verschieden durchzuführen. Wolf<sup>407)</sup> gibt hierzu spezielle Anleitung, die sich auf seine eigenen Versuche nach dem Frostjahr 1926 und auf die von Müller-Thurgau, Dufour und anderen durchgeführten und von Lüstner-Molz beschriebenen Versuche stützen.

Es sind zwar auch Bedenken gegen diesen Rückschnitt geäußert worden, doch sprechen alle exakten Versuche dafür, daß man dadurch wenigstens noch kleine Erträge und vor allem ein noch brauchbares Tragholz für das nächste Jahr rettet. Wenn Scheu<sup>335)</sup> der Ansicht ist, daß man den Rückschnitt nicht sofort vornehmen, sondern erst etwas abwarten soll, so ist das kein Widerspruch zu der Auffassung von Wolf und uns; denn man wird zweckmäßig zusehen, bis die Frostschäden klar erkennbar sind; das kann allerdings unter Umständen einige Tage dauern. Dann aber ist keine Zeit mehr zu verlieren und der Rückschnitt sofort vorzunehmen.

Vor allem darf man nicht vergessen, daß die nachkommenden Triebe kümmerlicher und empfindlicher gegen Pilzkrankheiten sind. Die Peronospora und das Oidium müssen stärker bekämpft werden. Um das Auftreten von Schimmelpilzen an den Schnittflächen zu unterdrücken, wird bei der ersten Bespritzung der Zusatz von Cottonölschmierseife empfohlen (Wolf<sup>407)</sup>).

Um die Triebbildung zu unterstützen, ist in den geschädigten Weinbergen, selbst wenn ausreichende Düngung ursprünglich vorhanden war, durch schnellwirkenden Salpeterstickstoffdünger nachzuhelfen. In Böden mit erfahrungsgemäß starkem Wuchs soll man mit Stickstoff etwas zurückhalten, um ein anormales Verblühen der noch vorhandenen Gescheine zu verhindern.

In ähnlicher Weise wird man durch den Rückschnitt der geschädigten Sommertriebe bei anderen perennierenden Kulturen eine Milderung der Frostschäden erreichen. Bei den annuellen Kulturen, also auch bei der Kartoffel, ist ein Eingriff kaum möglich. Hier wird man höchstens durch Kopfdüngung das Wachstum wieder etwas anregen und dadurch vielleicht eine Besserung erreichen. Einzig bei Gräsern und Klee kann noch etwas gerettet werden, wenn man sofort nach dem Frost schneidet. Dann ist nicht nur dieser Austrieb gerettet, sondern auch, wie der Augenschein lehrt, ein viel besserer zweiter Schnitt zu erwarten.

## v. Die Bedeckungsmaßnahmen.

### A. Geschichtliches über die Bedeckung als Frostschutz.

Das Bedecken oder Einhüllen von Kulturpflanzen, um sie vor Frostschaden zu bewahren, ist sehr alt. Aus der Literatur besitzen wir die ältesten Berichte von Frankreich. Aus der Vielzahl der Berichte beschränken wir uns auf diejenigen, in welchen Temperaturmessungen gemacht worden sind.

So behauptet 1821 Wells<sup>399)</sup>, unter dachförmig zusammengebogenen Pappbogen eine Übertemperatur von 5° gegenüber dem ungeschützten Raum erzielt zu haben. Nähere Angaben, z. B. ob die Differenz der Minima gemeint ist, fehlen aber. Etwa zur gleichen Zeit benutzte man nach André<sup>18)</sup> kleine haubenförmige Stroharben auf jedem Weinbergspfahl als Frostschutz. Die häufig verwandten Abdeckungen mit Reisig und Tannenästen werden verschieden beurteilt. Filz<sup>103)</sup> behauptet, daß die mit Ästen bedeckten Reben leichter erfrieren als die unbedeckten, während man in der Champagne damals (etwa 1830) gute Erfolge meldete.

Olivier de Fiolle<sup>104)</sup> berichtete 1897 über Frostschutz in der Champagne und Burgund unter großen Tüchern, wobei er gleichzeitig angibt, daß diese Art des Frostschutzes keineswegs neu sei. Müller-Thurgau<sup>270)</sup> verwendete gleichfalls wagerecht ausgespannte Tücher und ließ auf der Seite die Tuchenden herabhängen; er baute gewissermaßen ein Zelt (1894).

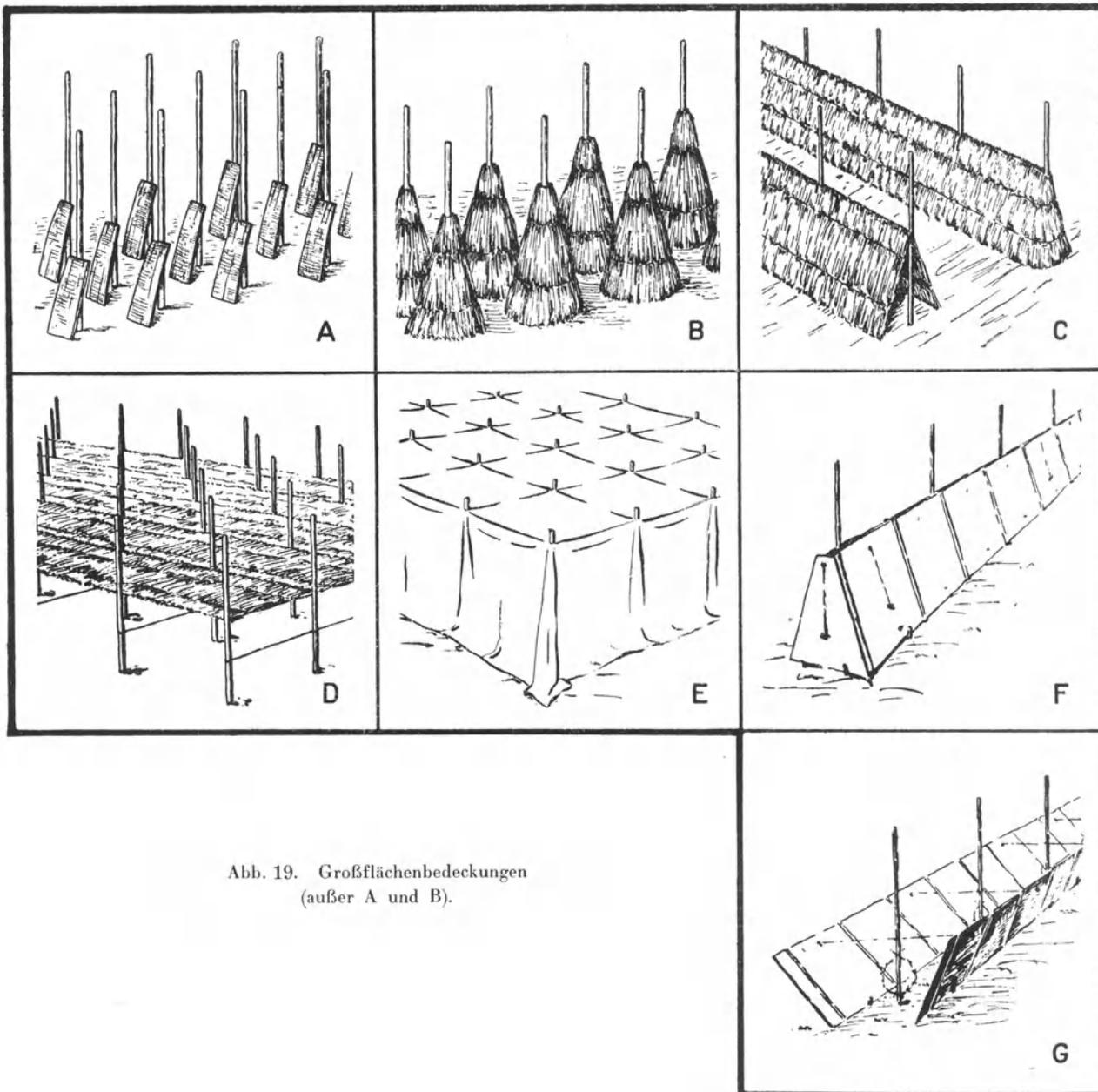


Abb. 19. Großflächenbedeckungen  
(außer A und B).

Weiden und Binsen, Holzlatten und Faßdauben (Abb. 19 A) benutzte man gegen Ende des 19. Jahrhunderts in der Champagne<sup>285</sup>). Zum erstenmal tauchten um diese Zeit auch Strohüllen nach Art von Flaschenhüllen auf (Abb. 19 B).

Junganlagen im Weinbau wurden 1903 nach Robin<sup>319</sup>) durch Dachziegel geschützt, die man schräg an den Weinbergspfahl anlegte. Foex<sup>107</sup>) sah in möglichst vielen Pfählen im Weinberg eine geeignete Schutzmaßnahme. Nach seiner Angabe soll die Temperatur der bepfählten Weinberge um 3° höher liegen als die der unpfpählten.

Es gab also bis 1900 schon den Schutz einzelstehender, vorwiegend niedriger Pflanzen durch kleine Hauben und Schirme, sowie die Bedeckung größerer Flächen durch Matten und Tücher.

Man bemühte sich anfangs, Frostschirme zu bauen, die die Außenluft möglichst gänzlich abschließen sollten. Das Rebnest von Nieriker<sup>279</sup>) umhüllte die Reben mit Holzwole. Der außerordentliche Zeitaufwand machte eine Verwendung in der Praxis unmöglich (Zweifler<sup>431</sup>).

Etliche Jahre nach den Versuchen mit dem Rebnest, die Zweifler in Geisenheim durchführte, hat man sich auch in Niederösterreich, wohl zum erstenmal, mit der Anwendung von Frostschirmen befaßt. Der Weinbauer Navratil benutzte kegelförmige Schirme aus Zeitungspapier, womit die Reben überdeckt wurden. Sie verminderten nach Angabe von Löschnig<sup>224</sup>) im allgemeinen den Schaden nur wenig; sie gaben aber den Anstoß zur Ausbildung neuer Frostschirmtypen.

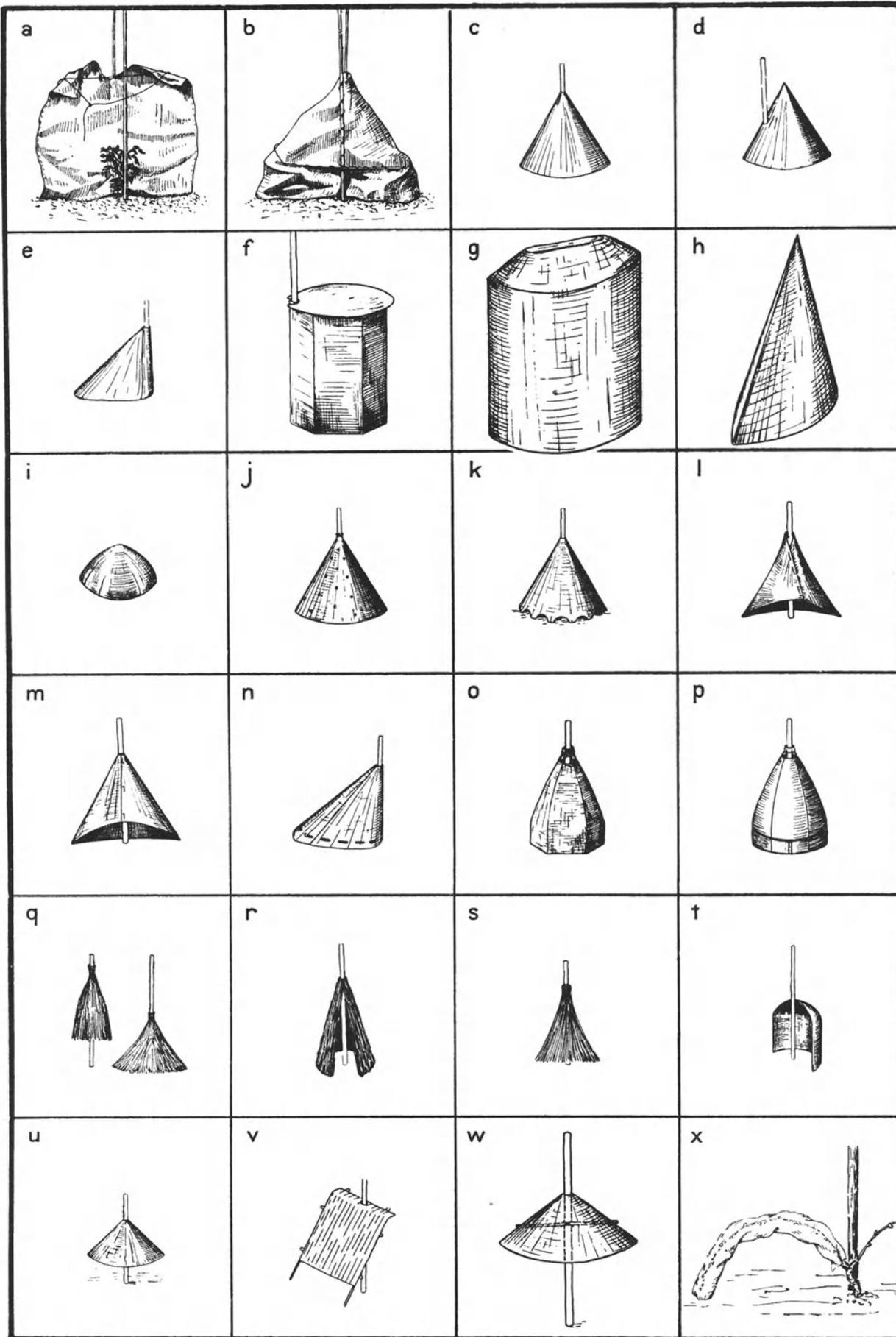


Abb. 20. Einzelbedeckungen.

Während der Versuche erkannte man immer mehr, daß völliger Luftabschluß der Pflanzen von der Außenluft sich ungünstig auswirken konnte. Infolgedessen brachte man anfangs Ventilationslöcher in den Frostschirmen an und ging dann zu offenen Typen über (Abb. 20 j, k, n, u).

Die wenigen Jahre (1904—1913) später von Hoëpp auf den Preußischen Weinbaudomänen Avelsbach, Ockfen und Serrig im Regierungsbezirk Trier unternommenen Versuche, die Weinstöcke durch Jutehauben zu schützen, sind im großen und ganzen als unpraktisch wieder aufgegeben worden (Abb. 20 a, b). Im Anschluß an diesen Mißerfolg hat Hoëpp den Schutz durch Überspannen ganzer Rebzeilen erst durch Jute-, später durch Nesseltücher durchgeführt und dabei zunächst günstige Erfolge erzielt (Abb. 170, Tafel 3). Temperaturmessungen wurden leider nicht vorgenommen und der Erfolg nur nach dem Augenschein bestimmt. Wenn gleichartig gelegene Weinberge ohne Schutz erfroren waren, die überdeckten jedoch nicht oder wenig, so wurde auf einen Erfolg der Bedeckung geschlossen. Ein Vorteil der dabei benutzten Anbringungsart der Tücher war der, daß man dieselben schon vor Frostgefahr, und zwar aufgerollt anbringen und deshalb bei drohender Frostgefahr rasch über die Zeilen ausbreiten konnte. Nach Angaben des Weinbaudomäneninspektors Steimer in Avelsbach und des Güterdirektors Richter in Trier, die diese Versuche jahrelang auf den genannten Domänen miterlebt haben, wurde später völlig von der Überdeckung Abstand genommen. Neben den großen Kosten für die Anlage und dem Zeitaufwand stellten sich Schäden ein dadurch, daß bei Wind die ausgespannten Tücher die frischen Triebe abschlugen. Außerdem kam es vor, daß die Reben unter den Tüchern erheblich mehr erfroren als die unbedeckten. In einem besonderen Fall, auf den Steimer sich genau besinnen kann, waren die unbedeckten Reben völlig gesund geblieben, die bedeckten dagegen restlos erfroren, was einen Schaden von einigen Zehntausend Mark bedeutete. Dieser Fall trat ein, als auf die bereits ausgespannten Tücher am Abend ein Regen niedergegangen war, wonach die Tücher im Laufe der Nacht vereisten, sich durchbogen und dabei mit den grünen Trieben in Berührung kamen.

In den Haushaltsplänen der Weinbaudomäne Trier waren damals jährlich für Erneuerung der Tücher 10—20 000 RM. eingesetzt. Der Gesamtaufwand für diese Frostbekämpfung mag auf den drei Gütern etwa 150 000 RM. betragen haben.

Auch Adolf Huesgen in Traben-Trarbach hat um 1908 auf seinem Weingut Sommerau an der Ruwer Bedeckungsversuche mit langen Leinwandtüchern durchgeführt. Um die Reben tagsüber der Strahlung auszusetzen, bei beginnendem Frost aber die schützende Stoffdecke rasch ausbreiten zu können, war der Stoff auf breiten Rollen aufgewickelt und konnte zur Zeit der Gefahr über die Kulturen abgerollt werden. Neben den hohen Kosten für diese Einrichtung war auch der Erfolg nicht immer befriedigend. Als die Tücher nach wenigen Jahren der Benutzung brüchig geworden waren, wurden sie daher nicht mehr erneuert.

Zum Schutz von jungen Rebfeldern schlug Molz<sup>226)</sup> vor, die Triebe einfach mit Torfmull oder ähnlichem Material zu überdecken. Dies erwies sich jedoch nicht immer als erfolgreich. Besser ist schon, zur Bedeckung von auf dem Boden aufliegenden Pflanzen, wie z. B. Erdbeeren, eine Strohecke auszubreiten, die nach amerikanischen Urteilen (siehe unten) einen guten Schutz verleiht.

Um 1910 begann man in den Vereinigten Staaten mit einer systematischen wissenschaftlichen Untersuchung der Bedeckungsmethoden. Dort sollten vor allem Obstbäume, insbesondere Citrusplantagen, vor Winterfrösten geschützt werden, und zwar in subtropischen Gegenden, so daß die Entwicklung bald einen anderen Weg gehen mußte; denn die Bedeckung einzelner oder gar vieler Bäume ist, ganz abgesehen von dem Wirkungsgrad, immer schwierig und vor allem zeitraubend und teuer. Aus diesem Grunde führte man auch in Amerika nur verhältnismäßig wenige Versuche mit Bedeckungsmaßnahmen durch; ihre Ergebnisse sollen hier wiedergegeben werden.

Mc Adie, der Mandelbäume mit großen Papierhüllen bedeckte und die nächtlichen Temperaturunterschiede zwischen dem geschützten und dem freien Außenraum messend verfolgte, berichtet von einem ungefähren Effekt von 2,8° C als Differenz der Minima. Da dieser Betrag häufig unzureichend ist, empfiehlt er, unter Umständen Schüsseln mit Wasser oder noch besser kleine Heizer unter die Umhüllung zu bringen. Einen besonderen Vorteil verspricht er sich jedoch von der Verlangsamung des Auftauens gefrorener Blüten unter der Papierhülle, weil hierdurch der entstehende Schaden etwas gemindert werden könne.

Ausführlich berichtet Young über seine Versuche. Im Dezember 1927 wurden zwei Orangenbäume mit Säcken aus wasserfestem Papier bedeckt, um das Maß des Frostschutzes zu ermitteln. Die Papierzelte wurden in elf aufeinander folgenden Tagen und Nächten über den Bäumen gelassen; sie wurden durch Regen und heftigen Sturm beschädigt. In kalten Nächten lag das Minimum unter den Hauben im Mittel nur um 0,8° C höher als im Freien. In den kältesten Nächten betrug der Unterschied 1,2° C. Die Bäume innerhalb des Zeltens waren stets feucht. Die hohe tägliche Lufttemperatur an sonnigen Tagen, die 8—13° C höher war als im Freien, machte die Blätter sehr weich und für Frostschäden empfindlich.\*) Das Laub, das in Frostnächten mit dem Zelt in Be-

\*) Die gleiche Beobachtung machte O. Richter in Trier, der besonders auf das Vergeilen der Reben infolge mangelnden Lichtgenusses hinweist.

rührung kam, wurde beschädigt, während das Laub ungeschützter Bäume unter den gleichen Umständen keinen Schaden erlitt. Ein zufriedenstellendes Frostschutzmittel ist somit nach Ansicht von Young die Bedeckung der Obstbäume durch Papierzelte nicht.

Ebenso unbefriedigend ist nach seinen Erfahrungen die Bedeckung von Pflanzen mit Konservenbüchsen oder anderen leicht rostenden Metallgefäßen. Young glaubt die schlechte Wirkung auf die starke Strahlung der mit Rost besetzten Oberfläche der Büchsen zurückführen zu müssen; denn im allgemeinen wirken blanke Metalle als guter Strahlungsschutz.

Werden ganze Obstgärten von mehreren Tausend Quadratmetern Größe mit Stoffen bedeckt, so soll unter der Schutzdecke die Lufttemperatur um 2—3° höher liegen als im Freien. Das Bedecken kleinerer Teile eines Obstgartens oder nur einzelner Bäume zeige keinen nennenswerten Erfolg, auch wenn die Stoffe aus schwerem Material bestünden.

Dagegen bietet nach Young die Bedeckung mit schweren Stoffen tatsächlich einen recht guten Schutz gegen Frostschäden, sofern es sich um niedrig wachsende Pflanzen handelt. Voraussetzung ist jedoch, daß der Stoff selbst dicht genug ist, um als schlechter Wärmeleiter auf seiner Unterseite noch eine verhältnismäßig hohe Temperatur zu besitzen, während seine Oberseite infolge der Strahlung gegen den Himmel sehr kalt wird. Bei seinem Versuch nämlich, Erdbeerfelder während der Blüte mit groben Säcken vor Frostschaden zu bewahren, wurde im Durchschnitt eine 3½° höhere Temperatur in Bodennähe gemessen und somit ein ausreichender Schutz für die Erdbeeren erzielt. Da die Bedeckung jedoch an drei aufeinander folgenden Tagen und Nächten während der Blütezeit liegen blieb, wurde infolge mangelnder Befruchtung eine geringere Ernte erzielt als von denjenigen Feldern, in denen gleichzeitig Heizöfen gegen die Frostgefahr ankämpften.

Für die Entwicklung des Frostschirmes aus der völlig geschlossenen Haube waren vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Arten der Einzelbedeckung von grundlegender Bedeutung. Da Löschnig<sup>224</sup>), der im Jahre 1914 eine Reihe von Beschirmungsversuchen durchführte, Vergleichsmessungen aus mehreren Nächten angibt, werden seine Versuche gleichzeitig mit denen von W. Schmidt und Kessler weiter unten zusammenfassend besprochen.

In den Jahren 1928 und 1929 haben nämlich W. Schmidt<sup>342, 343</sup>) und O. W. Kessler weitere zahlreiche Versuche durchgeführt, um die Wirkungsweise der Einzelbedeckungen im allgemeinen wie auch gerade die Bewährung der einzelnen Schirme und Hauben festzustellen. Auf Grund der dabei gewonnenen Erkenntnisse hat Schmidt neue Schirmarten entwickelt, die man gewissermaßen als Hochleistungstypen bezeichnen darf (gefaltete Schirme nach Art der Lampenschirme, Doppelkonusschirme, Aluminiumschirme). Für die Praxis allerdings haben die letzteren Arten wegen der Kostenfrage kaum Bedeutung.

In diesen Jahren wurde auch die Untersuchung der Wirkung großflächiger Bedeckungen erneut aufgenommen. O. W. Kessler hat damals alle nur irgendwie brauchbar erscheinenden Methoden dieser Art nicht nur nach ihrem Wirkungsgrad, sondern auch auf ihre praktische Durchführbarkeit in Großbetrieben eingehend durchgeprüft.

In Holland versuchte man vor einigen Jahren, die Kulturen durch Ausbreiten alter Fischernetze vor Frostschaden zu bewahren. Angeblich soll auch diese Methode einen Erfolg aufzuweisen gehabt haben.

Die Verwendung von Cellophan seit 1929 hat sich wegen der hohen Kosten, der geringen Wetterfestigkeit und des nicht ausreichenden Frostschutzes ebenfalls nicht durchsetzen können. Wetterbeständiger ist zwar Bizella (von Kalle & Co., Wiesbaden-Biebrich), doch stehen auch hier die hohen Kosten und der häufig nicht ausreichende Frostschutz einer verbreiteten Einführung in die Praxis entgegen. Kessler hat 1929 in Oppenheim ein Gewächshaus aus Bizella gebaut, das infolge der geringen Wetterfestigkeit des damaligen Materials bald unbrauchbar wurde (Abb. 171, Tafel 3).

Im Jahre 1930 wurde durch die Hauptstelle für Pflanzenschutz in Berlin, Professor Ludwigs<sup>225</sup>), ein neues Verfahren geprüft, das sich in den Vereinigten Staaten schon stärker ausgebreitet hatte. Dabei wurden die frostempfindlichen Pflanzen mit nicht durchlässigen, wasserdichten Papierhauben überstülpt (Abb. 20i). Die ersten Versuche zeigten günstige Ergebnisse, besonders konnte man mit der Ernte früher beginnen. Die Praxis hat sich jedoch in Deutschland wegen der hohen Unkosten und des oft nicht ausreichenden Frostschutzes wieder davon abgewendet.

Auch schlauchartige Überzüge aus Cellophan oder Wachspapier, die über die einzelnen Rebzweige gestülpt werden konnten, kamen als Frostschutzmaßnahme auf den Markt (Abb. 20 x).

Bei den seit 1929 von Hühthwohl<sup>167</sup>) in Rheinhessen unternommenen Versuchen mit halboffenen Hauben aus Dachpappe wurde nach eigener Angabe ein Frostschutz nicht erzielt (Abb. 20 t). Unter einer Haube, die auf der Westseite durch einen lichtdurchlässigen Stoff abgeschlossen ist, um der Nachmittagssonne Zutritt zu gestatten, soll allerdings ein Erfrieren nicht möglich sein.

Über einen in der Schweiz im Frühjahr 1933 mit Erfolg durchgeführten Frostschutz berichtet Schellenberg. Es kamen damals etwa 150 000 Frostschirme aus Stroh zur Verwendung (Abb. 20 s). Die Schirme sahen wie größere Flaschenhülsen aus. Über die thermische Wirkung macht Schellenberg<sup>332, 333</sup>) keine Angaben. Er teilt nur mit, daß bei den bedeckten Reben alle Augen und Triebe unversehrt waren, bei den unbedeckten jedoch manche ausblieben. Zwei Jahre später hat Schellenberg diese Strohrostschirme nochmals bei 500 000 Rebstöcken erfolgreich angewendet. Aber auch dieses Mal nahm er keine Temperaturmessungen vor.

Kohlfürst hat ein sogenanntes Frostschutzzelt zum Patent angemeldet, wobei 80 cm hohe Wände aus Spezialpappe beiderseits an die Rebpfähle oder an die Drähte angelehnt und durch Knebelschnüre befestigt werden. Die Stirnseiten des Zeltes können durch entsprechende Pappwände geschlossen werden (Abb. 19 F). Um Licht und Luft Zutritt zu den Pflanzen zu gestatten, können die Wände auseinandergeklappt werden (Abb. 19 G). Hervorgehoben wird, daß man beim Erwarten von Temperaturen unter  $-6^{\circ}\text{C}$  das Innere der Zelte durch Einlegen glimmender Preßkohle sogar beheizen kann. Aus dieser Temperaturangabe muß man eigentlich schließen, daß das Frostschutzzelt bis zu dieser Temperatur genügend Schutz biete; diese Schutzwirkung ist aber bestimmt viel zu hoch angesetzt (S. 91).

Reichwein<sup>316</sup>) hat Versuche mit einem Verfahren durchgeführt, das bezeichnet wird als „Hinsbergs Frühkultur“. Die Versuche sind in Bodenheim bei Mainz 1927 durchgeführt worden. Das wesentliche des Verfahrens ist eine Überdeckung der Kulturen mit Holzrahmen, die mit einem dünnen, besonders präparierten Gaze-stoff, der licht-, luft- und wasserdurchlässig ist, bespannt und derart mit Nut und Feder versehen sind, daß mit diesen Seitenwände und Deckel fest zusammengefügt und dicht geschlossene Anlagen hergestellt werden können. Er behauptet, daß die unter dem Hinsberg'schen Frühkulturrahmen stehenden Pflanzen einen wirksamen Frostschutz gegen Früh- und Spätfröste genießen. Zahlenmäßige Beweise hierfür gibt er nicht an.

Zu erwähnen ist schließlich noch die weiter oben angedeutete Bedeckung der Kulturen mit Glas. Die Durchlässigkeit des Glases für die kurzwellige Strahlung der Sonne gestattet tagsüber eine Wärmespeicherung im bedeckten Boden, die Undurchdringlichkeit für die vom Boden ausgehende langwellige Strahlung dagegen verhindert eine Wärmeabgabe durch Ausstrahlung des Bodens und der Pflanzen. Ist ein hinreichend großer Luft-raum vom Glas eingeschlossen, so wird für die Früh- und Spätfröste bis  $-6^{\circ}\text{C}$  von allen Autoren ein ausreichender Schutz vor Schaden angegeben.

Auf die Bedeckung mit Glas werden wir später nicht eingehen. Die Anwendung des Glases bei Frühbeeten und Gewächshäusern bedeutet zwar auch einen Frostschutz, doch ist dies nicht das eigentliche Ziel dieser teuren Maßnahmen. Während es sich nämlich bei den Bedeckungsverfahren um zeitlich begrenzte Maßnahmen zur Verhinderung von Frostschäden handelt, wird hier eine umfangreiche Änderung der gesamten klimatischen Umweltbedingungen für längere Zeit geschaffen. Das Gewächshausklima verdient eine besondere Bearbeitung.

## B. Die verschiedenen Formen der Bedeckungen.

### 1. Anhäufeln mit Erde und Verlegen der Triebe in den Erdboden.

Es gehört zu den ältesten Erfahrungen des Winzers, den Weinstock durch Anhäufeln mit Erde vor den Schäden des Winterfrostes zu bewahren. In Württemberg ist es selbst bei hohen Stöcken vielfach üblich, als Schutz gegen Winterfröste die Bogreben bis Anfang März zu vergraben. Die Schutzwirkung beruht darauf, daß der Erdboden mit seinem großen Wärmeverrat und der Möglichkeit des Wärmenachschubs aus tieferen Schichten weit geringeren Temperaturschwankungen unterworfen ist als die Luft. Es bedarf schon einer langen Kälteperiode (z. B. Winter 1928/29), um in Bodentiefen von einigen Zentimetern Kältegrade vordringen zu lassen, die das Holz des Weinstocks abzutöten imstande sind. Die Methode hat jedoch insofern Nachteile, als häufig in milden Spät-wintern die Augen der Reben schon im Boden austreiben und dann verfaulen.

Zur Bekämpfung der Schäden zur Zeit der Frühjahrsfröste wurden gelegentlich Methoden angewendet, die den eben beschriebenen ähneln, grundsätzlich aber auf anderen Voraussetzungen beruhen. Dabei wurde nach dem Schneiden die Erde aus den Zeilen an den Stock gehäufelt, um die unteren Augen beim Austreiben zurückzuhalten. Nach der Frostgefahr wurde die Erde wieder behutsam vom Stocke weggeräumt. Dieses Verfahren ist nur anwendbar bei Jungreben und Kopfschnitt zu Beginn der Vegetation.

Gleichfalls auf dem Prinzip der Reserveaugen beruht ein weiteres Verfahren, das von Babo<sup>31</sup>) stammt. Dieser schnitt jedem Stock zwei Tragreben statt einer an und steckte die Reservetragebe in ein neben dem Stock gestoßenes Erdloch. Dieses Verfahren ist recht zweifelhaft: Tritt der Frost vor dem Austrieb ein, so daß die Augen in der Wolle erfrieren, so ist die nunmehr aus dem Boden herauszuholende Reservetragebe ein guter Ersatz für die erfrorene. Wenn aber der Frost erst so spät eintritt, daß die oberirdischen Triebe bereits eine Länge von mehreren

Zentimetern erreicht haben, dann sind die Reservetribe, welche die ganze Zeit über im Boden gesteckt haben, schon derart vergeilt oder gar verfault, daß sie nicht mehr als Ersatz in Frage kommen können.

Da eine Bedeckung der Triebe durch Erde zur Zeit der Kälterückfälle im Mai im allgemeinen nicht mehr durchgeführt werden kann, weil die Triebe dann bei günstigen Wachstumsbedingungen bereits Längen von 30 cm und mehr erreicht haben können, schlägt Molz die Überdeckung von Trieben bei Jungfeldern mit Torfmull vor. Der Erfolg ist jedoch mehr als zweifelhaft (Schomerus<sup>344</sup>).

## 2. Eigentliche Bedeckungsmaßnahmen.

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen Einzelbedeckungen und großflächigem Schutz.

Die Formen der Einzelbedeckungen sind bisher meist als „Frostschirme“ bezeichnet worden, obwohl diese Benennung sich nicht als korrekt erweist. Vielmehr müssen wir bei ihnen unterscheiden zwischen sogenannten „Hauben“ und eigentlichen „Schirmen“. Die Hauben sind als Hohlkörper von halbkugelige, kegelartige, prismatische oder ähnlicher Form dadurch besonders gekennzeichnet, daß sie beim Überstülpen über die zu schützende Pflanze mit ihrem unteren Rand auf dem Erdboden aufsitzen. Bei kleineren Modellen durchstößt der Rebpfahl die Haube. In dieser ursprünglichen Form schließen die Hauben die Pflanze also völlig von der Außenluft ab. Später erkannte man, daß ein solcher Luftabschluß sich ungünstig auf die Pflanze auswirken kann, und brachte Ventilationslöcher an. Durch die auf dem Boden aufstehenden Halb-Hauben wird die Pflanze nur einseitig bedeckt, während sie auf der anderen Seite mit der Außenluft ungehindert in Verbindung steht. Im Gegensatz zu den Hauben bilden die Schirme flache Kegel oder einfache Scheiben, die in geringem Abstand über der Pflanze angebracht werden. Unter einem solchen Schirm steht also die Pflanze ringsum mit der Außenluft in Verbindung.

Dementsprechend unterscheiden wir bei den großflächigen Bedeckungen die dach- und zeltförmige Bedeckung, die einseitige und die horizontale Bedeckung. Bei der dachförmigen Bedeckung werden die Schutzstoffe in Form von Matten derart aufgestellt, daß je zwei Matten schräg gegeneinander lehnen und auf diese Weise ein giebelartiges Dach bilden. Die beiden Stirnseiten können unter Umständen durch Umbiegen der Mattenenden geschlossen werden (Abb. 19 C). Eine solche Aufstellungsmethode wird im allgemeinen jeweils nur eine Rebenzeile überdachen können. Die Bedeckungsart, bei der die Reben zwar durch waagrecht ausgespannte Stoffe in etwa 70 cm Höhe überdacht und die vier Seiten durch Anlehnen weiterer Matten ebenfalls geschlossen werden, bezeichnen wir als zeltförmige Bedeckung (Abb. 19 E). Sind die vier Seiten offen, so sprechen wir von horizontaler Bedeckung (Abb. 19 D), während bei der einseitigen Bedeckung die Matten nur von einer Seite her schräg an die Pfähle angelehnt sind (Abb. 172, Tafel 3). Eine besondere Art der Bedeckung ist das einfache Ausbreiten der Schutzstoffe über niedrig wachsende Pflanzen, die den Boden weitgehend bedecken.

Wir kommen somit zu folgender grundsätzlicher Einteilung der Bedeckungsmaßnahmen:

- I. Einzelbedeckung:
  - a) Hauben:
    1. geschlossene Hauben,
    2. ventilierte Hauben;
  - b) Halb-Hauben (einseitige Einzelbedeckung);
  - c) Schirme.
- II. Großflächige Bedeckung:
  - a) dach- und zeltförmige Bedeckung;
  - b) einseitige Bedeckung;
  - c) horizontale Bedeckung.
- III. Bodenaufliegende Bedeckung.

In der Praxis hat sich nun eine Unmenge von Variationen der oben angeführten Bedeckungen, insbesondere der Einzelbedeckungen, herausgebildet, von denen wir hier die meisten anführen wollen.

### A. Hauben:

1. Ganz geschlossene Hauben:
  - a) geschlossene kegelförmige Haube aus Pappe (Abb. 20 c, d);
  - b) Frosthaube „Sophie“ (Abb. 20 e);
  - c) Papphaube nach Kohlfürst (Abb. 20 f);
  - d) Frostschutzhaube Schacht, aus grauem, 0,2 mm dickem Spezialpapier, 1 m hoch und 80 cm breit (Abb. 20 g);
  - e) Frosthut Steinmüller aus Ernteschutzpapier in verschiedenen Größen, Dicke des Papiers 0,5 mm (Abb. 20 h);

- f) Haube aus Zellstoffglas (Bizella). Das Material ist durchsichtige Acetatzellulose mit einem Drahtgeflecht als Einlage;
- g) Haube in Gestalt eines auf dem Boden aufsitzenden Lampenschirmes, aus einem rechteckigen Stück ölgetränktem Überseepackpapieres durch Legen paralleler Falten gefertigt (nach W. Schmidt);
- h) Wachspapierhaube nach Altman n (Abb. 20 i).

## 2. Ventilierte Hauben.

Vorbemerkung; Die im folgenden unter a) bis j) aufgeführten Hauben sind österreichische Modelle, verwendet in den Versuchen von Löschnig und Schmidt, auch bei Kessler. Die Bezeichnung „Frostschirm“, die die Versuchsansteller gewählt haben, ist hier beibehalten. Die Einordnung in die Gruppe der Hauben wurde von uns vorgenommen.

- a) kegelförmige, durchlöcherter Haube aus Pappe (Abb. 20 j);
- b) kegelförmige Haube mit Ventilationslöchern am Boden (Abb. 20 k);
- c) Haugsdorfer „Frostschirm“ (Breveta), Pappdeckel  $40 \times 80$  cm wird mit einer Drahtklammer zusammengeheftet (Abb. 20 l);
- d) Gumpoldskirchner „Frostschirm“ (Breveta) (Abb. 20 m);
- e) Doppelkonus-Schirm nach W. Schmidt;
- f) „Frostschirm“ Breveta-Rebenschutz (Abb. 20 n);
- g) Traiskirchner „Frostschirm“, Drahtgestell mit Sackleinen überzogen (Abb. 20 o);
- h) Traiskirchner „Frostschirm“, verbessertes Modell mit einem Bodenstreifen aus Dachpappe, zum Aufklappen eingerichtet (Abb. 20 p);
- i) Strohschablschirm (Abb. 20 q);
- j) Strohschutzmatte Wallner (Abb. 20 r);
- k) Schweizer Rebenschutz (Abb. 20 s).

## B. Halb-Hauben:

Halbkegel aus Dachpappe, nach Süden offen, Modell H ü t h w o h l (Abb. 20 t).

## C. Schirme:

- a) kegelförmiger Pappschirm, unterer Rand etwa 15 cm über Boden (Abb. 20 u);
- b) Frostschirm Patria (Abb. 20 v);
- c) Frostschirm „Winzerheil“. Abgestumpfter Kegel, dessen unterer Durchmesser 68 cm und dessen oberer Durchmesser etwa 6 cm beträgt. Aus 1,2 mm dicker brauner gewachster Pappe hergestellt. Am unteren Rand durchgezogener Drahtring zur Versteifung. Zum Befestigen benutzt man eine dünne Holzleiste, die mit Draht in der gewünschten Höhe am Pfahl befestigt wird (Abb. 20 w);
- d) kegelförmiger Schirm aus Aluminium nach W. Schmidt;
- e) wagrechter Deckel aus Pappe oder Metall (Löschnig).

Für die großflächigen Bedeckungen kommen als Material in Frage: Strohmatte, Tücher aus Jute oder Nessel, wetterfestes Papier und Wellpappe.

Bei den von Kessler 1928—1929 durchgeführten Bedeckungsversuchen waren die Strohmatte aus Roggenstroh in der Größe  $10 \times 1$  m hergestellt. Als wetterfestes Papier diente das sogenannte Ernteschutzpapier der Firma Steinmüller, Gummersbach, das in Decken von 5 m Länge und 75 cm Breite vorlag. Seine Stärke betrug 0,5 mm. Die Ränder waren verstärkt und enthielten eingenahte Befestigungsschnüre. Die Wellpappe (nach Kohlfürst) war wie die üblicherweise zum Verpacken benutzte Wellpappe, nur war Papier verwendet, das kein Wasser annahm.

## C. Ermittlung des Wirkungsgrades der Bedeckungsmaßnahmen.

Bei der Beurteilung der „Güte“ einer Bedeckungsmaßnahme hat man sich ursprünglich einzig und allein von der beobachteten Wirkung auf die Pflanzen leiten lassen. Als Vergleichmaßstab diente dabei ein in der Nähe liegendes anderes Feld mit den gleichen Kulturen. Nachdem nun aber festgestellt ist, daß Frostschäden in weitgehendem Maße von lokalen Witterungsunterschieden auf kleinstem Raum abhängig sind, kann ein solcher Vergleich noch nicht einmal als einwandfreier Beweis dafür angesprochen werden, daß die angewendete Schutzmethode überhaupt genützt hat. Viel weniger noch ist die Größe des Wirkungsgrades einer solchen Beobachtung zu entnehmen. Eine einwandfreie Beurteilung der Bedeckungsmaßnahmen im allgemeinen wie auch ein Vergleich der einzelnen Methoden untereinander kann nur durch Messungen, also durch Zahlenangaben erfolgen.

Infolge dieser Tatsache verbleibt nur eine sehr geringe Zahl von Versuchsreihen, die eine Beurteilung der Art der Schutzwirkung von Bedeckungen überhaupt zulassen und einen, wenn auch noch unsicheren Vergleich der einzelnen Bedeckungsarten miteinander erlauben.

## 1. Instrumentaltemperatur und wahre Lufttemperatur.

Die bei unseren Versuchen fast ausschließlich verwendeten alkoholischen Minimumthermometer (Fueß-Berlin) zeigten natürlich nicht wahre Lufttemperatur an. Deswegen stellten wir theoretische und praktische Untersuchungen besonders über den Grad der Untertemperatur (gegen Luft) frei aufgestellter Thermometer in Strahlungsächten an. Hierbei ist die entscheidendste Materialeigenschaft das Absorptions- und Emissionsvermögen des Thermometerkörpers. Bei den Glasthermometern wäre wegen des kräftigen Emissionsvermögens des Glases oberhalb der Wellenlänge  $3 \mu$  eine verhältnismäßig starke Ausstrahlung zu erwarten, und da der Hauptbereich der Pflanzenstrahlung für die in Frage kommenden nächtlichen Temperaturen mit einem Maximum zwischen den Wellenlängen 10 und  $11 \mu$  sich weitgehend mit der Lage des Emissionsvermögens des Glases deckt, so gäbe also ein Glasthermometer recht gut auch die Pflanzentemperatur wieder. Wegen des Kieselsäuregehaltes besitzt Glas andererseits ein starkes Reflexionsvermögen im Spektralbereich von  $9-12 \mu$ , wodurch die Ausstrahlungsstärke etwas herabgemindert wird. Trotzdem wird den Glasthermometern immer noch eine erhebliche Wärmemenge durch Ausstrahlung entzogen. Die Glasthermometer zeigen ein abweichendes Verhalten von diesem ihrem Normalzustand, wenn das Thermometergefäß einen staub- oder rußähnlichen Überzug erfährt. In diesem Falle nähert sich die Ausstrahlung in ihrer Stärke mehr der schwarzen Strahlung, und die Untertemperatur des Thermometers gegen Luft wird größer.

Eine andere Oberflächenänderung des Thermometergefäßes wird durch die Tau- oder Reifbildung hervorgerufen. Bei Taubeschlag werden sich die Strahlungsverhältnisse des Glasthermometers während der Nacht nicht wesentlich ändern, während bei Reifbeschlag ähnliche Verhältnisse wie bei berußten Thermometern eintreten, da Reif und Schnee annähernd als schwarze Körper strahlen. Demnach werden bereifte Thermometer stärker abgekühlt werden als unbereifte. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch darauf hingewiesen, daß nicht nur die Materialeigenschaften, sondern auch äußere Bedingungen auf die Angaben des Glasthermometers von Einfluß sind, so vor allem die Tatsache, daß eine Erwärmung des Thermometers durch die bei der Tau- und Reifbildung frei werdende Kondensations- bzw. Erstarrungswärme eintritt, die allerdings nur von kurzer Dauer ist.

Eine weitere Abweichung der vom Thermometer angezeigten Werte gegenüber den wahren Lufttemperaturen kommt durch seine Trägheit zustande. Nach Messungen an einem der bei den Versuchen von Kessler benutzten Fueß'schen Minimumthermometer in ruhender Zimmerluft dauert der Angleich bei einer plötzlichen Änderung der Außentemperatur um 5 Grad etwa 15 Minuten, wenn als Ablesegenauigkeit  $\frac{1}{10}$  Grad angesetzt wird (Abb. 21).

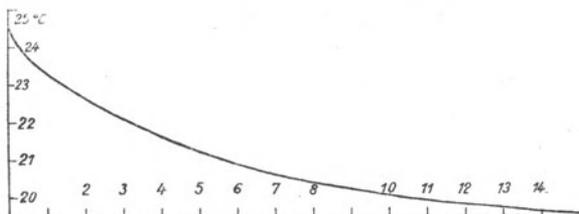


Abb. 21. Trägheitsbestimmung an einem Minimumthermometer Fueß Nr. 720 bei ruhender Luft.

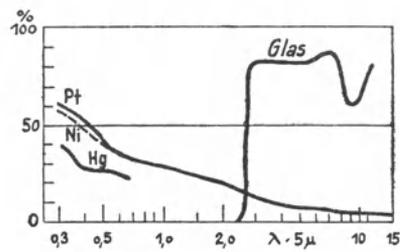


Abb. 22. Emissionsvermögen von Metal' und Glas nach Albrecht.



Abb. 23. Minimumthermometer mit Budigschirm.

Im Gegensatz zu den Glasthermometern nähern sich die Angaben massearmer elektrischer Thermometer nach neuen Untersuchungen von Albrecht<sup>11)</sup> weitgehend den Lufttemperaturen, wenn zu ihrer Herstellung hinreichend dünne Drähte verwendet werden. Ist diese Bedingung erfüllt, so kommt in Ausstrahlungsächten eine Untertemperatur sowohl bei Widerstandsthermometern als auch bei Thermoelementen praktisch nicht mehr in Frage, wenn es sich um freiausgespannte Drähte handelt. Die Ursache hierfür ist nicht nur in der geringen Masse zu suchen, sondern vor allem auch in dem raschen Abklingen der Absorptions- bzw. Emissionskurve der benutzten Metalle im langwelligen infraroten Spektralgebiet (Abb. 22).

Zu den bereits besprochenen Eigenschaften kommt noch hinzu, daß bei großer Oberfläche und kleiner Masse des Thermometerkörpers ein schnelleres Angleichen an die Temperatur der umgebenden Luft infolge der verbesserten Austauschmöglichkeiten stattfinden kann.

Von den meteorologischen Bedingungen übt die Ausstrahlung den Haupteinfluß auf die Größe der Untertemperatur des Thermometers aus. Die Stärke der Ausstrahlung hängt ihrerseits ab von dem Feuchtigkeitsgehalt der Luft, besonders aber von der Verteilung und Dichte der Bewölkung. Ein schwarzer, also maximal strahlender Körper gibt infolge der Ausstrahlung in klaren Nächten bis zu 0,2 gcal in der Minute für jeden Quadratcentimeter seiner Oberfläche ab; diese Zahl gilt für die Ausstrahlung einer horizontalen Fläche gegen die Himmelshalbkugel.

Der Unterschied zwischen wahrer Lufttemperatur und Instrumentaltemperatur wird durch Luftbewegung

vermindert, weil mit dem Heranführen neuer Luftmassen ein ständiger Wärmeaustausch zwischen Luft und Thermometergefäß stattfindet, der eine Verkleinerung der Untertemperierung des Thermometers herbeiführt.

In einem Beispiel verglichen wir Thermometer, die durch den Metallschirm nach Budig (Abb. 23) geschützt waren, mit ungeschützten in einer Nacht mit guten Ausstrahlungsverhältnissen. Die Thermometer waren in 50 cm Höhe über ebenem Schieferboden von gleichförmiger Oberflächenbeschaffenheit angebracht.

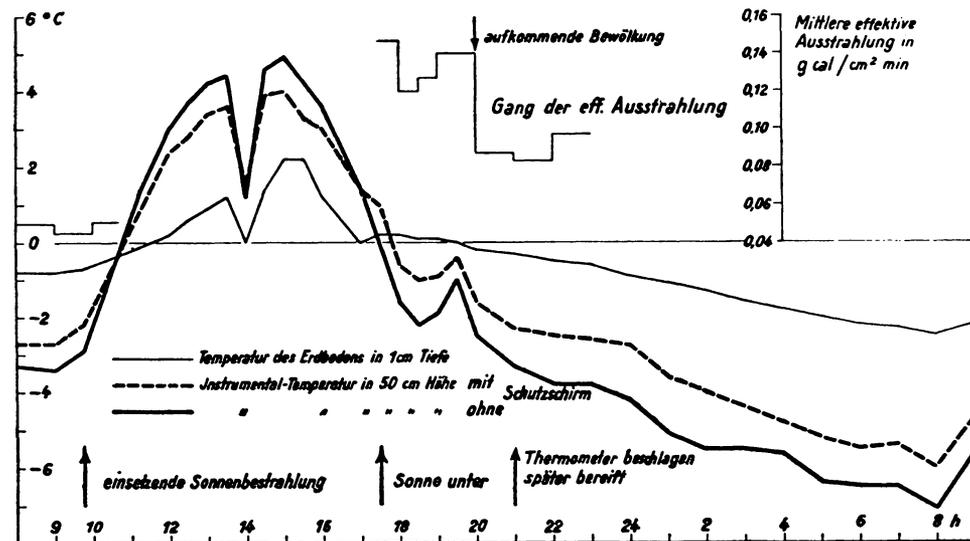


Abb. 24. Wirkung des Strahlungsschutzes von Budig an Minimumthermometern und Gang der effektiven Ausstrahlung (mit Tulipan). Trier, 4. Februar 1936.

Der Verlauf der Temperaturkurven, gemittelt aus mehreren Thermometern (Abb. 24), zeigt erwartungsgemäß, daß die Werte des ungeschützten Thermometers tagsüber höher und nachts tiefer liegen als die unter dem Budig-Schirm erhaltenen. Bemerkenswert ist, daß die Umkehr nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang infolge des Überwiegens der Ausstrahlung während des tiefen Sonnenstandes bei klarem Himmel stattfindet. Eine einzige Ablesung um 14 Uhr 00 ergab, daß die Temperatur des Thermometers unter dem Schirm um einige Zehntel Grad höher lag als die des ungeschützten Thermometers. Um diese Zeit befanden sich die Thermometer vorübergehend im Schatten einer Cumuluswolke von verhältnismäßig geringer Ausdehnung. Da die Bewölkung insgesamt nur drei Zehntel betrug, besteht die Möglichkeit, daß die Ausstrahlung gegen die freien Himmelsteile in dieser Zeit noch vorherrschte.

Während der Schirm tagsüber die Sonneneinstrahlung abhält, schützt er das Thermometer während der Nacht vor der Wirkung der Ausstrahlung. In der fast durchweg klaren Beobachtungsnacht traten Abweichungen bis zu 1,5 Grad auf. Zu Zeiten aufkommender Bewölkung sowie bei der Ablesung um 19 Uhr 30 wurden die Unterschiede erheblich kleiner, um bei erneut zunehmender Ausstrahlung wieder anzuwachsen. Spätere Messungen mit den gleichen Minimumthermometern, deren Gefäß mit Rebschwarz in Bernsteinlack nach Albrecht<sup>8)</sup> geschwärzt war, ergaben in günstigen Strahlungsnächten Untertemperierungen von 2,0 Grad und mehr gegenüber geschützten Thermometern. Diese Zahlenwerte kamen den Temperaturen der Pflanzen näher, da die Emissionsverhältnisse sich mehr ähneln.

Eine andere Form des Thermometerschutzes, die sich als Halbzylinder teilweise über das Thermometer legt, hat Büdel<sup>64)</sup> mit Hilfe von Thermoelementen auf ihre Wirkungsweise eingehend geprüft. Er stellte fest, daß zwar die Schirmwand sowohl außen wie innen in klaren Nächten bis zu 1 Grad kälter wird als die umgebende Luft, daß aber die Thermometerflüssigkeit gegenüber der Luft keine Temperaturunterschiede innerhalb der Meßgenauigkeit aufweist (Abb. 25).

Mit entsprechend feinen elektrischen Thermometern bzw. mit Alkoholthermometern unter Strahlungsschirmen messen wir also hinreichend genau die wahre Lufttemperatur. Mit einem ungeschützten Glasthermometer erhalten wir in einer klaren Nacht dagegen Temperaturwerte, die unter der wahren Lufttemperatur liegen und sich im allgemeinen den Temperaturwerten der Pflanzen nähern. Bei bewölktem Himmel gleichen sich die Temperaturwerte der Thermometerkörper geradeso wie die der Pflanzenteile denen der Lufttemperatur an. Bei den von Kessler durchgeführten Versuchen zur Bewertung von Bedeckungsmaßnahmen wurden meist ungeschützte Minimumthermometer verwendet.\*)

\*) Wo dies nicht der Fall ist, wird besonders darauf hingewiesen.

Um ein Bild von dem Verlauf und der Stärke der Ausstrahlung und damit der möglichen Größe der an einem Thermometer abzulesenden Untertemperatur gegen Luft zu geben, seien hier die Messungen eingeschaltet, die in der klaren Nacht vom 15./16. März 1932 in Trier ausgeführt wurden (Abb. 26). Es handelt sich dabei

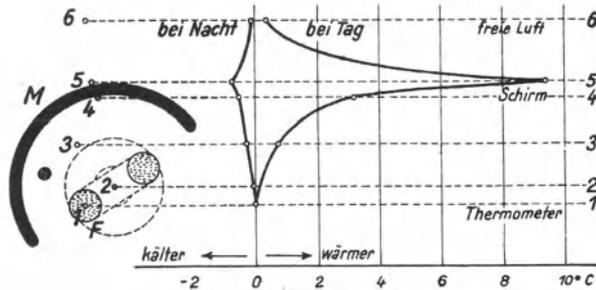


Abb. 25. Temperaturverhältnisse bei einem halbzyklindrischen Thermometerschutz nach Büdel.

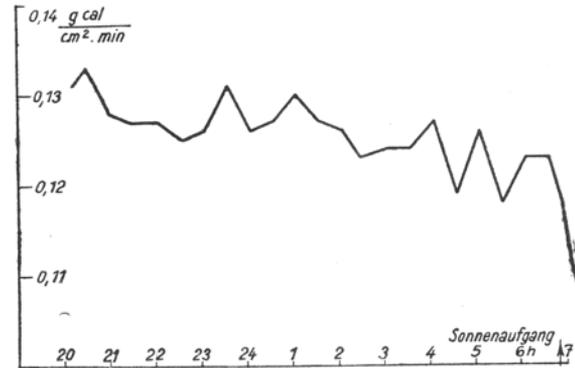


Abb. 26. Gang der effektiven nächtlichen Ausstrahlung, gemessen mit Pygeometer nach Angström. 15./16. März 1932.

um halbstündliche Ablesungen am Pygeometer nach Angström<sup>23)</sup>, das nach der elektrischen Kompensationsmethode arbeitet. Interessant ist an dem Verlauf, daß die höchsten Werte der effektiven Ausstrahlung (bis zu  $0,133 \text{ g cal/cm}^2 \text{ min}$ ) in den ersten Abendstunden auftreten. In dem weiteren Verlauf ist ein allmähliches Abklingen zu beobachten. Breitere Teilminima sind wohl in Zusammenhang zu bringen mit der Bildung von Dunst oder mit dem Erscheinen noch nicht sichtbarer Kondensation.

Für die Untersuchung der Wirkungsweise verschiedener Bedeckungsmaßnahmen reicht die Kenntnis des absoluten Betrages der effektiven Ausstrahlung gegen das gesamte Himmelsgewölbe in vielen Fällen nicht aus. Es muß vielmehr auch untersucht werden, wie stark die Ausstrahlung nach verschiedenen Zonen des Himmels ist.

Zur Beantwortung der Frage, welche Intensitäten von einem Strahlungsgerät mit konstantem, verhältnismäßig kleinem Öffnungswinkel gegen die verschiedenen Höhen längs eines größten Kreises der Himmelshalbkugel zwischen Zenit und Horizont ausgestrahlt werden, wurden in der Nacht vom 19./20. Mai 1933 zwischen 4 und 5 Uhr mit dem Effektiv-Aktinometer nach Dubois<sup>93)</sup> eine Reihe von Strahlungsmessungen in verschiedenen Zenitabständen

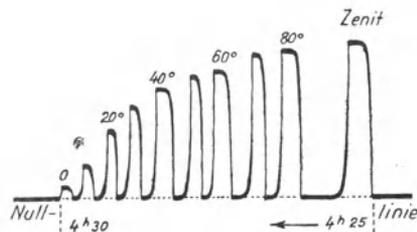


Abb. 27. Registrierung der meridionalen Intensitätsverteilung der effektiven Ausstrahlung mit Ferneffektiv-Aktinometer nach Dubois. 19./20. Mai 1933 bei Föhren nahe Trier.

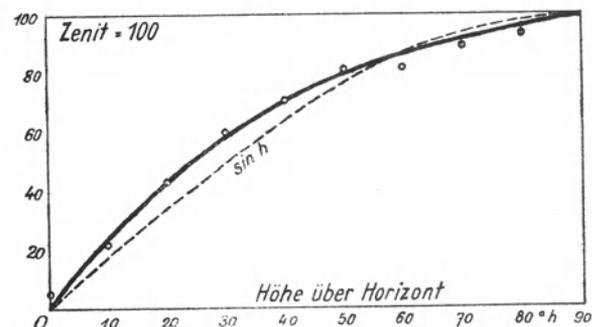


Abb. 28. Meridionale Intensitätsverteilung der effektiven Ausstrahlung.

von 10 zu 10 Grad vorgenommen. Die photographische Registrierung dieser Messungen zeigt, daß die Intensität der Ausstrahlung mit zunehmender Höhe schnell wächst (Abb. 27). Sie beträgt beispielsweise bei 30 Grad 58 % und bei 60 Grad 86 % der Zenitintensität (Tab. 12).

Tabelle 12. Meridionale Intensitätsverteilung der effektiven Ausstrahlung in relativen Einheiten. (Zenit = 100)

Höhe über Horizont . .	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90°
Intensität in Hundertstel . .	0	23	43	58	70	79	86	92	96	100°

Die Abbildung 28 gibt eine mittlere Kurve der meridionalen Intensitätsverteilung, die von der Sinusfunktion des Höhenwinkels  $h$  abweicht. Für die kleinen Winkel verläuft sie wesentlich steiler, um dann bei 30 Grad in

einen flacheren Bogen überzugehen. In dieser Form entspricht die Kurve einem verhältnismäßig hohem Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre. Nach älteren Messungen von Dubois<sup>92)</sup> steigt die Kurve bei trockener Luft steiler an, wobei die zenitnahen Zonen wesentlich höhere Werte annehmen.

Aus der Verbindung der Absolutmessungen vermittels des Pyrgeometers, welche die Stärke der effektiven Ausstrahlung einer horizontalen schwarzen Fläche gegenüber der gesamten Himmelshalbkugel ergeben, mit den Relativmessungen durch das Effektiv-Aktinometer, welche die meridionale Intensitätsverteilung liefern, kann man sich ein Bild machen von der Verteilung der Energiebeträge, die von der Flächeneinheit in der Zeiteinheit gegen die einzelnen Zonen gestrahlt werden.\*)

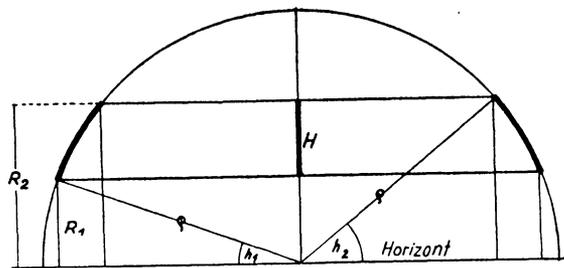


Abb. 29. Zur Berechnung der Zehngrad-Zonen.  
Oberfläche  $O = 2\pi\rho H$ ; Zonenhöhe  $H = R_2 - R_1$ ;  
Horizontabstand des unteren Zonenrandes  $R_1 = \rho \cdot \sin h_1$ ,  
des oberen Zonenrandes  $R_2 = \rho \cdot \sin h_2$ .

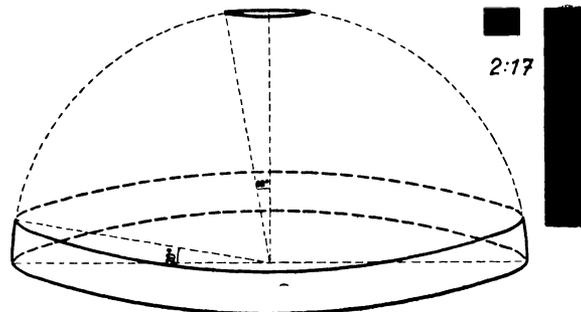


Abb. 30. Zenitale Kugelkappe und horizontale Kugelzone.

Es geht aus der Kurve der mittleren meridionalen Intensitätsverteilung (Abb. 28) hervor, daß die Intensitätswerte gegen den Zenit beträchtlich ansteigen; so verhält sich beispielsweise der mittlere Wert, der auf den Bogen von 0—10 Grad entfällt, zu dem des Bogens von 80—90 Grad wie 13 zu 98. Nun wird aber andererseits die Kugelzone bei gleichem Winkelabstand ihrer Ränder mit zunehmender Höhe immer kleiner (Abb. 29). Die entsprechende 10-Grad-Zone am Boden verhält sich zu der 10-Grad-Zone um den Zenit wie 17 zu 2 (Abb. 30). Die Energie, welche von einem senkrecht gegen die jeweilige Zone gerichteten Flächenstück in diese Zone insgesamt gestrahlt wird, wird also proportional sein dem Produkt aus Zonenfläche und mittlerer Intensität. Bildet man dieses Produkt für jede der neun Kugelzonen und reduziert die Werte auf die Summe 100, so erhält man die Abbildung 31 b. Das Maximum der Kurve liegt in der Nähe von 40 Grad Höhe.

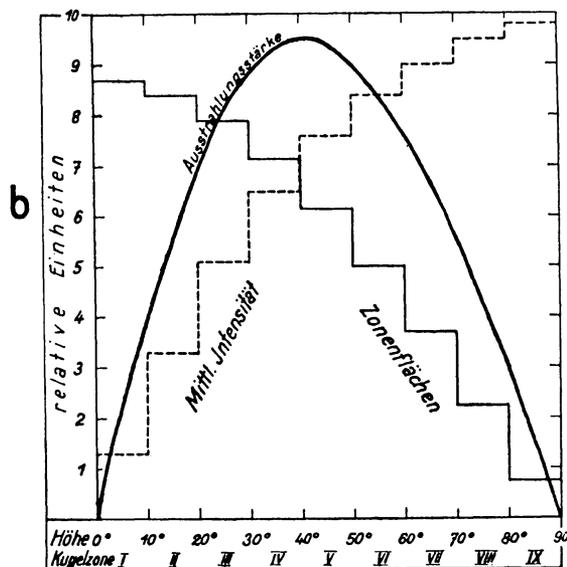


Abb. 31. Zur Berechnung der Ausstrahlungsstärke gegen die Zehngrad-Zonen der Himmelshalbkugel.

Bei dieser Überlegung ist jedoch noch nicht berücksichtigt, daß wir es bei abgeschirmten Bodenoberflächen nicht immer mit Flächen zu tun haben, die senkrecht gegen die einzelnen Zonen strahlen, sondern gewöhnlich mit einer horizontalen Fläche, die nur gegen den Zenit senkrecht strahlt, gegen alle anderen Kugelzonen aber unter schieferem Winkel. Infolgedessen müssen die erhaltenen Werte noch mit dem Sinus des Höhenwinkels multipliziert werden. Reduziert man auch diese Werte wieder auf die Summe 100, so erhält man eine zweite Kurve, deren Maximum sich gegenüber der ersten nach dem Zenit hin verlagert und größer wird (Abb. 32).

In der nächsten Abbildung (Abb. 33) geben die S-förmigen Kurven von 10 zu 10 Grad die Werte an, die von der Horizontfläche gegen eine Kugelzone ausgestrahlt werden, welche auf dem Horizont aufsitzt und mit ihrem oberen Rand bis zu dem angegebenen Höhenwinkel reicht, bei Zugrundelegen einer nächtlichen effektiven Ausstrahlung von 100 mg cal/cm<sup>2</sup>.

\*) Diese Verbindung der Messungen mittels des Effektiv-Aktinometers mit denen des Pyrgeometers erscheint zunächst nicht ganz korrekt, da das erstere Instrument jeweils senkrecht gegen die gerade beobachtete Himmelszone strahlt, das Pyrgeometer jedoch gegen die gesamte Himmelshalbkugel, aber nur gegen den Zenit senkrecht und damit maximal. Deshalb werden die Meßwerte des Effektiv-Aktinometers später zonenweise auf die entsprechenden Werte für eine horizontale Fläche reduziert.

Um diese theoretischen Betrachtungen für die Untersuchungen über die Bedeckungsmaßnahmen, insbesondere für die an den Schirmen nutzbar zu machen, wurde schließlich eine Darstellung gewählt, die uns die Wirkungsweise des Bedeckungssystems in Bezug auf den Strahlungsschutz bzw. Strahlungsverlust bei maß-

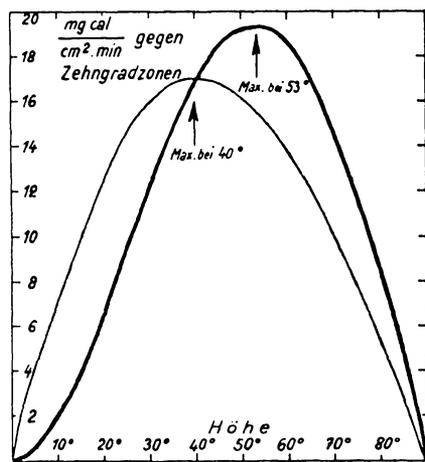


Abb. 32. Zonale Ausstrahlungsstärken. Dünne Kurve: Ausstrahlende Fläche senkrecht zum Kugelradius der Zonenmitte. — Dicke Kurve: Ausstrahlende Fläche horizontal.

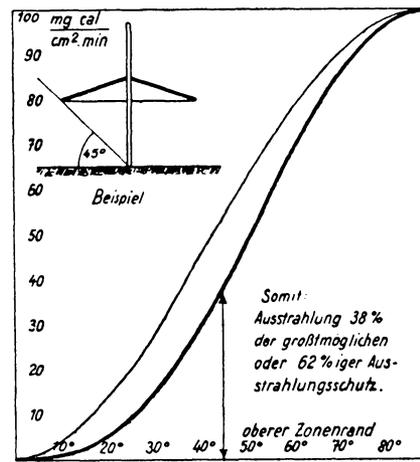


Abb. 33. Ausstrahlungsstärken einer Fläche gegen Zonen, deren untere Begrenzungslinie der Horizont ist. Dünne Kurve: Ausstrahlende Fläche senkrecht zum Kugelradius der Zonenmitte. — Dicke Kurve: Ausstrahlende Fläche horizontal.

stäblicher Eintragung des betreffenden Schirmes veranschaulichen hilft (Abb. 34). In einem Halbkreis, den man sich als Schnitt durch die Himmelshalbkugel zu denken hat, sind eine Reihe von Radien eingezeichnet. Jedem Radius entspricht ein Zehnerwert der auf 100 reduzierten Gesamtausstrahlung. Man erkennt deutlich, wie besonders am Horizont ein strahlungsarmer Bereich vorherrscht, ein solcher ist auch in Zenitnähe in weniger ausgeprägter Form anzutreffen. Am dichtesten sind die Radien zwischen 50 und 60 Grad. Gegen diese Zonen richtet sich demnach der Hauptanteil der Ausstrahlung. Zeichnet man nun in diese Darstellung maßstäblich Schirme in verschiedenen Abständen vom Boden ein, so lassen sich bis auf wenige Prozent genau die abgeschirmten

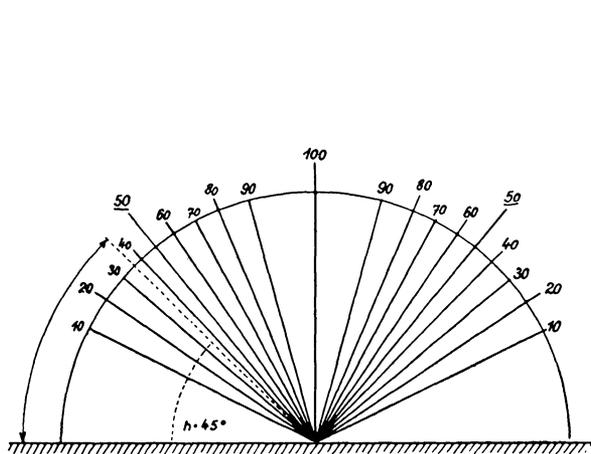


Abb. 34. Strahlungsstärken gegen die vom Horizont bis zum betreffenden Radius sich erstreckenden Kugelzonen.

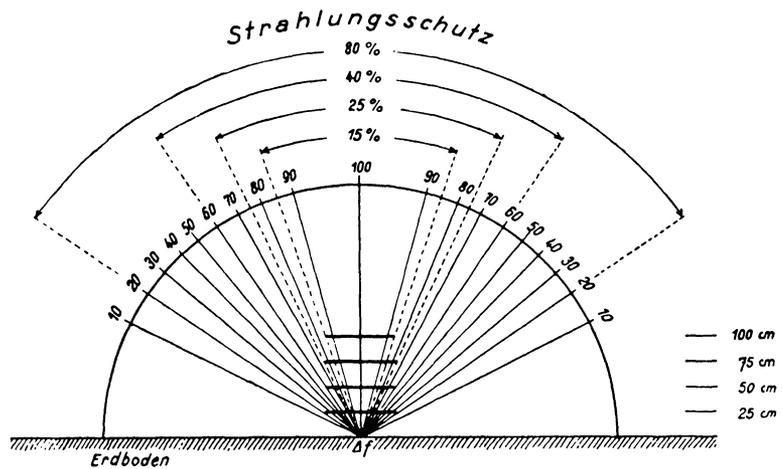


Abb. 35. Strahlungsschutz für das horizontale Flächenelement  $\Delta f$  auf dem Boden in Prozenten für verschiedene Schirmhöhen bei einem Schirmdurchmesser von 70 cm.

Strahlungen der Darstellung entnehmen (Abb. 35). Sie ergeben sich als Differenz von 100 gegen den an dem einen der beiden Begrenzungsradien abgelesenen Wert. So hat z. B. der unterste der in Abbildung 35 eingetragenen Schirme den Begrenzungsradius 20; die von ihm abgeschirmte Strahlung beträgt demnach  $100 - 20$  oder 80% der Gesamtausstrahlung.

## 2. Wie läßt sich der thermische Effekt der Bedeckung erfassen?

Verschiedene Tatsachen erschweren den Vergleich der Versuchsergebnisse untereinander. Bei der Angabe des Temperatureffektes müssen wir uns vergegenwärtigen, daß die Pflanzentemperatur zwar im allgemeinen der der Luft folgt, daß sie aber durch Strahlungsabsorption und -emission, durch Transpiration, vielleicht auch durch chemische Prozesse von ihr abweicht.

Wir werden jedoch bei den nächtlichen Versuchen ohne allzu großen Fehler die jeweilige Instrumentaltemperatur als die Pflanzentemperatur ansehen dürfen (s S. 65).

Am einfachsten scheint es zunächst, als thermischen Effekt einer Bedeckungsmethode die Differenz der Temperaturminima, einmal im geschützten, das andere Mal im ungeschützten Raum abgelesen, also die Differenz der Minima der Pflanzentemperaturen anzugeben. Denn diese Temperaturdifferenz wird bei allen Meßreihen am ersten in die Augen fallen.

Diese Art, den Effekt zu bestimmen, ist, so einfach sie auf den ersten Blick erscheinen mag, ebensowenig in pflanzenphysiologischer wie in meteorologischer Hinsicht einwandfrei. Stellen wir uns zwei Gebiete vor, die am Abend ungleichen Wärmehalt haben, in der nun folgenden Nacht aber unter dem gleichen Wärmeentzug stehen, und nehmen wir weiter an, daß gerade das vom Tage her wärmere Bodenstück zufällig durch das Schutzmittel abgedeckt würde. Bestimmen wir dann am nächsten Morgen den Effekt lediglich an Hand der abgelesenen Minima, so hätten wir einen scheinbaren Nutzeffekt zu verzeichnen, obwohl eigentlich gar keiner erzielt wurde; die abgelesene Temperaturdifferenz war ja am Abend schon vorhanden! Stellen wir uns den umgekehrten Fall vor, die geschützte Stelle wäre etwa infolge der Bodenbeschaffenheit oder durch örtlich stärkeren Niederschlag vom Tage her kälter gewesen. Wir kämen dann zu dem Ergebnis, das Schutzmittel hätte nicht nur nichts genutzt, sondern hätte sogar ungünstig gewirkt, da das Minimum des Außenraumes ja höher lag als das des Innenraumes. Nehmen wir noch einen dritten Fall: Die geschützte Stelle habe schon vom Tage her eine beispielsweise um 3 Grad tiefere Temperatur, das Schutzmittel schirme aber derart gut ab, daß der Temperaturabfall innerhalb des geschützten Raumes und in der Zeit vom Bedecken bis zum erreichten Minimum 2 Grad weniger betrage als der Temperaturabfall im Freien; sogar dann müßte man noch einen ungünstigen Temperatureffekt der Bedeckung annehmen, sofern man nur die Differenz der Minima betrachtete.

Es liegen in der Tat Versuchsreihen vor, bei welchen die Minima im geschützten Raum niedriger sind als die im freien Außenraum gemessenen! Es zeigt sich jedoch in diesen Fällen, daß dann die geschützte Fläche schon vom Abend her kälter war als die Vergleichsfläche.

Aus diesen Erwägungen müssen wir also den Gang der Lufttemperatur vom Beginn der überwiegenden Ausstrahlung kurz vor Sonnenuntergang verfolgen. Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch der Wärmehalt des Bodens und seine Wärmeleitfähigkeit. Darüber liegen jedoch bis heute keine ausreichenden Untersuchungen vor, insbesondere fehlen sie bei den vorliegenden Meßreihen. Wir erkennen hieraus auch, wie wesentlich der Zeitpunkt des Bedeckens ist. Solange in der Strahlungsbilanz ein Einnahmeüberschuß vorhanden ist, muß die zu schützende Stelle offen sein, während sie im Augenblick des Beginns der überwiegenden Ausstrahlung bedeckt werden muß, um den optimalen Effekt zu erzielen. Das Bedecken, das erst in der Nacht vorgenommen wird, ist zwar, wie wir später sehen, in einer ausgeprägten Frostnacht keineswegs völlig wirkungslos, der erzielte Temperatureffekt wird aber wesentlich kleiner. Ebenso erhalten wir unter einer Bedeckung, die tagsüber oder gar während eines längeren Zeitraumes angebracht war, infolge des Fehlens der absorbierten Sonnenenergie nur einen geringen Effekt.

Aus dem oben besprochenen Grund besagt auch die Angabe der Temperaturdifferenz zwischen dem geschützten und ungeschützten Raum zu einer bestimmten Stunde nur sehr wenig über die Schutzwirkung. Bei einer etwaigen Differenz zur Zeit der ersten Ablesung am Abend kann — wenigstens bei dem zur Verfügung stehenden Material — nicht ohne weiteres entschieden werden, inwieweit diese Differenz als eine Wirkung der Schutzmethode oder durch lokale Einflüsse bedingt ist. Ferner ist zur Zeit des Eintritts des äußeren Minimums die Differenz der Temperaturen größer als die Differenz zwischen den Minima selbst, da ja das Minimum im geschützten Raum eine zeitliche Verschiebung erfährt. Die Angabe einer mittleren Temperaturdifferenz, aus den Ablesungen während der Nacht gebildet, ist zwar ein Maß für einen etwa erzielten Wärmegewinn, kann aber allein nicht als ein einwandfreies Maß für die erzielte Frostschutzwirkung angesehen werden, da gerade die Form der Temperaturkurve unterhalb der Temperaturgrenze, die für die betreffende Pflanze den Frosttod bedeutet, die entscheidende Rolle spielt.

Die meisten vorliegenden Beobachtungsreihen beginnen etwa um 22 Uhr. Die Differenz zwischen der zu dieser Zeit herrschenden Temperatur  $T$  und dem Betrag des Minimums  $T_{\text{Min}}$  sei als Temperaturabfall  $A$  angesehen. Bildet man nun zwischen dem Temperaturabfall im ungeschützten ( $A_1$ ) und im geschützten Raum ( $A_2$ ) die Differenz  $A_1 - A_2$ , so gibt diese Größe, die mit  $\Delta A$  bezeichnet werden soll, einen Anhalt für die thermische Wirkung

des Bedeckungsverfahrens. Bei  $\Delta A = 0$  ist der Temperaturfall innen und außen gleich; ist  $\Delta A$  positiv, so kühlt sich der geschützte Raum langsamer ab als der ungeschützte und umgekehrt schneller bei negativem  $\Delta A$  (Abb. 36).

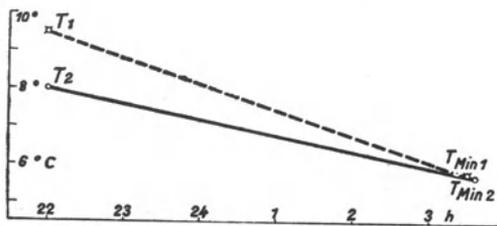


Abb. 36. Berechnung des  $\Delta A$ -Wertes.

Abb. 36. Berechnung des  $\Delta A$ -Wertes.

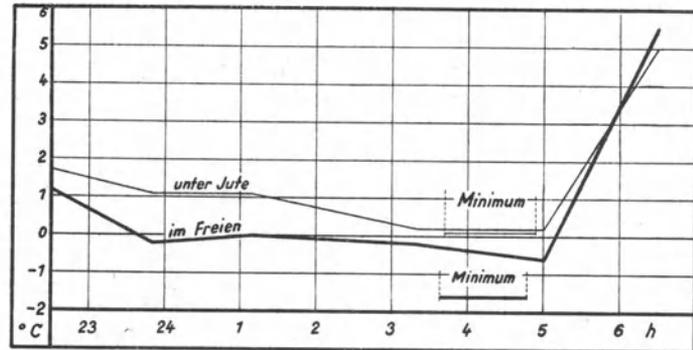


Abb. 37. Zeltförmig ausgespannte Jutetücher. Oppenheim, 11./12. Mai 1928. Ungefäher Temperaturverlauf (Terminablesungen in 70 cm Höhe unter Jutezelt und im Freien).

Beispiel: Berechnung des  $\Delta A$ -Wertes (in 50 cm Höhe) für Strohmatte in dachförmiger Aufstellung nach den Messungen in Serrig (Heiligenborn) am 13./14. Mai 1929 (Tabelle 13).

Tabelle 13

	Im Freien	Unter Stroh
Ablesung 22 Uhr ( $T_1$ bzw. $T_2$ )	9,5° C	8,0° C
Minimum ( $T_{Min1}$ bzw. $T_{Min2}$ )	5,8	5,7
Abfall ( $A_1$ bzw. $A_2$ ) . . . . .	3,7	2,3

$$\Delta A = A_1 - A_2 = 3,7 - 2,3 = + 1,4 \text{ Grad.}$$

Bei diesem Versuch standen die Maten auch tagsüber über den Reben. Daher ist die Lufttemperatur zunächst unter Stroh niedriger. Der Vergleich der Minima allein würde auf einen schwach negativen Effekt schließen lassen.

Aber auch der so gebildete  $\Delta A$ -Wert reicht allein nicht aus, den thermischen Effekt der Bedeckungsverfahren festzulegen. Die  $\Delta A$ -Werte für die einzelnen Methoden sind nicht annähernd gleich groß, wie vor allem die Versuchsreihe Oppenheim vom 28./29. Juni 1929 zeigt (Tabelle 15). Alle großflächigen Bedeckungsmaßnahmen wiesen in dieser Nacht  $\Delta A$ -Werte von der Größenordnung 0 auf; die entsprechenden Werte für die Schirme und Hauben sind sogar um wenig negativ. Es muß hierzu bemerkt werden, daß die Meßreihe erst um 22 Uhr beginnt. Die Tatsache, daß die Messungen erst zu einer Zeit anfangen, als nach Sonnenuntergang die überwiegende Ausstrahlung längst vorherrschte (Tabelle 14), läßt den Schluß zu, daß im vorliegenden Fall tatsächlich schon eine Schutzwirkung des Systems zu dieser Zeit vorlag und nicht eine auf lokale Einflüsse zurückzuführende Differenz. Offensichtlich wären andere  $\Delta A$ -Werte erschienen, wenn die Messungen vor Sonnenuntergang begonnen hätten.

Der Umschlagpunkt der Strahlungsbilanz muß also der Ausgangspunkt für die Bildung der  $\Delta A$ -Werte sein. Wiederum erweist sich der Mangel an Registrierungen als störend.

Zeichnet man lediglich mit Hilfe von Terminbeobachtungen die Temperaturkurven unter dem Schutzdach und außerhalb desselben, so scheint gelegentlich wenigstens bis gegen Sonnenaufgang der Temperaturgang ein ähnlicher zu sein (Abb. 37). Zieht man jedoch bei dem Vergleich der beiden Kurven auch noch die eingetretenen Minima hinzu, so zeigt sich, daß die verhältnismäßig wenigen Terminablesungen nicht ausreichen, den wahren Temperaturverlauf im Freien zu erfassen; denn das gemessene Minimum liegt um 1 Grad tiefer als die Ablesung von 5 Uhr. Der Temperaturverlauf im Zelt trifft eher den wahren Verlauf. Es zeigt sich jedenfalls, daß einzelne Terminablesungen nicht ausreichen, den Temperaturverlauf im Freien zum mindesten in seinen charakteristischen Zügen zu erfassen, daß vielmehr unbedingt Aufzeichnungen mit möglichst trägheitslosen Registrierinstrumenten anzustreben sind. Diese standen damals allerdings dem Versuchsansteller nicht zur Verfügung.

Tabelle 14. Differenzen der Minima geschützt gegen ungeschützt in 50 cm Höhe bei Hauben und Schirmen

	Winzerheil (angebracht in 50   75   100 cm Höhe)			Breveta (auf Boden)	Schacht (auf Boden)	Steinmüller (auf Boden)	Minimum im Freien
	50	75	100				
Oppenheim 1929 24./25.IV. . .	+ 0,8° C	+ 0,8° C	+ 0,3° C	—	—	—	— 4,7° C
Oppenheim 1929 25./26.IV. . .	+ 0,8	—	—	0,0° C	+ 0,7° C	+ 0,3° C	— 4,4
Oppenheim 1929 28./29.VI. . .	+ 0,6	—	—	+ 0,4	+ 0,4	+ 0,5	+ 4,0
Serrig-Vogelsang 1929 19./20.V. . .	+ 1,0	—	—	—	—	—	+ 1,5
Serrig-Vogelsang 1929 20./21.V. . .	+ 1,3	—	—	—	—	—	+ 2,2

Tabelle 15.  $\Delta A$ -Werte für 50 cm Höhe bei Hauben und Schirmen

	Winzerheil (in 50 cm Höhe angebracht)	Breveta (auf Boden)	Schacht (auf Boden)	Steinmüller (auf Boden)
Oppenheim 1929 25./26.IV. . .	+ 0,6° C	+ 0,3° C	+ 0,7° C	+ 0,7° C
Oppenheim 1929 28./29.VI. . .	— 0,4	— 0,6	— 0,5	— 0,1
Serrig-Vogelsang 1929 19./20.V. . .	+ 0,7	—	—	—
Serrig-Vogelsang 1929 20./21.V. . .	+ 0,8	—	—	—

Aus dem verschiedenen Verlauf der Temperaturen im Freien und im bedeckten Raum muß aber gefolgert werden: fällt die Außentemperatur ziemlich stark ab und setzt vor allem dieser Abfall plötzlich ein, so reagiert die Temperatur innerhalb des geschützten Raumes nicht sofort auf diesen äußeren Abfall, vielmehr macht sich als typisches Merkmal der Bedeckungsmaßnahmen die thermische Trägheit des Schutzsystems geltend. Daß sie bei allen Bedeckungen, vor allem bei denen mit Matten, Tüchern und dergleichen eine außerordentlich wichtige Rolle spielen muß, geht schon allein aus dem Temperaturverlauf nach Erreichen des Minimums hervor; bleibt doch die im geschützten Raum am Morgen einsetzende Temperaturzunahme stets stark hinter der im Freien stattfindenden zurück, so daß der geschützte Raum längere Zeit nach Sonnenaufgang erheblich kälter als der ungeschützte ist. Da also die Bedeckungsmaßnahmen infolge ihrer thermischen Trägheit Temperaturschwankungen mehr oder weniger ausgleichen, können sie sogar über recht starke Temperaturstürze hinweghelfen, sofern sie nicht von zu langer Dauer sind, und können Minimaspitzen im Temperaturverlauf restlos unterdrücken.

Nach alledem läßt sich der thermische Effekt der Bedeckungsmaßnahmen dadurch erfassen, daß wir

1. Die Minima geschützt gegen ungeschützt vergleichen,
2. Das Ausbleiben scharfer Temperaturstürze beobachten und
3. Die  $\Delta A$ -Werte unter Berücksichtigung des richtigen Ausgangswertes, nämlich des Umschlagspunktes der Strahlungsbilanz feststellen.

Mit ganz geringen Ausnahmen wurde bei unseren Bedeckungsversuchen ebenso wie bei den anderen Verfahren die Luft- bzw. Pflanzentemperatur in 50 cm Höhe über dem Erdboden gemessen. Einmal befindet man sich in dieser Höhe zwar noch immer in der bodennahen Schicht, ist aber doch auch wieder von Zufälligkeiten der Unterlage weniger abhängig, zum anderen entspricht sie aber auch im allgemeinen der Austriebshöhe der frostempfindlichen Sprosse. Wenn wir also im folgenden an Hand des Beobachtungsmaterials den Nutzeffekt der einzelnen Bedeckungsmethoden näher untersuchen, so haben wir uns aus dem eben angeführten Grunde in erster Linie auf die Messungen in 50 cm Höhe beschränkt. Für die Zwecke der Untersuchung des Wärmeumsatzes unter den Bedeckungen werden selbstverständlich auch Messungen in anderen Bodenabständen herangezogen.

Eine wirklich einwandfreie Angabe des Nutzeffektes, die allen Ansprüchen gerecht würde, ist zur Zeit schlechterdings unmöglich. Alle später angegebenen Zahlenwerte stellen nichts anderes als Mittelwerte dar, gefunden aus einer größeren oder kleineren Anzahl von Versuchsreihen unter weitmöglichster Ausschaltung von irgendwelchen Zufälligkeiten, bzw. unter Berücksichtigung von besonderen Versuchsbedingungen.

#### D. Meßergebnisse bei den verschiedenen Bedeckungsverfahren.

##### 1. Technische Einzelheiten der Versuchsanstellung.

Die im folgenden herangezogenen Ergebnisse stammen teils von J. Löschnig<sup>223)</sup> und W. Schmidt<sup>343)</sup>, teils wurden sie unter der Leitung von O. W. Kessler an der Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau in Oppenheim, auf der Domäne Serrig (Saar) und auf der Staatlichen Rebschule in Diez (Lahn) er-

halten. Zur selben Zeit wurden außerdem noch an einer weiteren großen Zahl von Stellen Bedeckungsversuche mit Strohmaten und sogenannten Ernteschutzdecken durchgeführt. Wenn auch die zuletzt erwähnten Stellen keine Meßergebnisse lieferten, so erbrachten sie zum mindesten den Beweis der Durchführbarkeit dieser Schutzmaßnahmen auch in Großbetrieben. Wurden doch allein im Jahre 1929 insgesamt 44 500 m<sup>2</sup> Strohmaten hergestellt und zu Versuchen benutzt; sie waren wie folgt verteilt:

Schloß Saarfels . . . . .	16000 m <sup>2</sup>
Weinbaulehranstalt Veitshöchheim . . . . .	5440
Rebenveredlungsanstalt Diez a. d. Lahn . . . . .	5540
Lehr- und Versuchsanstalt Oppenheim . . . . .	2000
Lehr- und Versuchsanstalt Neustadt a. d. H. . . . .	2270
Neumagen . . . . .	500
Wernher, Nierstein . . . . .	500
Dr. Balz, Alzheim . . . . .	500
Marienlay a. d. Ruwer . . . . .	5750
Württ. Versuchsanstalt bei Weinsberg . . . . .	500
Klein Winternheim bei Mainz . . . . .	500
Domäne Serrig, Schloß Saarstein, Domäne Avelsbach . . . . .	rund 5000
	44500 m <sup>2</sup>

Löschnig<sup>224)</sup> überdeckte seinerzeit nach Sonnenuntergang einige Weinstöcke mit Hauben und Schirmen und maß die Temperatur unter und außerhalb der Bedeckung in gleicher Höhe. Die Höhe der Thermometer über dem Erdboden ist jedoch nicht angegeben; des weiteren fehlt eine Angabe darüber, ob die Thermometer im Freien einen Strahlungsschutz besaßen oder nicht (wir neigen zu der Annahme des letzteren). Der Temperaturverlauf wird durch eine nicht sehr große Anzahl von Terminbeobachtungen festgehalten; die Beobachtungen brechen vor allem zu früh ab, und das eingetretene Minimum wird auch nicht gemessen. Infolgedessen sind die Resultate nicht ohne weiteres mit denen anderer Versuchsansteller zu vergleichen.

W. Schmidt<sup>343)</sup> hat eine große Reihe von Hauben und Schirmen, und zwar nicht nur solche aus Papp, sondern auch solche aus Stroh, Zellstoffglas und Metall einer Prüfung unterzogen. Anschließend hat er, auf die Resultate seiner Untersuchungen aufbauend, neue Typen entwickelt, die besonders leistungsfähig sein sollen. Ihre Einführung in die Praxis scheidet allerdings an der Kostenfrage. Die Temperaturen unter den Bedeckungen konnten mittels Thermoelementen in jeder beliebigen Höhe gemessen werden. Zu diesem Zweck ließ Schmidt Zellhornröhrchen teils längs der Haubenachse, teils in anderen Richtungen durch die Wand hindurch in das Innere hineinragen. Zur Messung wurden dann die Thermoelemente in die Röhrchen eingeführt. Die Größe des jeweiligen Thermostromes wurde an einem Schleifengalvanometer von Zeiß abgelesen. Auf diese Weise nahm Schmidt unter verschiedenen Hauben mehrere Messungen vor.

Da Schmidt zum Bau der Thermoelemente recht dünne Drähte verwendete, so gaben dieselben, solange er sie außerhalb der Zellhornröhrchen benutzte, annähernd die wahre Lufttemperatur an. Auch die Messungen im Inneren der Zellhornröhrchen dürften, soweit sie von der Haube überdeckt waren, die wahre Lufttemperatur wiedergeben. Es geht nun aber aus der Arbeit von Schmidt nicht klar hervor, ob die äußere Lufttemperatur bei der Untersuchung über die „typische Temperaturverteilung unter einem Frostschirm“ gleichfalls durch Einführen der Thermoelemente in die Röhrchen bestimmt wurde. In diesem Fall wäre dann die durch die Ausstrahlung hervorgerufene Untertemperatur der Röhrchen wieder zu berücksichtigen. Weiterhin muß angenommen werden, daß Schmidt auch die Messung der Temperaturverteilung auf der Haubenwand und in deren Nähe durch Abtasten in den durch die Wand gesteckten Röhrchen vorgenommen hat. Die Messung von Oberflächentemperaturen der Hauben ist aber nach dieser Methode bestimmt nicht einwandfrei.

Für die Messung an den Pflanzen selbst wurde von Schmidt ein Thermoelement gebaut, bei dem die Lötstelle frei in einem kurzen geraden Stück eines durch geeignete Federn gespannten Drahtes lag. Angesetzt wurde das Element so, daß außer der Lötstelle noch ein kleines Stück Draht eng an dem zu untersuchenden Trieb anlag.

O. W. Kessler hat im Mai 1928 zum erstenmal versucht, die thermische Wirkung des Überspannens einer größeren Fläche mit Tüchern festzustellen. Es wurde damals eine Fläche von 560 m<sup>2</sup> 1 m hoch durch Juteleinwand überspannt. An den Seiten war der geschützte Raum nach außen völlig abgeschlossen. In der Mitte dieses Zeltens und in 5<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Meter Abstand außerhalb desselben waren je zwei ungeschützte Minimumthermometer aufgestellt, eines 0,8 cm, das andere 70 cm über dem Boden.

Die durch diesen Versuch gewonnenen Zahlenwerte sind aus dem Grund nicht ganz einwandfrei, weil schon kurz nach Mitternacht in der Nähe des Versuchsfeldes mit Räuchern begonnen wurde. Vor allem aber ist, wie früher eingehend gezeigt wurde, mit einer solch geringen Anzahl von Terminablesungen der Temperaturverlauf im Freien höchstens annäherungsweise darstellbar.

Bei den Oppenheimer Bedeckungsversuchen von 1929 diente als Versuchsfeld eine etwa 300 m<sup>2</sup> große, ebene und tiefelegene Ackerfläche, die rings von Wein- und Obstgärten umgeben war. Bei den großflächigen

Bedeckungsmaßnahmen gelangten in erster Linie Strohmatte zur Untersuchung, daneben in geringem Umfang Wellpappe und wetterfestes Papier. Diese Stoffe waren teils dachförmig aufgestellt, teils einseitig schräg von Westen oder Osten an die Drähte gelehnt. Ferner war je eine Strohmatte und eine Bahn wetterfesten Papiers in 70 cm Höhe über dem Boden ausgespannt. Von jedem Material waren 10 Meter lange Streifen aufgestellt. Von den Einzelbedeckungen wurden neben dem Schirm Winzerheil die Hauben Breveta, Schacht und Steinmüller (Abb. 20 w, l—n, g, h) untersucht. Die Messungen selbst wurden am 24./25. April, 25./26. April und 28./29. Juni 1929 vorgenommen. Die Aufstellung der Materialien fand am 24. April vormittags, am 25. April nach Sonnenuntergang und am 28. Juni nachmittags statt.

Die zur Temperaturmessung benutzten Thermometer waren alkoholische Minimumthermometer von F. u. E. ohne Strahlungsschutz. Sie lagen zum Teil dicht über dem Boden, zum anderen Teil lagen sie in 50 cm hohen Holzgestellen, die so gebaut waren, daß die Thermometer in Horizontallage frei über dem Boden zu liegen kamen. Da nun die einzelnen Haubentypen verschieden hoch sind, die Thermometer aber durchweg in einer Höhe von 50 cm angebracht waren, lagen dieselben manchmal mehr, manchmal weniger weit von dem oberen Ende der Hauben entfernt; aber auch im letzteren Fall wurde das Thermometergefäß so angebracht, daß der Abstand von der Haubenwand möglichst groß war. Zum Ablesen wurden die Thermometer in der Führung des Gestelles rasch herausgezogen.\*) Unter den Einzelbedeckungen wurde außerdem noch in verschiedenen anderen Höhen gemessen. Der nächtliche Temperaturverlauf wurde mit Ausnahme vom 24./25. April, in welcher Nacht nur die Minima abgelesen wurden, durch halbstündliche Ablesung zwischen 21 Uhr 30 und 05 Uhr und durch Notierung des Minimums festgestellt.

Das Versuchsgelände auf der Domäne Serrig hat im Gegensatz zu dem ebenen Gelände von Oppenheim südliche und südwestliche, zum Teil sehr steile Hanglage, die bis zu 60 % Neigung aufweist. An den oberen Weinbergsrand, der etwa 100 m über der Talsohle liegt, schließt sich schwach geneigtes Ackerland an. Die sich hier bildende Kaltluft fließt über den Weinberg in das Tal ab, wo sie sich sammelt und zur Bildung eines Kaltluftsees Anlaß gibt. Es nimmt also die Frostgefahr nach der Talsohle hin zu. Aus diesem Grunde wurden die Versuche in zwei Schlägen verschiedener Höhenlage durchgeführt. Die Weinbergslage Vogelfang reicht von der Talsohle bis etwa 20 Meter darüber und ist also, da im Kaltluftsee gelegen, besonders frostgefährdet. Der Schlag Heiligenborn liegt höher als die Lage Vogelfang; er erstreckt sich vom oberen Weinbergsrand bis ungefähr 40 Meter talabwärts und bleibt damit noch etwa 60 Meter über der Talsohle (Abb. 38).

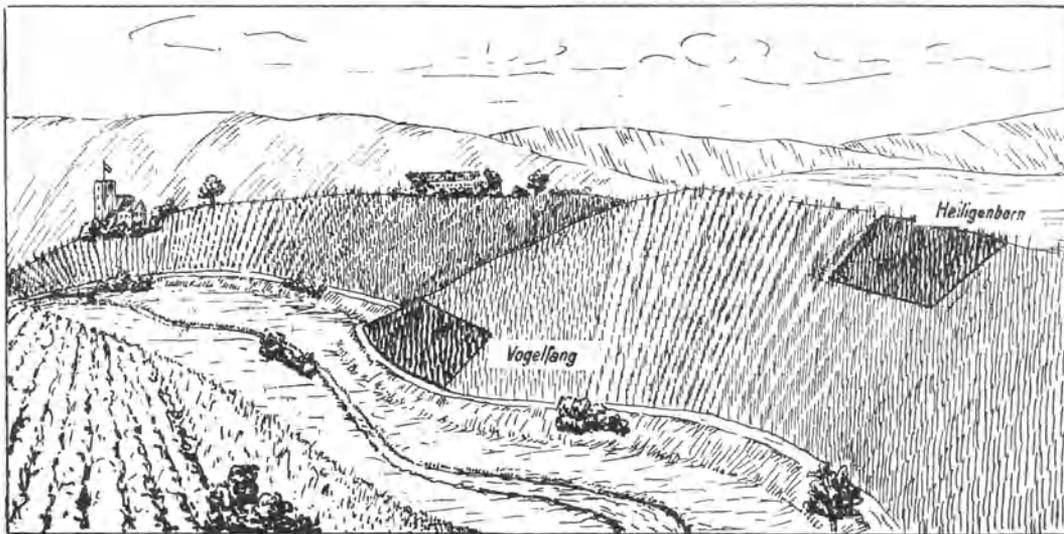


Abb. 38. Geländeskizze der Domäne Serrig/Saar. (Versuchsfelder umrandet.)

In diesen beiden Versuchsfeldern wurden Strohmatte dachförmig aufgestellt, und zwar mit dem Gefälle und senkrecht dazu verlaufend, ferner Strohmatte von Westen, Osten oder Norden angelehnt und schließlich Strohmatte und wetterfestes Papier in 70 cm Höhe horizontal ausgespannt (Abb. 172, Tafel 3); als Einzelbedeckung kam der Schirm „Winzerheil“ zur Anwendung (Abb. 173, Tafel 3). Die Matte wurden in der Zeit vom 5. bis 8. Mai aufgestellt, die Papierdecken am 13. Mai ausgespannt und am selben Tag auch die Schirme angebracht. Alle Schutzstoffe blieben während der Dauer der Versuche (drei Wochen) ununterbrochen auf ihrem

\*) Elektrische Meßgeräte standen damals dem Versuchsansteller nicht zur Verfügung.

Platz, nur bei der dachförmigen Bedeckung wurden die von der Westseite angelehnten Matten tagsüber entfernt. Die ungeschützten Thermometer lagen in gleicher Weise wie bei den Oppenheimer Versuchen in 50 cm Abstand vom Boden, wurden aber nur nachts abgelesen. In jedem Versuchsfeld standen die Thermometer in gleicher Höhe über der Talsohle. In einer Reihe von Nächten wurden nur die erreichten Minimaltemperaturen abgelesen, in einzelnen Nächten jedoch halbstündlich Temperaturwerte notiert. Es wurde mit diesen Terminablesungen aber zu früh abgebrochen, und zwar immer schon vor Eintritt des Minimums.

Bei den Versuchen an der Staatlichen Rebschule in Diez, durchgeführt von W. Heuckmann, handelt es sich um den Schutz einer Pfropfrebenpflanzung, die in sogenannte Hügel eingeschult wird. Diese Hügel sind in der bekannten Form der Spargelbeete angelegt und bestehen aus Erde mit Abdeckung von Torf und Sägespänen.

Bei diesen Versuchen kamen ausschließlich Strohmatte als Bedeckungsmaterial zur Verwendung. Die einzelnen Aufstellungsarten waren folgende: dachförmige Bedeckung von einer oder zwei Hügelreihen, zeltförmige Bedeckung einer Fläche von 23 Reihen bei seitlichem Abschluß, einseitige Bedeckung von Osten bzw. von Westen und endlich Ausbreitung der Matten über die Hügel selbst (Abb. 174, Tafel 3). Die Aufstellung der Decken fiel in die Zeit vom 3. bis 9. Mai und wurde meist einige Tage nach dem Einschulen vorgenommen. Die ungeschützten Thermometer waren wiederum in 50 cm Abstand über dem Boden angebracht; bei der Bedeckung der Hügel durch einfaches Auflegen der Matten auf den Boden befanden sie sich zwischen Erdboden und Matte. Die Meßergebnisse konnten nicht ganz kritiklos hingenommen werden. Einige zweifelhafte Werte wurden nach Prüfung ausgelassen.

## 2. Großflächige Bedeckungsmaßnahmen.

### a) Die einseitige Bedeckung.

Die Wirkung der einseitigen schrägen Bedeckung besteht einmal aus einer Strahlungsschutzwirkung; ferner stellen — wenigstens bei fließender Kaltluft, also nicht im Kaltluftsee selbst — die bedeckten Zeilen ein Hindernis für die Luftbewegung dar. Dies kann sich sowohl günstig als auch ungünstig auswirken. Die Strahlungsverhältnisse für ein Flächenelement am Boden, bzw. für ein solches in 50 cm Höhe (Höhe der Pflanzentriebe) sind in den Abbildungen 39 und 40 wiedergegeben (vergleiche die Ausführungen auf Seite 69). Die einseitige und schräge Auf-

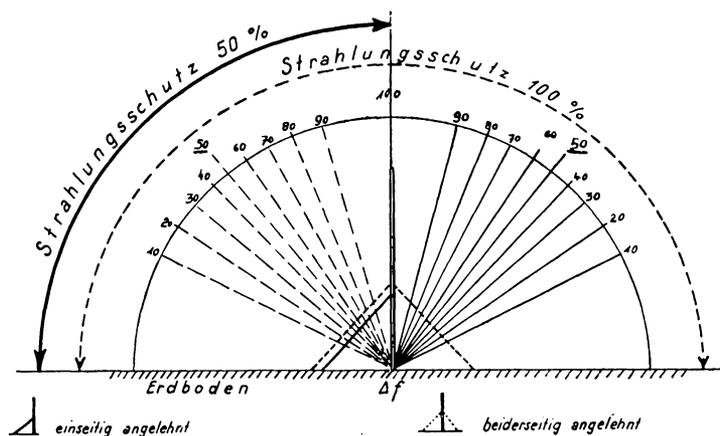


Abb. 39. Strahlungsverhältnisse für ein horizontales Flächenelement  $\Delta f$  am Boden unter einseitiger Bedeckung.

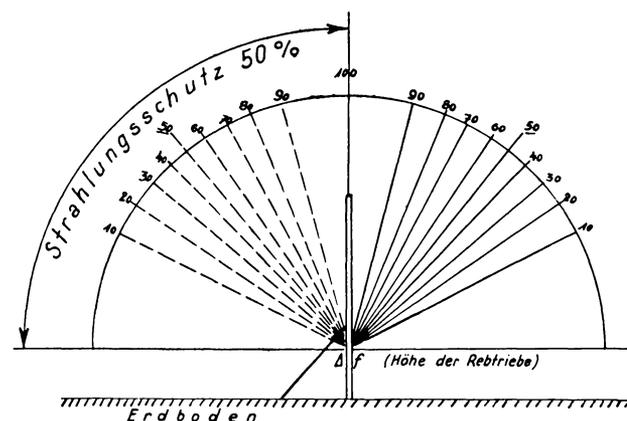


Abb. 40. Strahlungsverhältnisse für ein horizontales Flächenelement  $\Delta f$  in 50 cm Höhe über dem Boden unter einseitiger Bedeckung.

stellung von Matten deckt nun, sofern die Länge derselben nicht allzu geringe Werte annimmt — bei den Versuchen von Kessler betrug die Länge 10 m —, praktisch gerade die Hälfte der Himmelshalbkugel ab; d. h. der durch diese Bedeckungsart erzielte Strahlungsschutz beträgt 50 % des größtmöglichen. Voraussetzung ist ebenes oder nicht zu steil geneigtes Gelände. Ist das Gelände steil, so bedeutet das Anbringen der Matten unterhalb der Zeilen einen größeren Strahlungsschutz, da die abschirmende Wirkung der Steilwand dazukommt (unter Voraussetzung gleichen Anstellwinkels!)

Bei starker Ausstrahlung sind nun am Thermometer ohne Strahlungsschutz, wie wir oben festgestellt haben, Unterschiede bis etwa  $1,5^{\circ}$  gegenüber der wahren Lufttemperatur zu erwarten. Aus aktinometrischen Messungen ist bekannt, daß die Untertemperatur einer strahlenden schwarzen Fläche annähernd linear mit der Ausstrahlungsstärke wächst. Demnach kann die Untertemperatur eines Pflanzenteiles annähernd in linearer Abhängigkeit vom Strahlungsschutz gesetzt werden. Wir können also Tabelle 16 aufstellen:

Tabelle 16

Strahlungsschutz in Prozenten	Voraussichtliche extreme Untertemperatur des Thermometers der Pflanze	Nutzeffekt der Bedeckungsmethode durch Strahlungsschutz
0 %	1,5° C	0,0° C
20	1,2	0,3
40	0,9	0,6
60	0,6	0,9
80	0,3	1,2
100	0,0	1,5

Bei einem Strahlungsschutz von rund 50 %, wie er durch die einseitige Bedeckung erzielt wird, werden wir also im Höchstfall einen Effekt von 0,7—0,8° auf die Abänderung der Strahlungsverhältnisse zurückführen dürfen.

Aus den Meßergebnissen von Kessler geht hervor, daß nur in seltenen Fällen dieser Maximalwert erreicht wird. Er tritt nur bei ruhender Luft ein. Jeder Luftaustausch wirkt im Sinne einer Wärmezufuhr zu dem abgekühlten, frei aufgestellten Thermometer; die Differenz zwischen dem geschützten und dem ungeschützten Thermometer wird daher geringer.

In Bodennähe wird außerdem durch den Luftaustausch das dem geschützten Boden aufliegende Warmluftpolster (siehe Abb. 55, Seite 84 nach Schmidt, auch bestätigt aus den Messungen Seite 88) weggeräumt, was gleichfalls eine Verringerung des Effektes zur Folge hat.

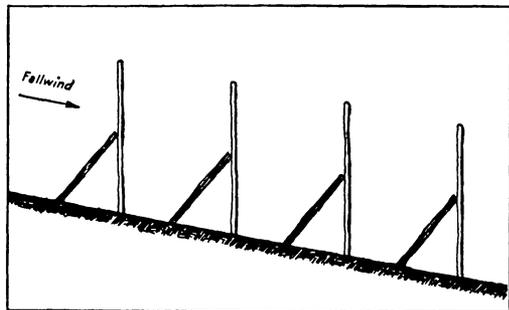


Abb. 41. Windrichtung und Aufstellung der Schutzvorrichtung bei einseitiger Bedeckung.

Die Wirkungsweise der einseitigen Bedeckung, und damit vielfach auch der erzielte Effekt, ist bei fließender und ruhender Kaltluft verschieden. Durch eine senkrecht zur Strömungsrichtung aufgebaute Schutzvorrichtung wird die Luftbewegung abgebremst (Abb. 41). In diesem Fall wird dann die Wirkungsweise der einseitigen Bedeckung bei nur mäßig hohem Kaltluftstrom der einer Windschutzhecke ähnlich. Die Abbremsung der herangeführten Luftmassen bedingt ein Absetzen der kälteren Luftteilchen vor der Schutzwand und damit die Ausbildung einer kleinen Kaltluftpfütze. Dabei bieten schräg aufgestellte Matten nur den auf ihrer Rückseite bzw. unterhalb gelegenen Kulturen Schutz, die vor ihnen gelegenen Pflanzen sind dagegen in erhöhtem Maße frostgefährdet. Für den Wirkungsgrad der einseitigen Bedeckung bei fließender Kaltluft ist die Richtung

der Luftströmung bzw. die Aufstellungsrichtung des Schutzes demnach von höchster Bedeutung. Kommt während der Zeit, in der die Matten im Weinberg stehen, stürmischer Wind auf, so entstehen Windschäden durch Abschlagen der Triebe (Abb. 175, Tafel 3).

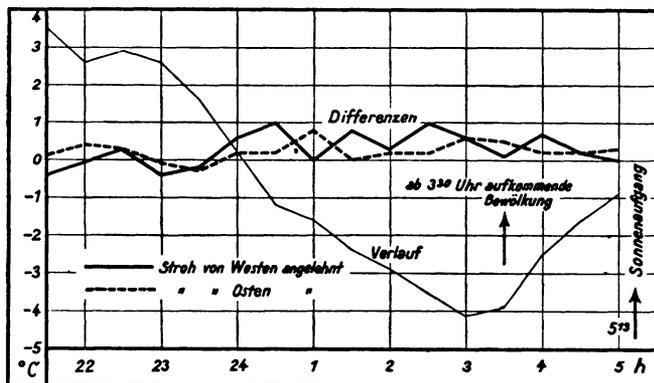


Abb. 42. Einseitig schräg angelehnte Strohmatte. Oppenheim, 25./26. April 1929. Temperaturverlauf im Freien und Verlauf des Unterschiedes der Temperaturen bei einseitig angelehnten Strohmatte gegenüber ungeschützt (50 cm Höhe).

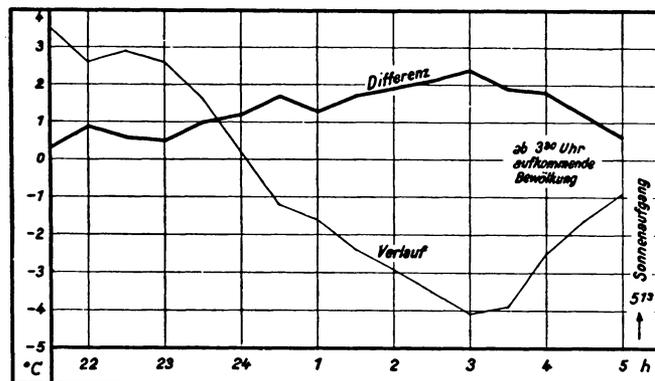


Abb. 43. Dachförmig aufgestellte Strohmatte. Oppenheim, 25./26. April 1929. Temperaturverlauf im Freien und Differenz gegen ungeschützt (50 cm Höhe).

Bei den vorliegenden Versuchsergebnissen läßt sich die Trennung des Gesamteffektes in die beiden oben angeführten Faktoren nicht durchführen, da aus Mangel an Instrumenten keine feineren Windmessungen zur gleichen Zeit vorgenommen werden konnten.

Der Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen geschützten und ungeschützten Thermometern zeigt einen geringen Effekt von nur wenigen Zehntel Grad und ein dauerndes Schwanken dieser Differenz, die sogar manchmal negativ wird (Abb. 42). Eine Zunahme des Effektes bei der von Osten angelehnten Bedeckung entspricht den Werten der Abbildung 42. Ein solch offenes Schutzsystem reagiert also schon auf die geringste Luftmassenverschiebung.

Die erzielten Schutzeffekte betragen im Mittel  $0,5^{\circ}$ , der Optimalwert liegt einige Zehntel Grad höher. Unter diesem Effekt ist die Zahl zu verstehen, um welche die kritische Temperatur der Pflanze, die ihren Frosttod unter den vorliegenden physiologischen Umständen verursacht, im Freien für kurze Zeit unterschritten werden darf, ohne daß sich bei den bedeckten Pflanzen Schäden zeigen.

### b) Die dachförmige Bedeckung.

Die dachförmige Aufstellung von Schutzstoffen bedingt für die darunter befindlichen Pflanzen einen völligen Ausstrahlungsschutz (Abb. 39).

Auf der Abgeschlossenheit des Systems gegen die Außenluft und vor allem auf den geringen Wärmedurchlaß seiner Wände beruht seine schon früher erwähnte thermische Trägheit. Legen wir den Verlauf der Lufttemperaturen innen gegen außen aus den Oppenheimer Versuchen von 1929 zugrunde, so bemerken wir ein allmähliches Ansteigen der Differenzen bis zum Zeitpunkt des äußeren Temperaturminimums (Abb. 43). Die Differenz beträgt hier  $2,4^{\circ}$ . Damit ist die Trägheit dieses Schutzsystems erwiesen, die einen um mehr als  $1^{\circ}$  höheren Effekt liefert, als er allein aus dem Ausstrahlungsschutz zu erwarten ist. Dazu kommt noch die Unterdrückung der mit den vorhandenen Messungen nicht erkennbaren Minimumspitze. Die Temperatur des geschützten Raumes bleibt aus dem gleichen Grunde nach Sonnenaufgang durchweg gegenüber der im Freien stark zurück.

Die größeren Differenzen des Temperaturverlaufs, die sich in Bodennähe gegenüber dem in 50 cm Höhe zeigen, erklären sich daraus, daß draußen die Bodenoberfläche die kälteste Stelle und die ihr auflagernde unterste Luftschicht gleichfalls die kälteste ist. Im Inneren des Schutzsystems ist dagegen die vor Ausstrahlung geschützte Bodenoberfläche und die ihr unmittelbar aufliegende Luft die wärmste Stelle des geschützten Raumes.

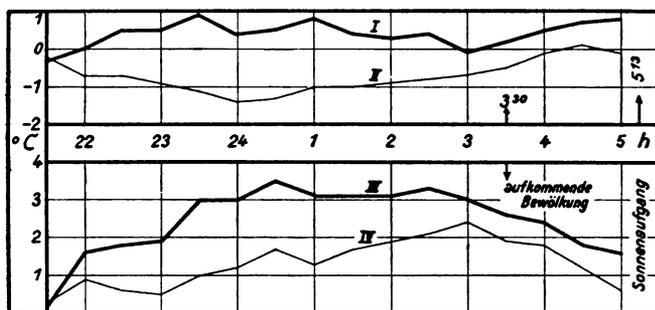


Abb. 44. Dachförmig aufgestellte Strohmatte. Oppenheim, 25./26. April 1929.

I. Temperaturdifferenz Bodennähe minus 50 cm Höhe unter der Bedeckung. — II. Temperaturdifferenz Bodennähe minus 50 cm Höhe im Freien. — III. Temperaturdifferenz geschützt minus ungeschützt in Bodennähe. — IV. Temperaturdifferenz geschützt minus ungeschützt in 50 cm Höhe.

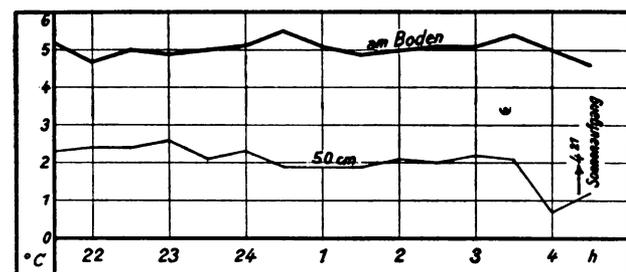


Abb. 45. Dachförmig aufgestellte Strohmatte. Oppenheim, 28./29. Juni 1929.

Verlauf der Temperaturdifferenz geschützt minus ungeschützt in Bodennähe und in 50 cm Höhe.

Die Kurve I der Abbildung 44 zeigt, daß im Inneren der dachförmigen Strohbedeckung die Temperaturdifferenz  $T_{\text{Boden}} - T_{50 \text{ cm}}$  (von einer unbedeutenden Ausnahme abgesehen) stets positiv ist. Der zeitliche Verlauf dieser Differenz ist ziemlich gleichmäßig. Wir können also von einem dem Boden aufliegenden flachen Warmluftpolster sprechen, wie Schmidt und wir es auch bei Einzelbedeckungen vorfinden.

Die Differenz der Temperaturen in Bodennähe gegen die in 50 cm außen (Kurve II) ist bis kurz vor Sonnenaufgang stets negativ, besonders stark im vorliegenden Falle um Mitternacht. Daß sie allmählich abnimmt und nach 03 Uhr 30 gänzlich verschwindet, ist auf einen plötzlichen Temperaturanstieg infolge des Ausstrahlungsschutzes unter aufkommender Bewölkung, der sich besonders stark am Boden bemerkbar macht, zurückzuführen. Für beide Thermometer fällt zunächst die durch die Ausstrahlung sonst hervorgerufene Abkühlung gegenüber der Luft weg. Die dem Boden aufliegende allerunterste Luftschicht wird in diesem Fall durch Wärmeleitung vom Boden her sogar wärmer als die Schicht in 50 cm Höhe. Eine Andeutung davon erkennen wir bei Kurve II um 04 Uhr 30. In der durch die nächtlichen Wärmeumsätze hervorgerufenen bodennahen Temperaturumkehrschicht

haben wir eine abermalige Inversion, die sich auf die alleruntersten Zentimeter der dem Boden aufliegenden Luft-haut beschränkt.

Im Gegensatz hierzu zeigen die Juni-Messungen (Abb. 45) einen nahezu konstanten Verlauf der Differenzkurven geschützt gegen ungeschützt für Bodennähe und 50 cm Höhe, erstere im Bereich von Temperaturen um  $5^{\circ}$ , die andere in einem solchen um  $2^{\circ}$ . Da während der ganzen Nacht bewölkungsfreier Himmel herrschte, sind für die hohen Differenzbeträge zwischen innen und außen zwei Ursachen maßgebend: die große Bodenwärme infolge starker Einstrahlung tagsüber und die kürzere Dauer des Überwiegens der Ausstrahlung in der Sommer-nacht, die die thermische Trägheit des Systems besser zur Geltung brachte.

Es besteht nun im Effekt nicht nur ein Unterschied zwischen den einzelnen Jahreszeiten, sondern auch zwischen den orographisch verschiedenen Versuchsfeldern. Die Tabelle 17 gibt die Unterschiede zwischen den Differenzen der Temperaturminima der Versuchsserien Vogelsang und Heiligenborn an den jeweils entsprechenden Tagen wieder und zeigt damit vortrefflich die Auswirkung der orographischen Verhältnisse (siehe Seite 74 und Abb. 38).

Tabelle 17. Temperaturminima im Freien und Differenzen der Minima innen gegen außen

Datum (1929)	Vogelsang (Tallage)		Heiligenborn (Hanglage)	
	Minimum	Differenz	Minimum	Differenz
16./17. V.	+ 1,7° C	+ 2,2° C	+ 3,0° C	+ 0,3° C
19./20. V.	+ 1,5	+ 1,5	+ 3,0	+ 0,2
20./21. V.	+ 2,2	+ 2,1	+ 3,8	+ 0,4

Im Versuchsfeld Heiligenborn messen wir in fließender Kaltluft, deren Durchschnittstemperaturen naturgemäß höher sind als die der untersten Luftschichten in dem ruhenden Kaltluftsee des Tales, in welchem das Versuchsfeld Vogelsang liegt. Hier tritt in der bodennahen Luftschicht ausgeprägte Schichtung auf. Infolgedessen sind die Differenzen der Minima von geschütztem und ungeschütztem Raum im Versuchsfeld Heiligenborn klein, im Versuchsfeld Vogelsang dagegen groß. Außer dem Einfluß von ruhender bzw. fließender Luft auf die Ausbildung einer verschieden starken bodennahen Inversion ist auch der Einfluß der Luftbewegung auf die Temperatur des frei aufgestellten Thermometerkörpers zu berücksichtigen. In der stärkeren Luftbewegung im Versuchsfeld Heiligenborn wird die Thermometertemperatur mehr der Lufttemperatur angeglichen als bei dem geringen Luftaustausch im Kaltluftsee des Versuchsfeldes Vogelsang.

Tage- oder gar wochenlang ununterbrochene Aufstellung des Schutzes beeinträchtigt infolge der Einstrahlungsbehinderung am Tage den Nutzeffekt in beträchtlichem Maße. Obwohl in einem solchen Falle der zu schützende Raum an sich schon kälter ist als die freie Umgebung, wird die Bedeckung dennoch wirksam, wenn ein plötzlicher Temperaturabfall einsetzt. Im übrigen leiden die zu lange bedeckten Pflanzen unter einem Lichtmangel, dessen Folgen unter Umständen während der ganzen Vegetationszeit zu beobachten sind.

Endlich ist auch noch die Frage zu klären, welche Unterschiede im Effekt durch Verschiedenheit des Bedeckungsmaterials hervorgerufen werden. Die Abbildung 46 zeigt, daß unter Wellpappe die Temperaturdifferenzen gegen außen fast durchweg etwa  $\frac{1}{2}^{\circ}$  tiefer liegen als unter dem Strohdach, ein Unterschied, der vielleicht schon vom Tage herrührt. Denn der im allgemeinen parallele Verlauf der Temperaturkurven läßt auf eine annähernd gleiche thermische Isolation schließen. Wellpappe ist ein Material von geringer Wärmedurchlässigkeit, wenn es auch die Strohmatte in dieser

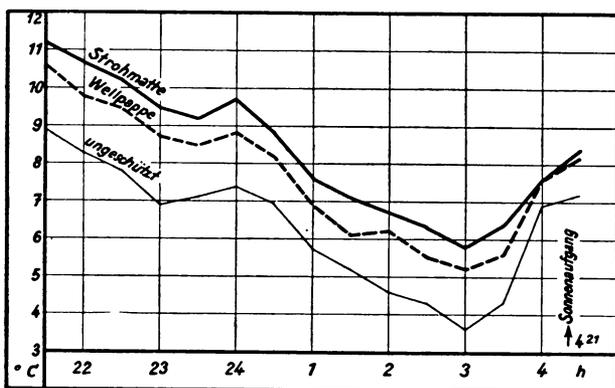


Abb. 46. Temperaturverlauf in 50 cm Höhe unter Strohmatten und Wellpappe in dachförmiger Aufstellung. Oppenheim, 28./29. Juni 1929.

Hinsicht nicht ganz erreicht. Wärmedurchlässigeres Material muß geringeren thermischen Schutz bieten als die beiden bei diesen Versuchen verwendeten Stoffe.

Schon infolge des vollkommenen Strahlungsschutzes werden wir bei der dachförmigen Aufstellung der Schutzmaterialien bei maximaler Ausstrahlung einen Effekt bis zu  $1,5^{\circ}$  erwarten dürfen, bei Bewölkung wird dieser Wert selbstverständlich geringer. Zu diesem durch Ausstrahlungsschutz bewirkten Effekt kommt gegebenenfalls, und vor allem mit der Jahreszeit bzw. der Wetterlage stark wechselnd, zusätzlich noch der Effekt der thermischen Trägheit des Systems hinzu.

Im allgemeinen dürfen wir den durch die dachförmige Aufstellung bewirkten Effekt mit 1,5 bis 2° ansetzen. Der Optimaleffekt kann noch etwas höher liegen, besonders bei plötzlichen Temperaturstürzen von kurzer Dauer.

c) Die zeltförmige Bedeckung.

Zur Beurteilung der zeltförmigen Bedeckung liegt eine Meßreihe vom 11./12. Mai 1928 aus Oppenheim vor (Abb. 37). Die richtige Bewertung der Temperaturdifferenzen wird dadurch erschwert, daß die Terminablesungen mehrere Stunden auseinander liegen und daß in dem Nachbargelände geräuchert wurde, wodurch zeitweise Rauchwolken auch über dem Versuchsfeld lagen. Auf diese Weise ist auch das Zurückbleiben der tiefsten Terminablesung um 1,0° gegenüber dem absoluten Minimum zu erklären.

Greift man aber eine Messung heraus, bei der auf Grund des Protokolls keine Rauchdecke zu verzeichnen war, so ergibt sich Tabelle 18.

Tabelle 18. Oppenheim 11./12. V. 1928; 23 Uhr 50

Instrumentaltemperatur	Im Freien	Unter Jutezelt	Differenz
Bodennähe . . . . .	— 0,8° C	+ 2,5° C	3,3° C
70 cm Höhe . . . . .	— 0,2	+ 1,1	1,3

Hiernach ist die vertikale Temperaturverteilung unter der zeltförmigen Bedeckung analog der unter der dachförmigen. In 70 cm Höhe ergibt sich ein Effekt von 1,3°, der ungefähr dem Strahlungsschutz entspricht. Bei der Beurteilung dieses Effektes ist die größere Höhe von 70 cm zu berücksichtigen. Im allgemeinen werden die unter der zeltförmigen Bedeckung erzielten Effekte denen unter der dachförmigen entsprechen; Unterschiede werden auch hier vorwiegend durch die zur Bedeckung verwendeten Materialien hervorgerufen. Es kommt dabei einerseits wiederum auf die verschiedene Wärmedurchlässigkeit des verwendeten Materials an, andererseits kann auch die Aufnahme von Wasser durch Tücher und die nachfolgende Vereisung derartig ungünstige Folgen haben, daß die vor Strahlung geschützten Pflanzen stärkere Schäden zeigen als die unbedeckten. Dies zeigt vor allem die mit der Tuchbedeckung auf der Weinbaudomäne bei Trier gemachte Erfahrung (Seite 60).

d) Die horizontale Bedeckung.

Die horizontale Bedeckung in etwa 70 cm Höhe erscheint nach den vorliegenden Versuchsergebnissen meist etwas ungünstiger als die dach- oder zeltförmige Anordnung. Es muß deshalb hier auf einen Mangel der Versuchsanordnung hingewiesen werden, daß nämlich die Messungen bei dieser Bedeckungsart fast immer über viel zu kleinen Flächen durchgeführt wurden. Über große Flächen sind bestimmt wesentlich bessere Resultate zu erzielen.

Der Unterschied zwischen den Differenzen in Bodennähe und denen in 50 cm Höhe ist im Vergleich zu dem bei der dachförmigen Bedeckung verhältnismäßig klein (Abb. 47), doch sind die Werte unter Horizontalbedeckung ausgeglichen. Zur Erklärung dieser Verhältnisse müssen wir berücksichtigen, daß unter den vorliegenden Versuchsbedingungen (eine Matte 1 × 10 m) die Austauschmöglichkeiten in der Horizontalen durchweg gut, in der Vertikalen dagegen auf den Raum zwischen Erdboden und Abschirmung eingeengt sind. Im Gegensatz zu den dachförmigen Bedeckungen ist der Luftaustausch in diesem Falle größer. Daher sind die Temperaturgegensätze zwischen Bodennähe und höheren Schichten abgeschwächt. Trotzdem bleibt die größere Temperaturdifferenz für die bodennächste Luftschicht erhalten. Die Differenz innen gegen außen für die Bodennähe liegt im Mittel um rund 2½° tiefer als bei der dachförmigen Aufstellung, welcher Unterschied sich aus dem Zusammenwirken von nur etwa 50-prozentigem Ausstrahlungsschutz (Abb. 48)\* und dem eben besprochenen Luftaustausch erklärt. Unter der horizontalen Bedeckung liegen die Temperaturwerte in Bodennähe stets höher als in 50 cm Höhe. Wir finden also auch in diesem Falle ein flaches Warmluftpolster am Boden, welches wir stärker ausgeprägt schon bei der dachförmigen und zeltförmigen Bedeckung festgestellt haben.

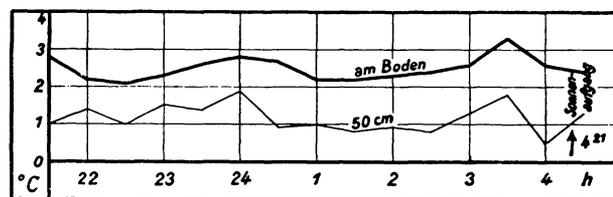


Abb. 47. Horizontal ausgespannte Strohmatte. Oppenheim, 28./29. Juni 1929. Temperaturdifferenzen geschützt minus ungeschützt in Bodennähe und in 50 cm Höhe.

\*) Die an der Polardarstellung abgelesenen Werte für den Strahlungsverlust gelten streng genommen nur für einen Rotationskörper. Für die horizontale Bedeckung, die nach einer senkrecht zur Zeichenebene stehenden Richtung praktisch unendlich ausgedehnt ist, tritt an Stelle der berechneten Kugelzone auf beiden Seiten je ein Kugelzweieck, wodurch die Verlustwerte der Strahlung eine Verringerung erfahren. Gegen die beiden Enden der Horizontalbedeckung nimmt der Strahlungsverlust von einer gewissen Stelle ab zu.

Nach Abbildung 50 ist der Effekt sowohl für Stroh als auch für wetterfestes Papier bei horizontaler Auslage mit rund  $1^\circ$  in 50 cm Höhe anzusetzen. Dies entspricht einem normalen Strahlungsschutz, der nach Abbildung 49

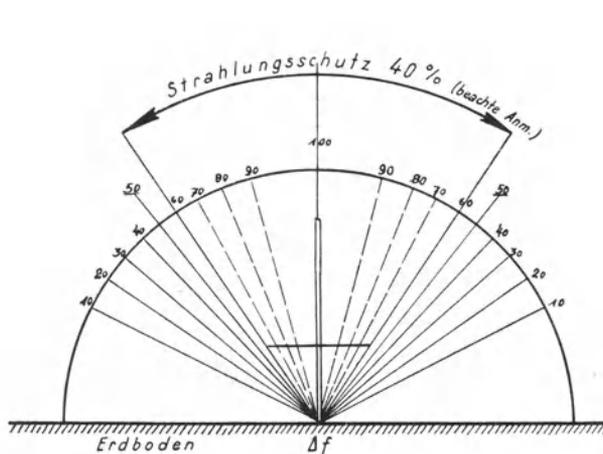


Abb. 48. Strahlungsverhältnisse für ein horizontales Flächenelement  $\Delta f$  am Boden unter einer 1 m breiten Bedeckung, 70 cm über dem Erdboden ausgespannt.

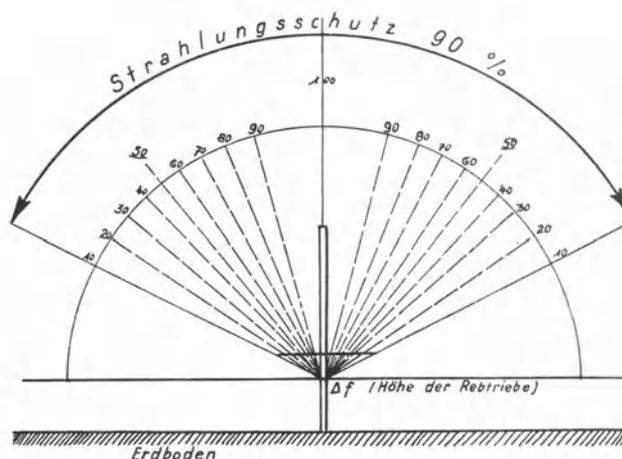


Abb. 49. Strahlungsverhältnisse für ein horizontales Flächenelement  $\Delta f$  in 50 cm Höhe unter einer 1 m breiten Bedeckung, 70 cm über dem Erdboden ausgespannt.

für die gegebenen Verhältnisse über 90 % beträgt. Denn infolge des stets vorhandenen seitlichen Luftaustausches kommt die vom Boden durch Konvektion vermittelte Wärmezufuhr in höheren Schichten unter dieser Bedeckungs-

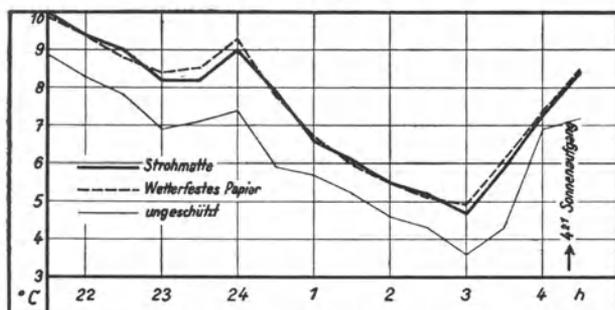


Abb. 50. Temperaturverlauf in 50 cm Höhe unter Strohmatte und wetterfestem Papier bei horizontaler Ausspannung. Oppenheim, 28./29. Juni 1929.

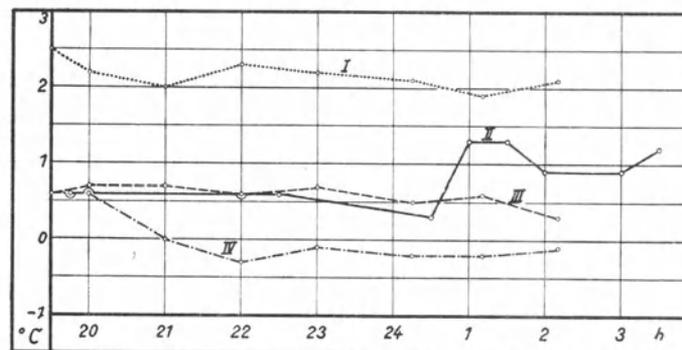


Abb. 51. Temperaturdifferenzen geschützt minus ungeschützt unter verschiedenen Einzelbedeckungen. Versuch von Löschnig am 22. Mai 1914. I. Schirm oben offen. — II. Grauer geschlossener Pappschirm. — III. Deckel oben. — IV. Bodenabdeckung.

art kaum noch zur Auswirkung. Horizontale Bedeckung auf großer Fläche dagegen wird thermisch günstiger sein; sie wird im Effekt der dach- bzw. zeltförmigen Aufstellung nahe kommen.

#### e) Die bodenaufliegende Bedeckung.

Über diese Schutzmethode läßt sich nach den vorhandenen Beobachtungen nicht viel sagen. Außer einigen Messungen von Löschnig liegen nur noch wenige Versuchsreihen aus Diez vor, deren Auswertung jedoch stark eingeschränkt ist, da für die Darstellung des Temperaturverlaufes jeweils nur sechs Terminablesungen zur Verfügung stehen; auch das Minimum wurde mehrfach nicht gemessen. Außerdem gilt noch das schon in dem Abschnitt über Versuchsanordnung (Seite 74) Gesagte.

Gehen wir von der horizontalen Bedeckung in einiger Höhe durch Senken des Bedeckungsmaterials allmählich zur bodenaufliegenden Bedeckung über, so bleibt unter der Bedeckung schließlich nur noch das auf dem Boden aufliegende Warmluftpolster übrig. Da nun einerseits die Konvektionszone in Wegfall kommt, so müßte ein Effekt annähernd gleich dem in Bodennähe unter der dachförmigen Bedeckung zu erwarten sein. Andererseits überschneidet aber die kalte Randzone, die sich durch Abkühlung an dem ausstrahlenden Bedeckungsstoff bildet, die bodennahe Schicht, wodurch der Effekt wieder vermindert wird. Unter der Annahme, daß beide Einflüsse von etwa derselben Größenordnung sind, müßte der Effekt annähernd dem in Bodennähe unter der horizontalen

Bedeckung gemessenen entsprechen. Diese Überlegungen stimmen mit den Messungen von Diez recht gut überein, bei denen Temperaturdifferenzen von etwa 2—3° festgestellt wurden. Bei der bodenaufliegenden Bedeckung handelte es sich im vorliegenden Fall um Strohmatten. Würde man einfaches Papier genommen haben, so wäre der Effekt wegen der schlechteren Isolation wohl geringer, wenn überhaupt ein solcher festgestellt werden könnte.

Die Messungen von Löschnig<sup>224)</sup> beziehen sich auf die Temperaturverhältnisse oberhalb der abschirmenden Decke, die in diesem Falle aus Papier bestand. Wie zu erwarten war, stellte Löschnig über dem bodenabdeckenden Papier eine Temperaturerniedrigung fest, die zwischen 0,2 und 0,3° lag (Abb. 51, IV). Die Bodenabdeckung stellt ein Hindernis für den Wärmeübergang durch Leitung aus dem warmen Bodeninneren zur abstrahlenden Oberfläche dar. Bei stärkeren Isolationsschichten sind weit größere Differenzen zu erwarten (Moorböden!).

### 3. Einzelbedeckungen.

#### a) Untersuchungen von Löschnig.

Die Messungen von Löschnig beziehen sich auf die Wirkung von Hauben und Schirmen. Die Abbildung 51 zeigt den Verlauf der Temperaturdifferenzen zwischen den Instrumentaltemperaturen außerhalb und innerhalb des Schutzes der einzelnen Bedeckungsarten. Die Messungen unter der geschlossenen Haube fanden am 22. April 1914, die anderen am 22. Mai desselben Jahres statt.

Die höchsten Temperaturunterschiede ergeben sich an der oben offenen Haube. Sie betragen hier im Mittel etwas über 2° C. Die geschlossene Haube liefert Werte, die im Mittel fast 1° über den Temperaturen am Kontrollthermometer liegen. Auch die einfachen waagerechten Deckel, 40 cm über dem Boden angebracht, ergeben annähernd dieselbe Schutzwirkung. Unter der Annahme, daß das Kontrollthermometer ohne Strahlungsschutz war, wäre zu erwarten, daß sich unter den Bedeckungen Effekte von etwa 1½° C einstellen. Diese Werte wurden unter der geschlossenen Haube annähernd, unter dem Schirm dagegen nicht erreicht.

Wenn Löschnig angibt, daß die oben offene Haube einen Erfolg von mehr als 2° gezeigt habe, so können wir dazu keine Stellung nehmen, da weder der Haubentyp genauer besprochen, noch die Höhe des Thermometergefäßes unter der Bedeckung angegeben wird. Es ist überhaupt fraglich, ob man die Effekte unter den einzelnen Bedeckungen miteinander vergleichen darf, da aus der Arbeit nicht zu ersehen ist, ob die Thermometer bei den einzelnen Versuchen jeweils in derselben Höhe über dem Boden angebracht waren; außerdem fanden die Versuche nicht gleichzeitig statt.

In seiner Zusammenfassung weist Löschnig besonders darauf hin, daß die Rebtriebe die Wand der Bedeckungen nicht berühren dürfen, und daß die Hauben ventiliert sein müssen. In Bezug auf die Aufstellungszeit erkennt er die Notwendigkeit, die Hauben erst abends über die Rebstöcke zu setzen, damit die Erwärmung des Bodens während des Tages nicht behindert wird.

#### b) Untersuchungen von W. Schmidt.

W. Schmidt nahm zu verschiedenen Jahreszeiten Messungen unter Einzelbedeckungen vor zu dem Zweck, die einzelnen mitspielenden Vorgänge zu klären, damit man später die geeignetste Bauart herausuchen und der Praxis übergeben könne. Bezüglich der Messungen zu verschiedenen Jahreszeiten sagt er: „Da durch die genaue Analyse der physikalischen Vorgänge das Wesentliche vom Zufälligen getrennt werden kann, sind wir mit den Versuchen nun nicht mehr auf die eigentlichen Zeiten der Spätfröste angewiesen; wir können sie in jeder klaren Nacht anstellen und an Hand der gleichzeitig beobachteten Bedingungen (z. B. der Strahlung) auf den gewünschten Fall umrechnen“<sup>(342)</sup>, S. 70).

Dieser Ansicht können wir uns nicht anschließen. Natürlich ist es an sich denkbar, die einzelnen Faktoren, die bei dem Temperatureffekt der Einzelbedeckungen eine Rolle spielen, von einander zu trennen; die praktische Durchführung stößt aber vorerst jedenfalls auf kaum zu überwindende Hindernisse. Wie W. Schmidt selbst sagt<sup>(342)</sup>, S. 100), bildet der Wärmeverrat im Boden „die stärkste natürliche Hilfe beim Kampf gegen die nächtliche Abkühlung, und wo die Zufuhr von Wärme von der Tiefe her genügend leicht von statten geht, . . . sind auch die unmittelbar aufliegenden Luftschichten wärmer“. Der Wärmehalt und das Wärmeleitvermögen des Bodens sowie daraus resultierend die Größe des nächtlichen Wärmestromes an die Oberfläche sind aber einerseits von Bodenzusammensetzung, Bearbeitungszustand, Feuchtigkeitsgehalt usw. abhängig, andererseits vor allem von der vorhergegangenen Einstrahlung, also von der Jahreszeit bzw. der jeweiligen Wetterlage. Daß gerade die beiden letzten Faktoren eine außerordentlich wichtige Rolle spielen, geht auch aus den Messungen von W. Schmidt eindeutig hervor. Wir geben zu diesem Zweck in der Tabelle 19 die Temperaturdifferenzen, direkt an der Bodenoberfläche bestimmt, zwischen der Außenluft und der unter einer gewöhnlichen Haube, wie wir sie den Darstellungen von W. Schmidt entnehmen (Abb. 52, 53, 54, 56).

Tabelle 19

Tag, Jahr, Stunde	Monat	Luftkörper über Wien	Temperatur unter Haube höher als außen
14./15. 1928, 04 Uhr 40	Mai	Polare Luft, dann Mischluft	1° C
24./25. 1928, 04 Uhr 20	August	Warmluft	3°
21./22. 1928, 06 Uhr 08	November	Ältere maritime Kaltluft	1°
6./7. 1929, 04 Uhr 03	Mai	Subtropische Warmluft	4°

Diese Tabelle veranschaulicht die Abhängigkeit des Effektes von den jeweiligen Witterungsbedingungen. Der für den Mai (14./15. Mai 1928) etwas geringe Effekt dürfte wohl durch aufkommende Bewölkung bedingt sein, wodurch natürlich die Wirkung der Bedeckung herabgedrückt wird.

Da Schmidt seine zusammenfassende endgültige Beurteilung der Wirkungsweise von „Frostschirmen“ (Hauben) dahingehend formuliert, daß man „im allgemeinen durch Schirme mit Sicherheit einen Schutz gegen eine Temperaturerniedrigung um, sehr vorsichtig genommen, etwa 2,5 bis 3° erzielen kann“ (342), Seite 95), so müssen wir annehmen, daß W. Schmidt die Höchstwerte seiner Meßreihen, nämlich die vom 24./25. August 1928 und 6./7. Mai 1929 für dieses Endurteil herangezogen und außerdem noch die Temperaturen in Bodennähe zugrunde gelegt hat, da auch in diesen Meßreihen die Temperatur mit der Höhe so erheblich abnimmt, daß er in einigen Dezimetern Abstand nur ganz schwach positive, meistens sogar negative Effekte feststellte. In den Ausführungen von Schmidt finden wir leider nichts darüber, wie er „die genaue Analyse der physikalischen Vorgänge“ durchgeführt hat, so daß wir nicht ermessen können, auf Grund welcher Überlegungen er zu jenem Urteil kommt, das den dargestellten Meßreihen nicht entspricht.

Auch W. Schmidt beschränkt sich bei seinen Untersuchungen im wesentlichen auf die Temperatur; er hat jedoch außer der Bestimmung der Lufttemperatur auch Temperaturbeobachtungen an den Pflanzen selbst vorgenommen und so die Wirkung der Einzelbedeckungen auf die Temperatur von Pflanzenteilen beobachtet.

Im Anschluß an einige Tastversuche (Abb. 52), die das Ergebnis zeitigten, daß die Luft unter den Hauben mit Ausnahme der untersten Zentimeter wesentlich kälter ist als außen, schritt W. Schmidt zur Untersuchung

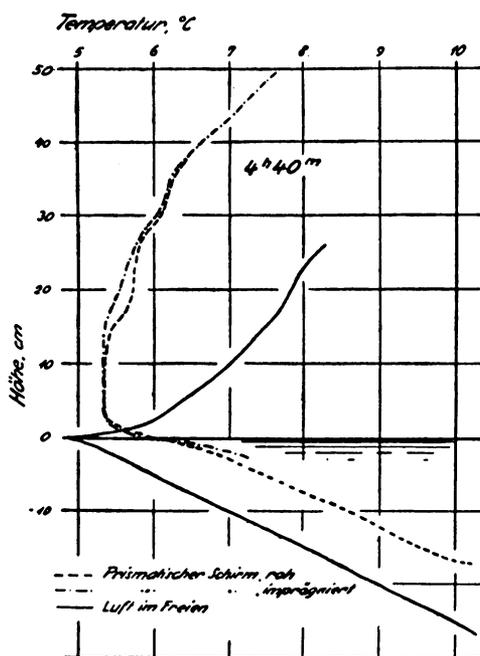


Abb. 52.\*) Temperatur unter Frostschirmen, längs der Achse; Versuche in Gumpoldskirchen, 15. Mai 1928 (nach W. Schmidt).

die Ausstrahlung setzt vielmehr erst von den Wandungen der Schirme aus ein. Wenn dadurch auch eine stärkere Abkühlung der ganzen Luft im Schirm hervorgerufen wird, so bleibt die Wärmequelle, die vor allem für einen

\*) Die Abbildungen 52–56 sind entnommen aus W. Schmidt, Meteorologische Feldversuche über Frostabwehrmittel. Anhang z. Jahrb. der Zentralanst. f. Meteorol. u. Geodynamik. Jahrgg. 1927.

Ersatz des Verlustes in Betracht kommt, das ist der Vorrat im Boden, für eine Steigerung der Temperatur in den untersten Schichten erhalten“ (342), Seite 80).

Im Anschluß an das außerordentlich unterschiedliche Verhalten der Einzelbedeckung bei Tag und Nacht (Abb. 53) kommt W. Schmidt auf das plötzliche Aufdecken der Pflanzen zu sprechen. Er schreibt: „Die höhere

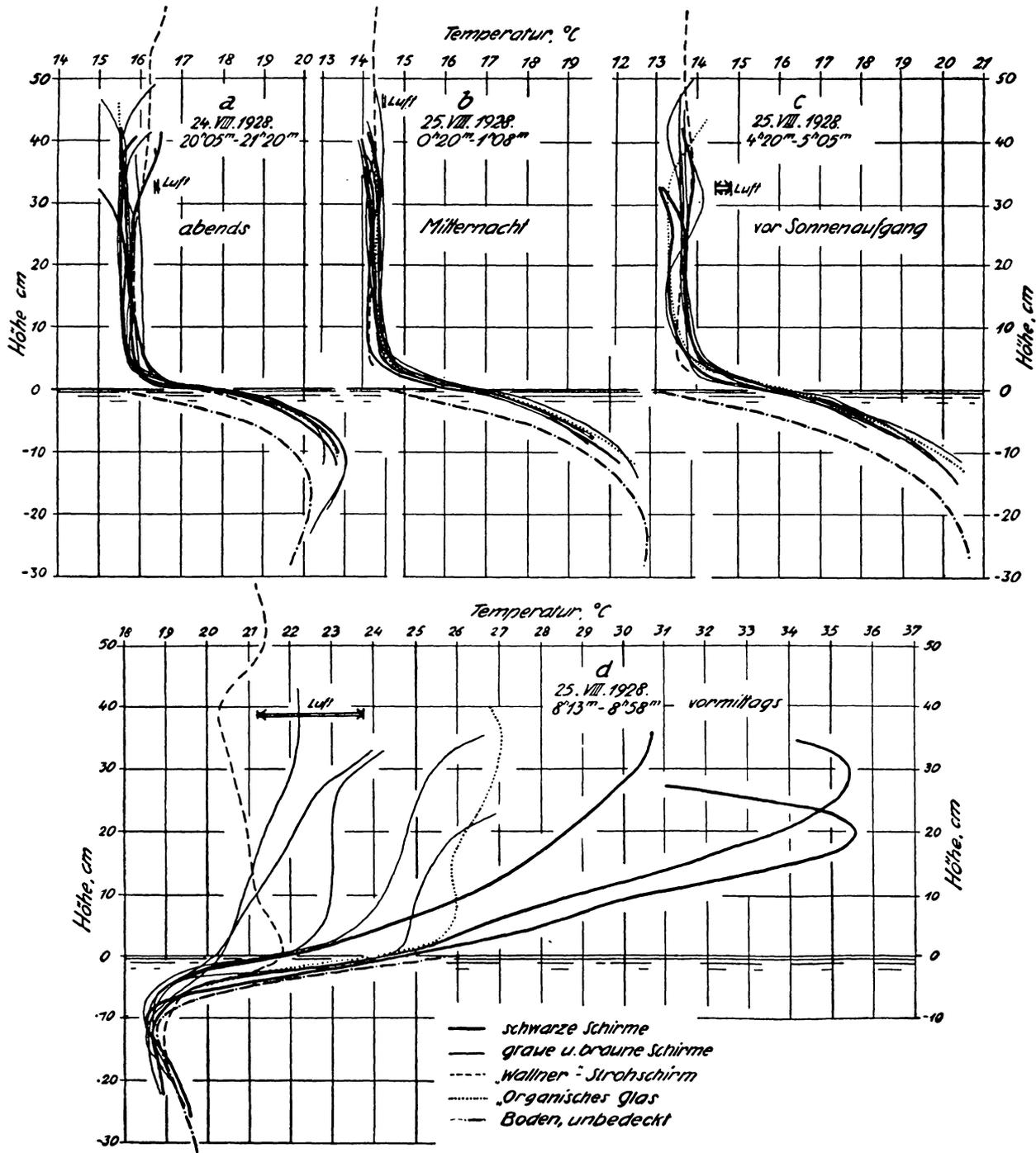


Abb. 53. Temperatur unter Frostschirmen, längs der Achse; Massenvergleiche in Schlittenau, 24./25. August 1928 (nach W. Schmidt).

Temperatur unter den Schirmen bedingt einen höheren Feuchtigkeitsgehalt der Luft, der auch durch Verdunstung seitens des Bodens gesteigert wird. Wird der Schirm am Morgen nach einer Frostnacht entfernt, so kommt die empfindliche Pflanze aus einer warmen und feuchten Luft unmittelbar in kalte und überdies sehr trockene; die jungen Triebe können sich nicht so rasch umstellen, die Wirkung ist ein Zusammensinken und Welken, fast so, als ob der Frost selbst gewirkt hätte. Nach der Frostnacht in Gumpoldskirchen konnte dies an zu früh abgedeckten

Rebstöcken gut beobachtet werden; wenn einmal die Sonne einige Zeit geschienen hat, ist das Wegnehmen der Schirme jedenfalls unbedenklicher“ (342), Seite 81/82).

W. Schmidt führt nun hierzu noch die folgende Berechnung durch: „Wäre die Luft außen auch gesättigt feucht, bei einer Temperatur von  $-5^{\circ}$ , so würde das Abdecken so wirken, als sei die Pflanze, wenn ihre geschützten

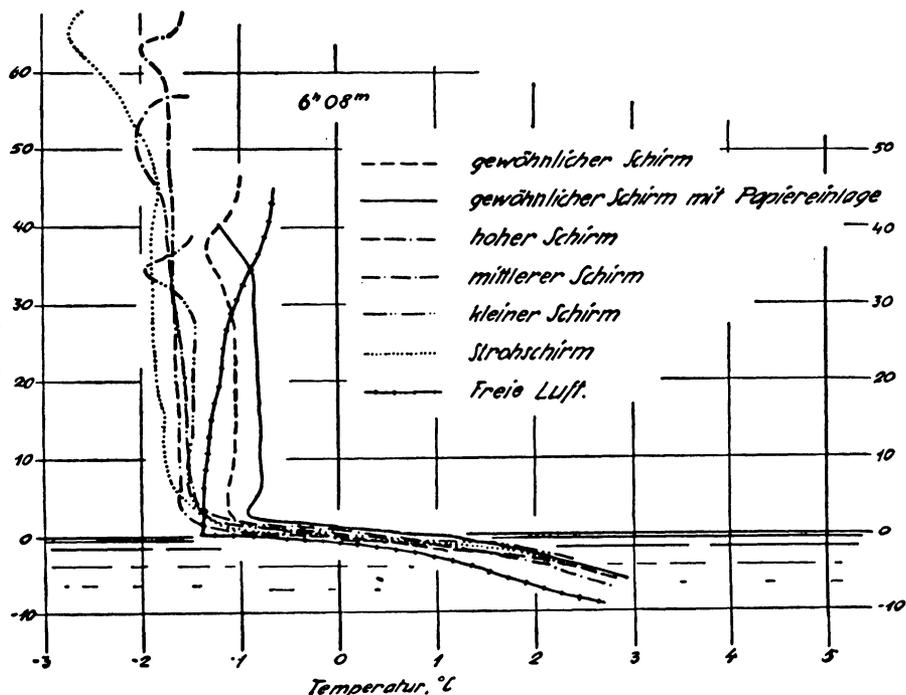


Abb. 54. Temperatur unter Frostschirmen, längs der Achse; 22. November 1928 (nach W. Schmidt).

Freien eine Größe von  $3^{\circ}$  bei Sonnenaufgang nicht übersteigen. Dann erhalten wir bei einer Innenluft von  $0^{\circ}$  und 100 % und einer Außenluft von  $-3^{\circ}$  und 100 % Feuchte entsprechend einen Wert von 81 %; und selbst bei  $0^{\circ}$  und 100 % gegenüber  $-3^{\circ}$  und dem unwirklichen Außenwert von 80 % Feuchte nur einen solchen von 65 %.

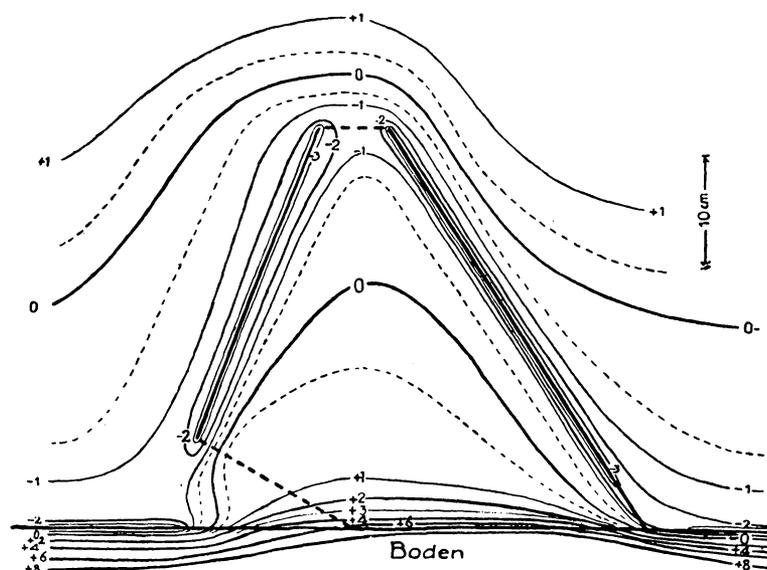


Abb. 55. Typische Temperaturverteilung unter einem Frostschirm aus Pappe gegen die Morgenstunden einer klaren Ausstrahlungsnacht (nach W. Schmidt).

wandung wird also die Temperatur der Luft im Schirm tatsächlich gesteigert, aber nur um recht geringe Beträge, um durchschnittlich einen halben Grad“ (342), Seite 83).

Während bisher Schmidt immer nur die Temperaturverteilung längs der Haubenachse betrachtete, ging

Teile  $+5^{\circ}$  bzw.  $+10^{\circ}$  hatten, plötzlich in Luft von 46 bzw. 34 % relativer Feuchtigkeit versetzt. Hatte auch die kalte Luft vorher größere Trockenheit, etwa 60 %, so werden diese Zahlen noch niedriger, 29 bzw. 20 %“ (342), Seite 81).

Diese Berechnung täuscht nun infolge der gewählten Temperaturwerte! Temperaturdifferenzen zwischen dem Haubeninnern und der Außenluft von 10 oder gar  $15^{\circ}$  sind um die Zeit des Sonnenaufganges nicht vorhanden. Schmidt mißt ja meistens selbst nur geringe Differenzen. Desgleichen ist in frühjahrlichen Ausstrahlungsnächten eine relative Feuchtigkeit der kalten Außenluft von 60 % in den alleruntersten Schichten nicht vorhanden. Sie beträgt nach unseren Messungen aus sehr vielen Frühjahr- und Herbstfrostnächten stets zwischen 95 und 100 %.

Nach unseren Messungen können Temperaturdifferenzen zwischen Pflanzenteilen unter Hauben gegen solche im Freien unter Hauben gegen solche im Freien erhalten wir bei einer Innenluft von  $0^{\circ}$  und 100 % und einer Außenluft von  $-3^{\circ}$  und dem unwirklichen Außenwert von 80 % Feuchte nur einen solchen von 65 %.

Unseres Erachtens kann der Unterschied im Schadensbild zwischen sofort und später von der Haube befreiten Reben nicht auf ungünstige Luftfeuchteverhältnisse zurückgeführt werden. Wir nehmen vielmehr an, daß hier die vielfach bestätigte Erfahrungstatsache beobachtet wurde, daß nämlich ein langsames Auftauen gefrorener Reben weniger schädlich ist als plötzliches Auftauen.

Zur Klärung des Einflusses der Wärmeleitung der Haubenwand hat W. Schmidt einen Versuch angestellt, wobei zwei „Gumpoldskirchner Frostschirme“ verwendet wurden, von denen der eine noch mit einer dünnen Papiereinlage ausgekleidet war (342), Seite 82). Wie die Abbildung 54 zeigt, bedingte die Papiereinlage einen positiven Temperatureffekt von einigen Zehntel Grad. „Durch eine Herabsetzung der Wärmeleitung des Materials der Schirmwandung wird also die Temperatur der Luft im Schirm tatsächlich gesteigert, aber nur um recht geringe Beträge, um durchschnittlich einen halben Grad“ (342), Seite 83).

er schließlich dazu über, ihre räumliche Verteilung unter einer Haube zu untersuchen. Dabei verwendete er wiederum einen „Gumpoldskirchner Frostschirm“. Die Ergebnisse der Messungen benutzte er dazu, die Temperaturverteilung unter einem „Frostschirm“ in einem Durchschnitt durch denselben wiederzugeben (Abb. 55). Dazu bemerkt W. Schmidt: „Während im Freien die kalte Luft sich ganz dem Boden anschmiegt, liegt sie beim Schirm auch an den Seitenflächen an und zwar außen und innen. Das ist ja auch erklärlich: Sowohl die Bodenoberfläche wie der Schirm geben Wärme durch Ausstrahlung ab, und wenn jener den Ausfall durch Nachschub aus größeren Tiefen wettmachen kann, ist das bei diesem nur durch jene Beträge möglich, die durch Strahlung oder durch Konvektionsströmungen der Luft von dem bedeckten Boden her übertragen werden. Daß auch der geschützte Boden Wärme abgibt, und zwar in erheblichem Ausmaß, das sagt uns schon die Verteilung der Temperatur in den obersten Bodenschichten . . .“<sup>(342)</sup>, Seite 84/85).

Bei der Interpolation der Isothermen um den Querschnitt der Haube dürften allerdings die Innenseiten der Begrenzungswände zu schlecht weggekommen sein. Selbst bei schlecht wärmeisolierendem Material ist sicher zu erwarten, daß die Innenseite etwas wärmer als die Außenseite ist!

Weiter zeigt sich, „daß in der Nacht die Temperatur an der Bodenoberfläche niedriger ist als in einiger Tiefe darunter. Es muß nun immer, wenn ein derartiger Temperaturunterschied besteht, dem Gefälle nach Wärme strömen . . . . Unter dem Schirm verliert der Boden zwar wesentlich weniger Wärme als im Freien, aber er gibt doch ab . . . . Sie dient der dem Boden auflagernden Luft. Während sie im Freien sofort an der Oberfläche durch Ausstrahlung verloren geht, . . . . bildet sich unter dem Schirm ein dem Boden aufliegendes Polster erwärmter Luft aus . . . . Knapp am Boden aber hat man Temperaturunterschiede zwischen innen und außen von  $4^{\circ}$ , in ernsteren Fällen wohl bis  $8^{\circ}$  zu gewärtigen. Man darf sich nun nicht vorstellen, daß die so erwärmten Luftmassen als spezifisch leichter sofort in die Höhe steigen. Schon durch die Reibung am Boden sind sie stark gebremst, und auch sonst stellt sich eine Strömung recht langsam ein. Immerhin haben wir es einem derartigen Austausch zuzuschreiben, wenn die Luft in der Mitte des Schirmes bis etwa 10—20 cm Höhe hinauf merklich wärmer ist als die in gleicher Höhe außerhalb. In größerer Höhe kehrt sich das Verhältnis um . . . . Wenn aber diese Lagerung schon unstabil ist, so ist es noch viel mehr das Anliegen kalter Luftschichten an den Wänden. Diesen entlang müssen sich die abgekühlten Massen abwärts bewegen. Sie würden, wenn sie gar keinen Ausweg fänden, doch den ganzen Boden unter dem Schirm bedecken. Und nun verstehen wir die Wichtigkeit der seitlichen Öffnung . . . .: durch sie strömt der größere Teil dieser abgekühlten Luft ins Freie . . . .“<sup>(342)</sup>, Seite 86—87).

Es fällt uns auf, daß W. Schmidt, während er soeben noch bei Besprechung seiner Meßreihen zeigte, daß lediglich die Luft der alleruntersten Zentimeter gegenüber der Außenluft wärmer sei, wie das aus den Abbildungen 52 und 54 hervorgeht, nunmehr schreibt, „daß die Luft in der Mitte des Schirmes bis etwa 10—21 cm Höhe hinauf merklich wärmer ist als die in gleicher Höhe außerhalb“.

Wir sind geneigt, die Dissonanz zwischen den Meßergebnissen und dem Endurteil darauf zurückzuführen, daß die Messungen außerhalb der Zeit der Spätfröste, die Schmidt hier nicht ausführte, seinem Endurteil zugrunde liegen.

Für die Praxis ist nun von Bedeutung, daß Frostschäden an Pflanzen, von physiologischen Bedingungen abgesehen, nicht durch die Temperaturen der Luft und des Bodens, sondern durch die der Pflanzenteile gegeben sind. Alle Pflanzenteile kühlen sich nämlich mehr oder weniger stark gegen Luft ab, sofern sie nicht gegen Ausstrahlung geschützt sind. Diese Untertemperatur wurde gleichfalls von W. Schmidt gemessen. Da „nicht eigentliche“ Rebtriebe zur Verfügung standen<sup>(342)</sup>, Seite 88), wurden die Messungen an entsprechend dicken Trieben von Pelargonienstöcken vorgenommen. Diese Stellvertretung war nach Schmidts Ansicht erlaubt, „da das Ausstrahlungsvermögen eine Oberflächeneigenschaft ist und die Wärmeleitung in saftigen Trieben im wesentlichen durch den Wärmegehalt bedingt wird“<sup>(342)</sup>, Seite 88—89).

W. Schmidt hat nun jedesmal die Pflanzentemperaturen mit den Lufttemperaturen in Höhe der Triebe, also in etwa 4 cm Höhe verglichen. „Im Freien war der Trieb immer wesentlich, durchschnittlich  $1,3^{\circ}$ , kälter als die Luft knapp daneben: das die Wirkung der Ausstrahlung.“ Unter dem Schirm dagegen war der Zweig wärmer<sup>(342)</sup>, Seite 89) als die Luft, im Durchschnitt um  $0,9^{\circ}$ . In einer Nacht mit klarem Himmel, jedoch nicht mit maximaler Ausstrahlung, war der Trieb unter dem „Frostschirm“ rund  $2,9^{\circ}$  wärmer als außerhalb. Im übrigen war der verholzte Zweig durchweg merklich wärmer als der grüne (Mittel  $0,5^{\circ}$  C). W. Schmidt führt letzteres auf ein Zusammenwirken von Transpiration und geänderten Ausstrahlungsverhältnissen zurück. Anscheinend hat Schmidt die Lufttemperatur unter dem Schirm nicht gemessen, denn es bleibt unklar, wie weit der gemessene Effekt von  $2,9^{\circ}$  auf physiologische Vorgänge und wie weit er auf ein Eintauchen des Triebes in das Warmluftpolster zurückzuführen ist. Leider gibt W. Schmidt auch nicht an, in welcher Jahreszeit diese Messungen stattgefunden haben. Denn daß die Außentemperatur für die Entwicklung von physiologisch entstehender Erwärmung

an den Vegetationspunkten ausschlaggebend ist, geht aus folgender Bemerkung von Benecke-Jost<sup>(54)</sup>, Seite 418) hervor:

„Unter den äußeren, die Wärmebildung bedingenden Einflüssen ist an erster Stelle die Temperatur selbst zu nennen, denn die Wärmebildung macht die Pflanze nicht etwa unabhängig von der Außentemperatur; ähnlich wie bei der Verbrennung der Kohle läßt sich der Beginn der Wärmeproduktion erst durch eine genügend hohe Temperatur erzielen. Die selbsterzeugte Wärme bietet also keinen Schutz gegen Frost.“

Wir werden also annehmen müssen, daß W. Schmidt in der warmen Jahreszeit gemessen hat. Wären die Messungen unter Temperaturbedingungen, wie sie in Frostschadennächten herrschen, ausgeführt worden, so hätte sich nach unserer Ansicht, wenn überhaupt, so nur ein kaum meßbarer Effekt ergeben.

Eine systematische Untersuchung der Frage, bei welchen Temperaturen die Eigenbildung von Wärme bei den verschiedenen Pflanzen anfängt, liegt nicht vor. Benecke-Jost gibt aber an, daß Triebe von *Aesculus hippocastanum* (Roßkastanie) bei 5—6° C noch keine auf physiologisch erzeugter Wärme beruhende Temperatursteigerung zeigten, während sie bei 20° C Außentemperatur eine solche von 0,6° hatten.

Demnach ist es sehr unwahrscheinlich, daß bei Lufttemperaturen in Nähe des Gefrierpunktes derartige temperaturerhöhende Wärmeprozesse in der Pflanze stattfinden. Auch zeigt sich hier wieder, wie vorsichtig man bei Übertragung von Messungen im Sommer auf Vorgänge in der Übergangsjahreszeit sein muß. Zusammenfassend müssen wir diese Folgerungen von Schmidt über den Schutzeffekt der Schirme auf Pflanzen als nicht bewiesen und höchst unwahrscheinlich ablehnen.

Schließlich schritt W. Schmidt auf Grund der bei seinen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse zum Bau von besonderen Einzelbedeckungen, um die Frostschutzwirkung derselben zu steigern.

Die erste Konstruktion, eine Art Lampenschirm, aus einem rechteckigen Stück eines ölgetränkten Übersee-packpapiers durch Legen paralleler Falten gefertigt, war zwar im allgemeinen thermisch günstig, wurde aber vom Winde leicht eingedrückt und konnte daher mit den anderen Typen nicht konkurrieren. Ferner hat W. Schmidt in einen gewöhnlichen „Frostschirm“ einen zweiten Konus mit weiter oberer Öffnung eingesetzt; die Angabe, daß seine Wirkung sehr gut war,<sup>(342)</sup> Seite 93) können wir den Messungen (Abb. 56) nicht entnehmen, da er im allgemeinen schlechter abschneidet als der einfache Schirm.

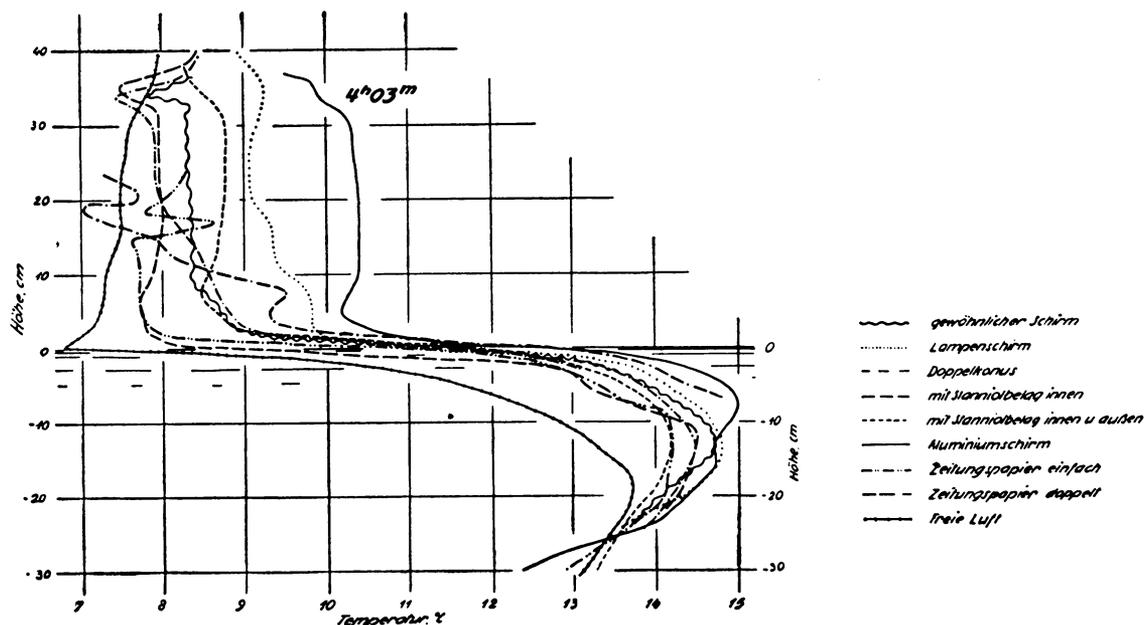


Abb. 56. Temperatur unter Frostschirmen neuer Bauweise; Versuche in Wien, 7. Mai 1929 (nach W. Schmidt).

Bei einer weiteren Haube wurde die Innenwand mit glänzendem Stanniol überzogen. Von dieser Haube urteilt W. Schmidt, daß sie, ebenso wie die beiderseits mit Stanniol belegte Haube, offenbar sehr günstig wirkte, während die Abbildung 56 dies für den ersteren Fall nicht zeigt, in der die Werte niedriger sind als beim gewöhnlichen Schirm.

W. Schmidt ging noch einen Schritt weiter und bog einen „Frostschirm“ aus Aluminium, in dem er „von hornherein auf die schlechte Wärmeleitung des Schirmmaterials als bedeutungslos verzichtete“<sup>(342)</sup>, Seite 91/92). Von allen Neukonstruktionen verhielt sich der Aluminiumschirm am günstigsten; denn die Temperaturen unter ihm lagen rund 2° über denen, die durch die gewöhnlichen Formen erzielt wurden. Schmidt folgerte nun:

„Da man im allgemeinen durch Schirme mit Sicherheit einen Schutz gegen eine Temperaturniedrigung um, sehr vorsichtig genommen, etwa 2,5–3° erzielen kann, wäre dieses Plus von 2° ein außerordentlicher Gewinn“ (342), Seite 95).

Wir entnehmen dagegen seiner mitgeteilten Meßreihe einen Effekt für diesen Typ von 2,5 bis 3° gegen Außenluft in etwa 10 cm Höhe, der in 35 cm Höhe bereits auf 1,5° schrumpft (in größeren Bodenabständen ist leider nicht gemessen). Wir können also auch hier seinem Urteil über die Wirkung der Hauben nicht folgen, da seine Meßreihen damit nicht im Einklang stehen.

c) Untersuchungen von Kessler.

Aus den Versuchen von Kessler geht deutlich hervor, daß die Systeme der Einzelbedeckung eine wesentlich geringere thermische Trägheit besitzen als die der großflächigen Bedeckungen. Als Beispiel diene die Auswertung der Messungen vom 28./29. Juni in Oppenheim (Abb. 57). Die Temperaturdifferenzen zwischen außen

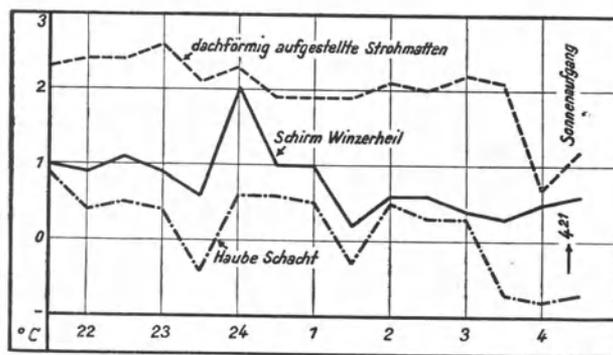


Abb. 57. Temperaturdifferenzen geschützt minus ungeschützt in 50 cm Höhe unter verschiedenen Bedeckungen. Oppenheim, 28./29. Juni 1929.

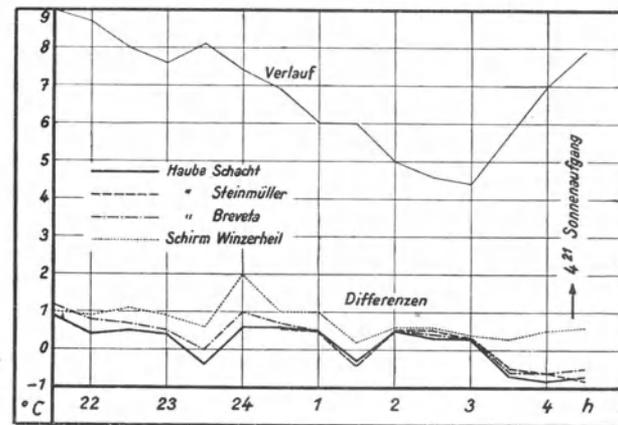


Abb. 58. Temperaturdifferenzen geschützt minus ungeschützt in 50 cm Höhe unter verschiedenen Einzelbedeckungen und Temperaturverlauf ungeschützt. Oppenheim, 28./29. Juni 1929.

und innen schwanken während der ganzen Versuchsdauer mit Ausnahme der Zeit kurz vor Sonnenaufgang bei der dachförmigen Strohbdeckung nur zwischen 2 und 2½°, streuen also 0,5°. Während derselben Zeitspanne bewegen sich die Temperaturdifferenzen für die Rebhaube Schacht zwischen –0,4 und +0,8°, das Gesamtintervall beträgt also 1,2°. Dabei kommen Sprünge bis zu 1° vor. Noch stärkeren Schwankungen sind die Temperaturunterschiede für den Schirm „Winzerheil“ unterworfen. Sie liegen zwischen 0,2 und 2°, umfassen also ein Intervall von 1,8°. Der größte auftretende Sprung beträgt fast 1,5°. Die geringe Trägheit der Einzelbedeckung erklärt sich aus den viel kleineren Luftmassen, welche die Hauben gegenüber den großflächigen Bedeckungen umschließen. Dazu kommt, daß das Material der Haube im allgemeinen wesentlich dünner und damit schlechter isolierend ist als Strohmatte. Bei Schirmen ist für den Luftaustausch zudem kein Hindernis vorhanden.

Auch die Beträge der Differenzen weisen deutlich Unterschiede zwischen der großflächigen Bedeckung und den Hauben und Schirmen auf. Durch erstere wird nahezu ein doppelt so großer Effekt erzielt als durch die Einzelbedeckungen; er beträgt etwa 2° gegenüber 1°.

In derselben Juninacht fanden auch Messungen unter dem großen Steinmüllerhut und der Haube Breveta statt. Wie die Differenzkurven zeigen, fallen die Werte für alle Hauben annähernd zusammen und liegen etwas unter den Werten für den Schirm Winzerheil (Abb. 58).

Vergleichen wir nun diese Messungen mit einer Beobachtungsreihe aus dem Frühjahr (25./26. April 1929, Abb. 59), dann erkennen wir an dem Verlauf der Temperaturunterschiede innen gegen außen ein anderes Verhalten der Bedeckungen. Die Werte für den Schirm Winzerheil liegen zwar annähernd in derselben Größenanordnung wie im Sommer, dagegen pendeln die Temperaturdifferenzen für die Hauben nur mit einigen wenigen

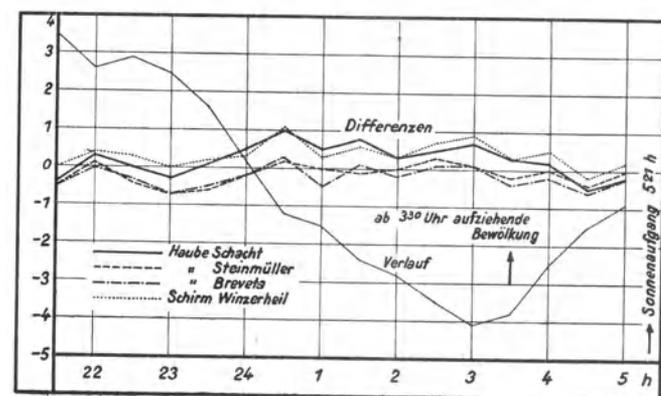


Abb. 59. Temperaturdifferenzen geschützt minus ungeschützt in 50 cm Höhe unter verschiedenen Einzelbedeckungen und Temperaturverlauf im Freien. Oppenheim, 25./26. April 1929.

Zehnteln um die Nulllinie. Hier ist der Effekt der Hauben teils schwach positiv, teils schwach negativ. Etwas besser wirkt die Rebhaube Schacht.\*)

Was die Aufstellungshöhe der Schirme betrifft, so liegt hierüber eine Meßreihe vom April 1929 aus Oppenheim vor. Der Schirm Winzerheil war mit seinem unteren Rand in 25, 50 und 100 cm über dem Boden angebracht. Unter jedem dieser Schirme befand sich ein Thermometer in Bodennähe und eines in 50 cm Höhe. Außerdem waren zwei Thermometer in gleichen Höhen neben den Schirmen zur Kontrolle aufgestellt.

Tabelle 20. Minimaltemperaturen (Oppenheim 24./25. April 1929).

	Im Freien	Unter Frostschirm Winzerheil, angebracht in Bodenabständen von			
		25 cm	50 cm	75 cm	100 cm
In Bodennähe	- 5,5° C	- 4,6° C	- 5,0° C	- 5,5° C	- 5,5° C
In 50 cm Höhe	- 4,7	—	- 3,9	- 3,9	- 4,4

Die Tabelle 20 zeigt, daß die Minimaltemperatur in Bodennähe unter dem 25 cm hohen Schirm rund 1°, unter dem 50 cm-Schirm  $1\frac{1}{2}$ ° höher liegt als im Freien. Für die beiden noch höher angebrachten Schirme ergeben sich praktisch keine Unterschiede mehr gegenüber der Außentemperatur.

Das Thermometer in 50 cm Höhe stellt sich unter dem Schirm mit gleich hohem unteren Rand auf eine nahezu 1° höhere Minimaltemperatur ein als das Thermometer im Freien. Der gleiche Effekt ist an dem 50 cm hohen Thermometer unter dem 75 cm hoch angebrachten Schirm zu beobachten. Unter dem 100 cm hohen Schirm ist die Wirkung nur halb so groß.

Aus den Messungen geht hervor, daß die Anbringung des Schirmes in einer Höhe von 75 cm Höhe für die Pflanze in Bodennähe praktisch keinen, in etwa 50 cm Höhe auch nur noch geringen Schutz bedeutet.

Zeichnen wir in die Polardarstellung der Ausstrahlungsstärke die Schirme in den verschiedenen Höhen ein (Abb. 35, Seite 69), so können wir an den Rändern der Schirmschnitte den Strahlungsschutz in Prozenten für ein axial gelegenes Flächenelement am Boden ablesen. Die Verhältnisse lassen sich ohne weiteres auch auf das 50 cm hohe Thermometer übertragen. Wir erhalten somit die in Tabelle 21 gegebene Zusammenstellung für den prozentualen Strahlungsschutz in verschiedenen Höhen.

Tabelle 21

Thermometerhöhe	S c h i r m h ö h e			
	25 cm	50 cm	75 cm	100 cm
Bodennähe. . . . .	80 %	40 %	25 %	15 %
50 cm Bodenabstand. . .	—	100	80	40

Legen wir im vorliegenden Falle eine Untertemperatur freistehender Pflanzen oder Thermometer von 1,0° gegen Luft zugrunde, so erreichen wir analog der Tabelle 21 für die einzelnen Höhen die Werte der Tabelle 22.

Tabelle 22. Differenzen der Minimaltemperaturen vom 24./25. 4. 1929

	S c h i r m h ö h e							
	25 cm		50 cm		75 cm		100 cm	
	berechnet	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet	gemessen
Thermometer in Bodennähe	0,8° C	0,9° C	0,4° C	0,5° C	0,2° C	0,0° C	0,1° C	0,0° C
Thermometer in 50 cm Höhe	—	—	1,0	0,8	0,8	0,8	0,4	0,3

Neben den berechneten Werten stehen die aus Tabelle 20 entnommenen gemessenen Differenzen. Diese unterscheiden sich von den berechneten im Höchsfalle um 0,2° und weisen im wesentlichen den gleichen Gang auf wie die berechneten Werte. Man kann also behaupten, daß für den vorliegenden Fall die Hauptwirkung auf dem Strahlungsschutz beruht.

Zur Abschätzung der richtigen Aufstellungshöhe kann man noch einen Schritt weitergehen, indem man nicht nur ein in der Achse gelegenes Flächenelement am Boden, sondern eine zentral zur Achse gelegene kreis-

\*) Wir machen darauf aufmerksam, daß infolge aufkommender Bewölkung aus den Beobachtungen nach 01 Uhr 30 keine Schlüsse mehr gezogen werden können.

förmige Bodenfläche in Größe des Schirmquerschnitts betrachtet. Je weiter der Schirm von dieser entfernt ist, um so geringer wird der Strahlungsschutz sein, besonders an den Randpartien der Bodenfläche. Eine genauere Berechnung läßt sich mit Hilfe des von P. Dubois<sup>92)</sup> definierten Flächenwinkelverhältnisses durchführen. Aus der Gleichung

$$\psi = \frac{1}{2} \left[ 2 + \left(\frac{R}{r}\right)^2 - \frac{R}{r} \sqrt{\left(\frac{R}{r}\right)^2 + 4} \right]$$

ist ersichtlich, daß die Werte für  $\psi$  nur abhängig sind von dem Verhältnis  $R/r$ , d. h. Abstand zu Schirmradius (Abb. 60). Aus der Rechnung ergeben sich für die verschiedenen Schirmabstände die in Abbildung 61 gegebenen Schutzwerte in Prozenten.

Auch hieraus ist ersichtlich, wie rasch die Schutzwirkung mit zunehmendem Schirmabstand abnimmt. Es ist also eine möglichst tiefe Anbringung des Schirmes zu empfehlen, wobei allerdings eine Berührung der gegen Luft kühleren Schirmwände mit den Trieben vermieden werden muß.

Hat es sich bisher darum gehandelt, die Wirkung des Schirmes bei Veränderung seines Bodenabstandes an einer bestimmten Stelle zu ermitteln, so soll in folgendem die vertikale Temperaturverteilung unter einem fest angebrachten Schirm, dessen unterer Rand 50 cm über dem Boden liegt, gemessen werden. Die Meßreihe vom 28./29. Juni 1929 (Abb. 62 a) gibt den zeitlichen Verlauf der Thermometerablesungen in drei verschiedenen Höhen unter dem Schirm: 10, 25 und 50 cm. Die Temperaturkurven liegen um so höher, je höher die Thermometer standen. Die nächste Abbildung gestattet ein Urteil über die eigentliche Schirmwirkung, da sie den Verlauf der Temperaturunterschiede in den verschiedenen Höhen gegenüber den im Freien aufgestellten Thermometern enthält (Abb. 62 b).

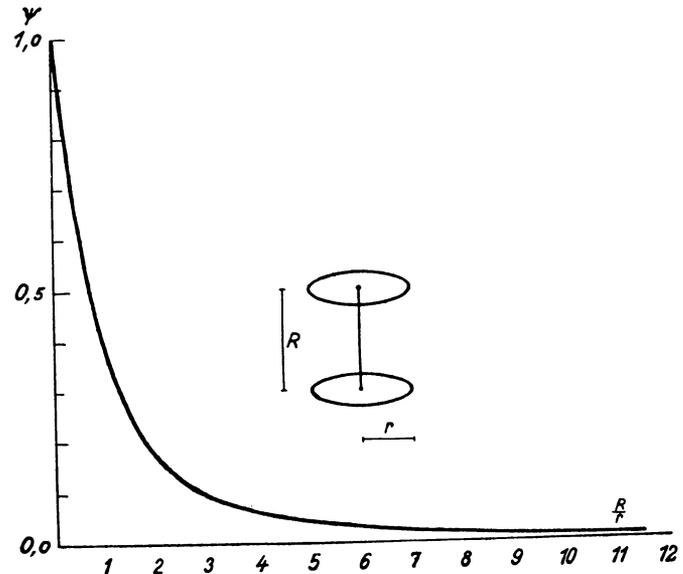


Abb. 60. Flächenwinkelverhältnis  $\psi$ .

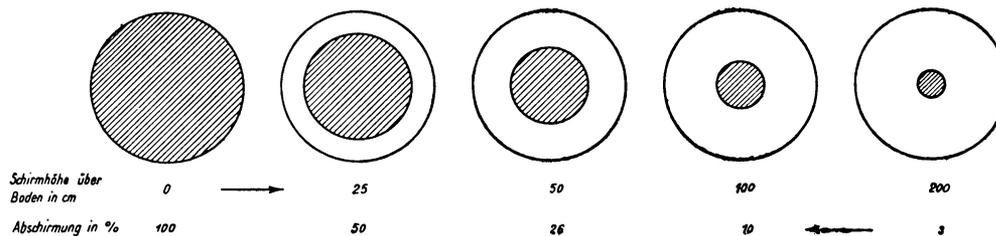


Abb. 61. Abschirmung in Prozenten für verschiedene Schirmhöhen (Flächenwinkelverhältnis).

Bildet man die Mittelwerte der Temperaturunterschiede innen gegen außen, so erhält man für die vorliegenden Meßreihen in 50 cm Höhe einen durchschnittlichen Effekt von  $0,8^\circ$ . Da dieses Thermometer gemäß unseren vorigen Überlegungen einen völligen Schutz gegen Ausstrahlung genießt, so setzen wir in der nun folgenden Überlegung den beobachteten Effekt von  $0,8^\circ$  mit 100 % Strahlungsschutz gleich. Bringt man diesen Wert als Korrektur an den Mittelwerten der drei Außenthermometer, die ja ohne Strahlungsschutz waren, an, so erhält man von unten nach oben die Mitteltemperaturen  $7,3$ ,  $7,3$  und  $7,6^\circ$ , die nunmehr den wahren Lufttemperaturen entsprechen sollen.

Tabelle 23

Thermometerhöhe	Temperatur der unterkühlten Außenthermometer	Reduzierte wahre Lufttemperatur (+ 0,8)	Instrumentaltemperatur unter Schirmen	Strahlungsverlust in %	Untertemperatur berechnet	Wahre Lufttemperatur unter Schirm berechnet
10 cm	$6,5^\circ \text{ C}$	$7,3^\circ \text{ C}$	$6,9^\circ \text{ C}$	45	$0,4^\circ \text{ C}$	$7,3^\circ \text{ C}$
25 cm	6,5	7,3	7,2	20	0,2	7,4
50 cm	6,8	7,6	7,6	0	0	7,6

Wir stellen also fest, daß die Lufttemperaturen unter dem Schirm im vorliegenden Fall keine Abweichung von denen im Freien aufweisen, daß somit die Wirkung des Schirmes lediglich der Abschirmung der Ausstrahlung zuzuschreiben ist. Diese wird bei uns selten mehr als  $1,5^\circ$  bei Glasthermometern üblicher Bauart betragen, während bei Pflanzenteilen wohl ein etwas größerer Betrag vorkommen kann.

Die beiden durchgerechneten Beispiele vom April und Juni zeigen, daß der Wirkung des Schirmes in beiden Fällen dieselben Strahlungsvorgänge mit nur geringen quantitativen Abweichungen zugrunde liegen. In diesem Punkte lassen sich also Messungen im Sommer mit solchen von Vorgängen im Frühjahr vergleichen.

Wir hatten weiter oben festgestellt, daß der thermische Effekt in 50 cm Höhe unter Hauben in einer früh-jährlichen Frostnacht unmerklich ist, während er in einer kalten Sommernacht unter annähernd gleichen Strahlungsbedingungen stärker in Erscheinung tritt. Wie W. Schmidt durch seine zahlreichen Messungen gezeigt hat, bestehen unter den Hauben zu allen Jahreszeiten im Prinzip die gleichen Temperaturverhältnisse, es ändert sich lediglich die Größe des Effektes. Nun hat aber W. Schmidt unter verhältnismäßig niedrigen Hauben, wir dagegen infolge der in Deutschland üblichen höheren Reberziehung unter großen Hauben gemessen. Um einen Vergleich dieser Haubentypen durchzuführen, wollen wir aus unseren Meßreihen eine klare Nacht im Sommer aus-suchen und diese mit einer ähnlichen von W. Schmidt vergleichen. Wir wählen dazu die Messungen vom 28./29. Juni 1929.

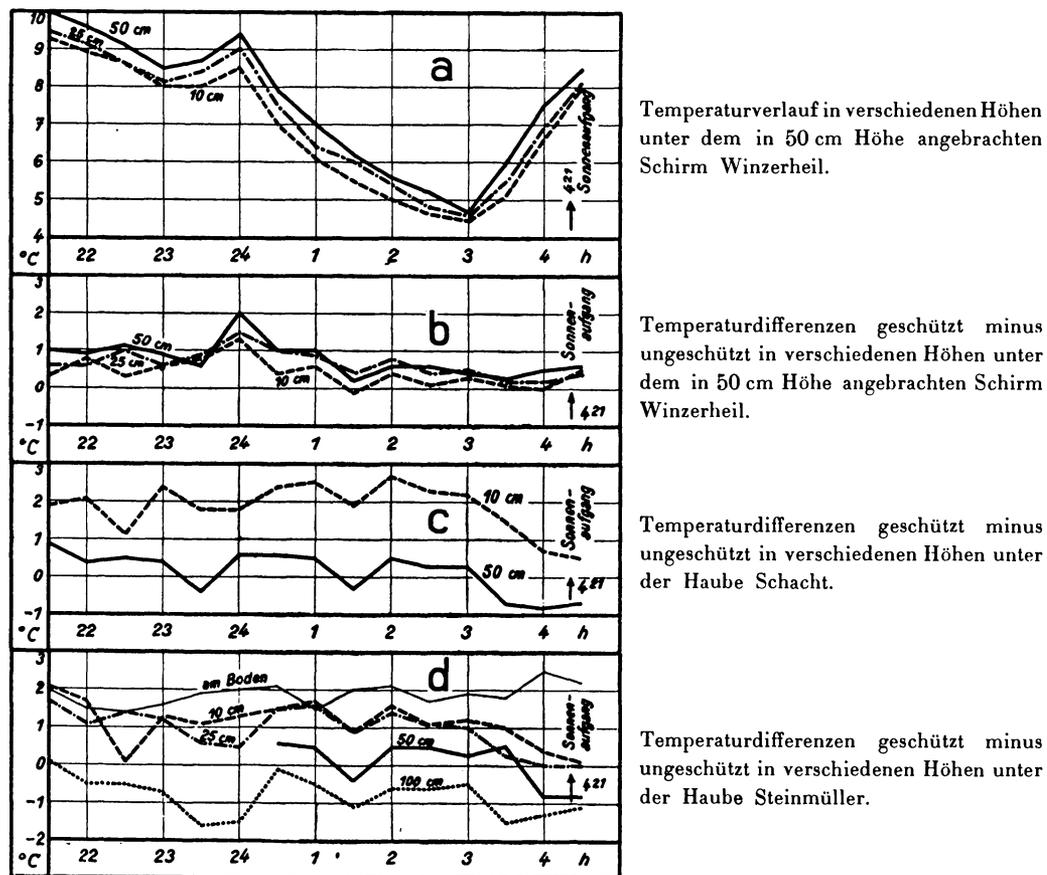


Abb. 62. Oppenheim 28./29. Juni 1929.

Der Verlauf der Temperaturdifferenzen für die Hauben von Schacht und Steinmüller (Abb. 62 c, d) läßt beim Vergleich mit dem Schirm (Abb. 62 b) deutliche Unterschiede erkennen. Denn während unter den all-seits offenen Schirmen, wie wir oben festgestellt haben, die Lufttemperatur in gleicher Weise wie im Freien mit der Höhe ansteigt, nimmt sie unter den geschlossenen Hauben nach oben hin erheblich ab. Am deutlichsten sieht man das bei der Schachthaube. Hier beträgt die Temperaturdifferenz der Thermometer innen gegen außen in 10 cm Höhe nahezu  $2^{\circ}$ . In der Versuchsnacht betrug aber die durch Ausstrahlung bedingte Untertemperatur des freistehenden Thermometerkörpers im Mittel  $0,8^{\circ}$ . Somit verbleibt ein Unterschied zwischen den wahren Luft-temperaturen von  $1,2^{\circ}$ .

Der Steinmüllerhut ist im ganzen weniger leistungsfähig. Er weist in 10 cm Höhe Werte auf, die sich im allgemeinen zwischen  $1$  und  $1,5^{\circ}$  bewegen. Das würde also einem Temperaturgewinn der Innenluft gegenüber der Außenluft von nur  $0,2$  bis  $0,7^{\circ}$  entsprechen. Zwischen 25 und 50 cm Höhe liegt die Zone, in der die wahre Temperatur der Innenluft mit der der Außenluft übereinstimmt. In ein Meter Höhe, also nur wenig unter der Spitze der Haube, ergeben sich nach Anbringung der Strahlungskorrektur Werte von annähernd  $2^{\circ}$  unter der Lufttemperatur im Freien. Vergleichen wir diese unsere Ergebnisse mit den Messungen von W. Schmidt, nicht mit seinen Folgerungen, so dürfen wir schließen, daß die Höhe der indifferenten Zone, in der also die Lufttemperatur

innen und außen gleich ist, nicht einer absoluten Höhenlage zugeordnet zu sein scheint, sondern wohl von der Dimension der Haube abhängt und etwa in der halben Höhe derselben liegt.

### E. Zusammenfassung.

Die bisher vorliegenden Untersuchungen lassen eine Reihe von Fragen offen, die nur bei elektrischer Registrierung von Lufttemperatur und Luftfeuchte auf kleinstem Raum innerhalb und außerhalb der Bedeckungen unter gleichzeitiger Kontrolle der Pflanzentemperaturen gelöst werden können. Zu diesen Registrierungen müßten Feinmessungen des Luftaustausches und exakte Untersuchungen über den Wärmehaushalt des Bodens hinzukommen.

Für die praktische Bewertung der Bedeckung der Pflanzen in ihren verschiedenen Anwendungsformen reichen die vorliegenden Meßergebnisse jedoch aus. Danach kann zusammenfassend gesagt werden:

1. Die Einzelbedeckungen lassen sich nach Formgebung und Wirkungsweise in Schirme und Hauben einteilen.  
 2. Die Schirme wirken im wesentlichen als Strahlungsschutz und geben daher nur bei klarem Himmel einen Effekt; dieser besteht darin, daß die Pflanzenteile vor Untertemperaturen gegenüber Luft bewahrt bleiben. Der Effekt ist von dem abgeblendeten Teil des Himmels abhängig und wird selten mehr als  $1,5^{\circ}$  betragen. In der Praxis wird man damit rechnen können, daß die Pflanzenteile nur  $1^{\circ}$  wärmer bleiben.

3. Im Gegensatz zu den Schirmen, bei denen allseits freier Luftaustausch herrscht, umschließen die Hauben einen bestimmten Luftraum. In diesem kann außer dem Strahlungsschutz auch der Wärmevorrat des Bodens den Pflanzen eine Temperaturerhöhung bringen; die Wirkung ist um so günstiger, je besser das Material der Haube gegen Wärmedurchgang isoliert. Innerhalb einer Haube aus Pappe gibt es drei Zonen: eine Kaltlufthaut, die an der durch Ausstrahlung unterkühlten Haubenwand anhaftet, ein dem Boden aufliegendes Warmluftpolster und dazwischen eine Austauschzone. Bei schlechter Wärmeisolation des Haubenmaterials und geringem Wärmevorrat des Bodens findet eine rasche Auskühlung der durch die Haube abgeschlossenen Luft statt, wodurch ein anfänglich positiver Effekt verschwindet oder sogar negativ wird. In der Praxis hilft man sich damit, daß man am unteren Haubenrand Öffnungen zum Abfließen der an der unterkühlten Hülle entstehenden Kaltluft anbringt.

4. Längs der Vertikalachse einer Haube nimmt also die Temperatur nach oben hin rasch ab. Während nur ganz niedrig wachsenden Pflanzen das Warmluftpolster zugute kommt, wird in der Normalhöhe von 50 cm mit einem verhältnismäßig geringen Effekt von durchschnittlich etwa  $0,5^{\circ}$  zu rechnen sein, wenn die Haube etwa 80 bis 100 cm hoch ist. Bei gleicher Haubenhöhe ist der Effekt für die Normalhöhe unter einer kegelförmigen Einzelbedeckung kleiner als unter einer zylinderförmigen. Hauben aus Stroh sind solchen aus Pappe überlegen, da sich infolge der besseren Wärmeisolation des Materials im Innern weit weniger Kaltluft bildet (Effekt um  $1^{\circ}$ ).

5. Von den großflächigen Bedeckungen entspricht die horizontale Bedeckung dem Schirm, die dach- und zeltförmige Bedeckung der Haube. Gegenüber dem Schirm erstreckt sich jedoch der Strahlungsschutz unter einer großflächigen horizontalen Überdachung nicht nur auf die höher gelegenen Pflanzenteile, sondern wirkt sich auch auf den Boden aus. Hinzu kommt, daß sich der Luftaustausch im großen und ganzen auf die Randzone beschränkt. In 50 cm Höhe können wir eine Erhöhung der Pflanzentemperatur gegen ungeschützt von durchschnittlich  $1,5^{\circ}$  annehmen, wenn das Dach aus Leinwand 1 m hoch gespannt ist.

6. Unter der dach- und zeltförmigen Bedeckung ist die größte Temperaturdifferenz geschützt gegen ungeschützt auf etwa  $2^{\circ}$  zu beziffern. In diesem Falle wird seitlicher Luftaustausch verhindert.

7. Die oben angeführten Effekte beziehen sich auf ebenes Gelände und annähernd Windstille über dem Versuchsfeld. Jede Abweichung von diesen Normalbedingungen bringt eine mehr oder weniger starke Änderung des Effektes mit sich. Kommt beispielsweise ein Schirm in strömender Luft zur Anwendung, so kann sich die Ausstrahlung am ungeschützten Vergleichsthermometer nicht voll auswirken, wodurch der Effekt geschützt gegen ungeschützt kleiner wird. Andererseits kann der Effekt auch größer werden, wenn z. B. eine dach- oder zeltförmige Bedeckung in einem Tal steht, das sich während der Nacht mit Kaltluft füllt. Bei guter Isolation (Stroh) wird in diesem Fall der Unterschied zwischen den Temperaturen im geschützten und ungeschützten Raum größer als im Normalfalle.

Der Nutzeffekt der Bedeckungsmaßnahmen ist sehr stark von dem Wärmevorrat abhängig, den der Boden tagsüber aufspeichern konnte, also von der vorhergegangenen Witterung. Zur Erzielung eines Maximaleffektes müssen die Bedeckungsstoffe tagsüber entfernt werden, was mit einem großen Arbeitsaufwand und einer starken Abnutzung des Materials verbunden ist. Geht am Abend oder in der Nacht Regen nieder, so vereisen während des darauffolgenden Aufklarens die Hauben oder Zelte. In vielen Fällen sind dann größere Schäden bei den bedeckten Pflanzen als bei den ungeschützten festgestellt worden.

8. Nach allem ist zu sagen, daß der erzielbare Effekt häufig durch äußere Umstände sehr klein oder sogar negativ wird und daß bei allen Bedeckungsmaßnahmen die Aufwendungen an Geld und Arbeitszeit nicht im Verhältnis zum Effekt stehen, zumal sichere und billigere Wege zum Frostschutz eingeschlagen werden können.

## VI. Die Frostschadenverhütung durch Ausstrahlungsschutz unter festen und flüssigen Lufttrübungen.

### A. Einteilung der Verfahren.

Die im Krieg in erheblichem Umfang als Tarnungsnebel erprobten chemischen Nebel fanden etwa ab 1923 in verschiedenen Frostschutzverfahren Verwendung. Benutzt wurden Zinknebel (Bergermischung) und Räucherpulver (Woesch) in Deutschland, Ammonchloridnebel in Deutschland und Frankreich, Phosphornebel in Amerika und Norwegen, Schwefelsäurenebel in Deutschland.

Landläufig spricht man bei den genannten Verfahren von chemischen Nebeln. In Wirklichkeit ist jedoch schon auf Grund der verschiedenartigen Wirkung klar zu unterscheiden zwischen festen Bestandteilen, die der Luft als Trübung beigemischt werden, und flüssigen Bestandteilen, für die man die Bezeichnung Nebel eher gelten lassen kann. Eine Veränderung des Aerosols durch ausschließliche Änderung der flüssigen Phase oder der festen Phase liegt nicht vor. Zwar sind Zinktrübung, Ammonchloridtrübung und Trübung durch Räucherpulver (Woesch) feste Beimengungen der Luft; nach mehr oder weniger langer Schwebezeit werden sie aber auch Einfluß auf die flüssige Phase des Aerosols gewinnen, weil sie als Kondensationskerne für nunmehr einsetzenden natürlichen Nebel wirken. Dies hängt natürlich von dem Sättigungsgrad der Luft mit Wasserdampf ab und von der Größe, Temperatur und elektrischen Ladung der Kondensationskerne. Die Feuchtesättigung ist in Frostnächten so nahe an 100 %, daß gewöhnlich — nicht immer — bereits vor Erreichen des Gefrierpunktes das Wasser sich an den gegen Luft kühleren Oberflächen (Blättern usw.) abschlägt. Wenn die Teilchen der Lufttrübungen durch Ausstrahlung ihre ursprüngliche Wärme verloren haben und selbst gegen Luft kälter sind, dienen sie als Ausgangspunkte für natürliche Nebel. Kessler konnte einmal (siehe Versuch Föhren, Seite 116), bei Nebelsäure die spontane Bildung eines Naturnebels infolge des Hineinfließens von Nebelsäuretröpfchen in eine vermutlich wasserdampfübersättigte Luftschicht beobachten, dagegen bisher nicht bei festen Lufttrübungen. Auch in der Literatur sind solche Bildungen von natürlichem Nebel als Folge der Anreicherung der Luft mit Kondensationskernen bei Frostversuchen nicht erwähnt. Sie sind ja auch durch die schlechten Sichtverhältnisse bei Nacht oder im Morgenrauen nicht gut erkennbar. Daß sie aber in den verschiedensten Übergangsstufen auftreten, scheint nach allen Beobachtungen über Wolkenbildung im Lee von Fabrikschornsteinen oder im Lee von Städten völlig sicher zu sein. Der Übersicht halber wollen wir jedoch die Trennung beibehalten und Ammonchlorid, Räucherpulver (Woesch) und Zink (Bergermischung) als feste Trübungen, Schwefeltrioxyd als flüssige Trübung und Phosphorpentoxyd als Übergang zwischen beiden gruppieren.

### B. Die Wirkung der Lufttrübungen und der Nebel.

Von den Teilchen vieler Lufttrübungen werden die von der Erde ausgehenden Strahlen in sämtlichen Bereichen praktisch vollständig absorbiert. Es ist also in erster Linie eine Frage der Dichte der künstlichen Decke, ob völlige Absorption erfolgt und ob infolge des Rückgangs der effektiven Ausstrahlung die Mehrabkühlung der strahlenden Oberflächen gegen Luft aufhört.

Wie weit dies praktisch zu erreichen ist, können wir nur größenordnungsmäßig sagen. Kimball und McIntire<sup>200</sup>) haben unter Phosphornebel einen Rückgang der effektiven Ausstrahlung um 50—60 %, Schmidt<sup>342</sup>) unter Rauchwolken 30—40 % bei Verwendung von Teer und 70—80 % bei Reisigfeuern festgestellt.

Kimball und Young<sup>201</sup>) haben mit dem Pyranometer unter Rauch von Ölfeuern 10—25 % Ausstrahlungsrückgang gemessen, der aber auch teilweise auf Gegenstrahlung der warmen Rußpartikel beruht. Da die Veröffentlichungen überhaupt nichts aussagen über die Intensität der Raucherzeugung, z. B. über die in der Zeiteinheit verbrauchte Stoffmenge, auch nichts enthalten über den Abstand der Meßgeräte von den Rauchquellen, so sind die angegebenen Zahlen nur als Effekte zu werten, deren Erzielung möglich war. Welche mittleren Effekte dem einen oder anderen genauer definierten Verfahren zuzuschreiben und welche Höchsteffekte erreichbar sind, entzieht sich bisher noch unserer Kenntnis.

Über den Einfluß von Wasserdampf und Nebel auf die Strahlungsverhältnisse ist schon bedeutend mehr gearbeitet worden, und dieser wird daher gesondert behandelt.

### C. Die Bodenausstrahlung und deren Absorption durch Wasserdampf und Nebel.

Wenn wir die Absorption der Ausstrahlung des Erdbodens und der über ihm befindlichen Pflanzenorgane in den aufliegenden Luftschichten betrachten wollen, so müssen wir uns zuerst ein Bild von der Art und Größenordnung dieser Strahlung machen.

Dabei gehen wir von der vereinfachenden Annahme aus, daß die ausstrahlende Oberfläche die Bedingungen eines „Schwarzen Körpers“ erfüllt. Ein solcher Körper läßt von auffallender Strahlung nichts durch und reflektiert auch nichts, andererseits gibt er die in ihm gespeicherte Wärmeenergie nach dem Kirchhoff-Gesetz auch wieder in Form von Strahlung ab, wenn er einem kälteren Körper gegenüber gestellt wird.

Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ist die Strahlung einer schwarzen Fläche in die Halbkugel proportional der vierten Potenz der absoluten Temperatur, wenn die Strahlung gegen einen Körper von 0 Grad abs. = - 273 Grad C erfolgt. Dieses Gesetz wird dargestellt durch die Gleichung

$$S = \sigma \cdot T^4,$$

worin S die Strahlungsintensität in Watt ( $10^7$  Erg = 1 Joule/sec) je Quadratcentimeter Oberfläche, T (= t + 273) die absolute Temperatur in Centigraden und  $\sigma$  eine Konstante bedeuten.

Die Konstante  $\sigma$  ist 1916 in Deutschland von W. Gerlach<sup>125)</sup> zu  $\sigma = 5,85 \cdot 10^{-12}$ , um die gleiche Zeit in Amerika von Coblentz zu

$$\sigma = 5,72 \cdot 10^{-12}$$

bestimmt worden. Wir wählen den letzten Wert, da dieser auch den Beziehungen der Konstanten  $\sigma$  zu anderen physikalischen Größen am besten gerecht wird.

Für unsere Zwecke empfiehlt sich von vorneherein eine Umrechnung auf die in der Meteorologie gebräuchlichen Einheiten. Da hier die Minute als Zeiteinheit genommen wird, muß zunächst mit 60 multipliziert werden. Die als Einheit der Energie gewählte Grammkalorie ist aber 4,19 Wattsekunden äquivalent; infolgedessen muß der angegebene Wert von  $\sigma$  noch durch 4,19 dividiert werden. Wir erhalten somit

$$\sigma_0 = 8,20 \cdot 10^{-11} \text{ gcal. cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \cdot \text{grad}^{-4}.$$

$\sigma_0$  ist also die Wärmemenge, die 1 cm<sup>2</sup> der Oberfläche eines vollkommen schwarzen Körpers von der absoluten Temperatur 1 Grad in einer Minute gegen einen Körper von der absoluten Temperatur Null strahlt.

Hat der „Gegenkörper“ eine von Null abweichende Temperatur T<sub>2</sub> und der Schwarze Körper die Temperatur T<sub>1</sub>, so beträgt die Ausstrahlung

$$S = \sigma_0 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

unter der Voraussetzung, daß der Gegenkörper sich über die ganze Halbkugel erstreckt. Diese mathematische Formulierung kann so aufgefaßt werden, daß die Temperaturstrahlung auf einen anderen Nullpunkt bezogen wird. Schreiben wir aber

$$S = \sigma_0 \cdot T_1^4 - \sigma_0 \cdot T_2^4 = S_1 - S_2,$$

so ergibt sich ein Gegeneinanderwirken der Strahlungen S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub>, wovon nur die Strahlung S effektiv in Erscheinung tritt. Von dieser Vorstellung werden wir bei der Betrachtung der Gegenstrahlung der Atmosphäre immer wieder Gebrauch machen.

Berechnen wir nun die Ausstrahlung einer schwarzen Oberfläche, etwa der des schwarzen Streifens am Ångström'schen Pyrgeometer, so erhalten wir nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz für eine mittlere Temperatur von 15 Grad C oder 288 Grad abs. den Wert 0,564 und für 0 Grad C (273 Grad abs.) den Wert 0,456 gcal/cm<sup>2</sup> · min.\*)

Nach unseren Messungen mit dem Pyrgeometer beträgt die effektive Ausstrahlung S<sub>e</sub> aber nie mehr als 0,2. Ein in klaren Nächten häufig vorkommender Höchstwert ist 0,15. Dieser Wert stimmt auch mit den Angaben anderer Autoren gut überein, wobei zu berücksichtigen ist, daß die Ergebnisse der Messungen nicht nur von der Zusammensetzung, sondern auch von der Mächtigkeit der darüberliegenden Luftschichten abhängig sind.

Bezeichnen wir die Eigenstrahlung der Oberfläche mit S<sub>T</sub>, so berechnet sich die Gegenstrahlung der Atmosphäre S<sub>g</sub> zu

$$S_g = S_T - S_e.$$

Für die bei 15 Grad und 0 Grad herrschende Temperaturstrahlung würde die Gegenstrahlung also mindestens 0,41 bzw. 0,31 gcal/cm<sup>2</sup> · min betragen (vgl. S. 10).

Die Durchschnittswerte der effektiven Ausstrahlung sind nach Hann-Süring<sup>146)</sup> bei wolkenlosem Himmel 0,12 bis 0,24 gcal.cm<sup>-2</sup> · min<sup>-1</sup>. Nach F. Baur und H. Philipps<sup>38)</sup> beträgt die effektive Ausstrahlung der Erdoberfläche zwischen dem 40. und 50. nördlichen Breitengrad im Mai etwa 0,12 und im Oktober etwa 0,1 gcal.cm<sup>-2</sup> · min<sup>-1</sup>.

\*) Die Beträge für die beiden um 15 Grad verschiedenen Temperaturen liegen also gar nicht so weit auseinander, wie man auf Grund der mit der 4. Potenz eingehenden Temperatur erwarten würde. Das ist darauf zurückzuführen, daß die beiden zugehörigen Absoluttemperaturen 273 und 288 sich verhältnismäßig wenig unterscheiden.

Die Oberflächen, die uns interessieren, sind in ihrem Absorptionsvermögen als schwarze Körper aufzufassen; denn nach Falckenberg<sup>100, 101</sup>) haben im Bereich der ultraroten Wellen ( $> 10 \mu$ ) Tannennadeln, Blätter und Gras 96—98 % des Absorptionsvermögens eines in der Theorie völlig schwarzen Körpers, während grober Kies immerhin noch 91—92 % aufweist.

Als wesentlicher Bestandteil der Atmosphäre, der die Wärmeabgabe des Bodens durch Strahlung einschränkend beeinflusst und gewissermaßen reguliert, kommt neben der Kohlensäure, die in kaum merklichen Mengen (0,03 Volumprozent) vorhanden ist, fast ausschließlich der Wasserdampf in Frage. Bevor wir aber an die Betrachtung dieser Einwirkung herangehen können, müssen wir wissen, welcher Art die Ausstrahlung ist, das heißt über welche Spektralbereiche sie sich erstreckt. Denn die Stärke der Absorption durch den Wasserdampf ist für die einzelnen Wellenlängen sehr verschieden.

Zunächst kann mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes

$$\lambda_{\max} = \frac{2890}{T}, \mu$$

die Stelle im Spektrum ermittelt werden, wo der Höhepunkt\*) der Temperaturstrahlung liegt. Als Einheit der Wellenlänge wählen wir ein Mikron =  $1 \mu = 10^{-3}$  mm. Bei den Temperaturen 15 und 0 Grad C fiele das Maximum der Strahlung demnach auf die Welle 10,0 bzw. 10,6  $\mu$ . Der Höhepunkt des Spektrums verschiebt sich also bei abnehmender Temperatur nach der Seite der längeren Wellen.

Je mehr sich ein Körper in seinen Eigenschaften von einem schwarzen Körper entfernt, um so stärker weichen nicht nur die Werte seiner Ausstrahlung von den berechneten ab, sondern es verschiebt sich auch der spektrale Höhepunkt dieser Strahlung. Der absolute Betrag der Strahlung in einem solchen Falle ist sehr schwer zu berechnen, da jeder Körper wieder andere Eigentümlichkeiten in den verschiedenen Spektralgebieten aufweist (selektive Eigenschaften), so daß nicht mit einer gleichmäßigen Verkleinerung der Strahlungskurve gerechnet werden kann. Dagegen läßt sich für blankes Platin durch Verwendung einer anderen bekannten Konstante (2630 statt 2890) wenigstens der Höhepunkt der Strahlung angeben. In der Tabelle 24 sind diese Werte mit den bereits errechneten Größen zusammengestellt. Außerdem sind darin die für — 15 Grad C geltenden Beträge enthalten. Streng genommen wird also der spektrale Schwerpunkt einer ausstrahlenden Oberfläche von 0 Grad C nicht genau bei 10,6  $\mu$  liegen, sondern je nach der Abweichung von der Beschaffenheit eines Schwarzen Körpers in bezug auf Reflexion zwischen 9,6 und 10,6  $\mu$ .

Tabelle 24

Temperatur ° C	abs.	Eigenstrahlung gcal/cm <sup>2</sup> · min	Wellenlänge des Maximums	
			Schwarzer Körper $\mu$	Blankes Platin $\mu$
+ 15	288	0,564	10,0	9,1
0	273	0,456	10,6	9,6
— 15	258	0,363	11,2	10,2

-Nach dieser ersten Orientierung, wonach die Wellenlängen der Bodenausstrahlung bei den vorkommenden Temperaturen im langwelligen Infrarot um 10  $\mu$  liegen, müssen wir nunmehr zur Betrachtung der gesamten Verteilung der Ausstrahlung über das Spektrum schreiten. Die für die einzelnen Wellenbereiche geltenden Intensitäten lassen sich wieder für den Fall des Schwarzen Körpers nach der Planck'schen Formel

$$E_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left( \frac{c_2}{e^{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \text{ gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$$

berechnen. Hierin sind die Konstanten  $c_1 = 8,42 \cdot 10^8$  und  $c_2 = 14300$  zu setzen;  $e = 2,7183$  ist die Basis der natürlichen Logarithmen,  $\lambda$  die Wellenlänge in  $\mu$  und T die absolute Temperatur in Centigraden. Die Werte gelten für polarisierte Strahlung in den Raumwinkel 1, weshalb bei normaler Strahlung in die Halbkugel noch mit  $2 \pi = 6,283$  zu multiplizieren ist.

In einer Arbeit über die Durchlässigkeit von Strahlungsfiltren hat W. Kaempfert<sup>175</sup>) die Rechnung für eine mittlere Temperatur von 15 Grad C durchgeführt. Das Ergebnis dieser Rechnung ist in Abbildung 63 in Form einer Strahlungskurve dargestellt. Die Werte klingen nach beiden Seiten des bereits berechneten Maximums bei 10  $\mu$  ab. Während aber von den kurzen Wellen her ein steiler Anstieg erfolgt, strebt die Kurve nach der Seite der langen Wellen hin nur langsam der Abszissenachse zu. Eine merkliche Intensität tritt erst bei 3  $\mu$  auf. Bei 50  $\mu$  ist die Intensität auf einen Wert gesunken, der gegenüber dem Gesamtbetrag der Strahlung nicht mehr ins Gewicht fällt (über 50  $\mu$  etwa noch 3 %).

\*) Der spektrale Schwerpunkt liegt etwas weiter nach den langen Wellen hin.

Dieser Strahlungskurve läßt sich nun die Absorptionskurve des Wasserdampfes überlagern. In Abbildung 63 ist die von Hettner<sup>156)</sup> gemessene Absorption des Wasserdampfes im Infrarot bei einem 0,6 mm Niederschlags-

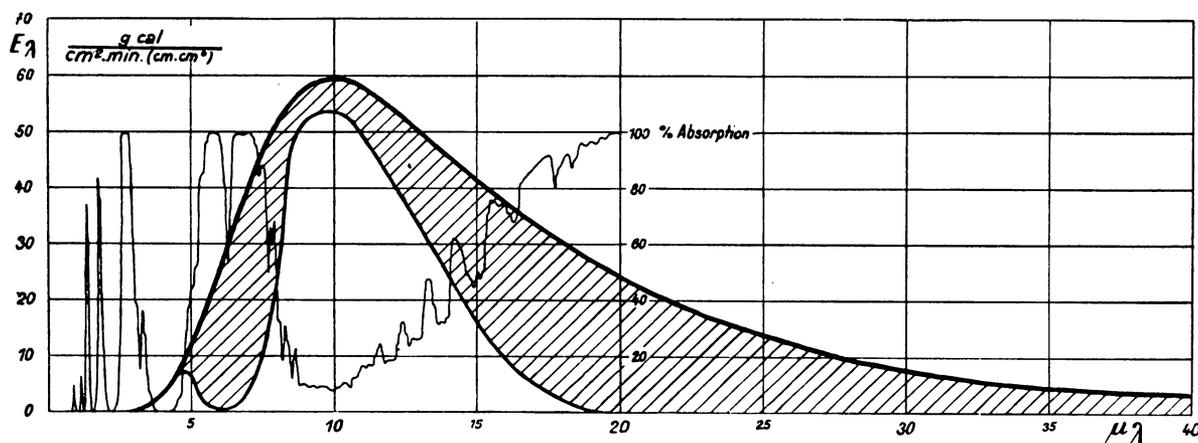


Abb. 63. Strahlung eines „Schwarzen Körpers“ von 15° C und Absorption derselben durch Wasserdampf in Stärke von 0,6 mm Niederschlagswasser.

wasser entsprechenden Dampfdruck als dünne Linie eingezeichnet. Sie ist deutlich getrennt in ein Absorptionsgebiet unterhalb 8,5 und ein solches oberhalb 11  $\mu$ . Das kurzwellige mit den abgesetzten Einzelbanden ist das Rotationsschwingungsspektrum, das den Eigenfrequenzen der Wasserdampfionen entspricht, das langwellige das reine Rotationsspektrum, das nur auf die Rotation der Gasmolekel zurückzuführen ist.

Tabelle 25. Strahlung eines Schwarzen Körpers (ebene Oberfläche) bei 15° C = 288° abs. gegen den Raumwinkel 1 und gegen die Halbkugel (abs. Nullpunkt = -273° C) in verschiedenen Spektralgebieten, gemessen in  $\text{gcal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ , sowie Absorption dieser Strahlung durch Wasserdampf (0,6 mm Niederschlagswasser)

Spektralbreite (Wellenbereich)	Intensität der		Durch Wasserdampf hervorgerufene Absorption	
	polar. Strahlung in den Raumwinkel 1	norm. Strahlung in die Halbkugel	in % (nach Hettner)	in $\text{gcal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$
0—1 $\mu$	0,0000	0,0000	—	—
1—2	0000	0000	—	—
2—3	0000	0000	—	—
3—4	0002	0009	5	0,0000
4—5	0007	0045	4	0002
5—6	0,0019	0,0119	92	0,0110
6—7	0034	0213	97	0207
7—8	0046	0291	77	0224
8—9	0055	0346	14	0048
9—10	0059	0368	9	0033
10—11	0,0059	0,0370	11	0,0041
11—12	0056	0353	19	0067
12—13	0052	0329	28	0092
13—14	0048	0300	36	0108
14—15	0043	0272	52	0141
15—16	0,0039	0,0246	68	0,0167
16—17	0035	0221	80	0177
17—18	0032	0200	90	0180
18—19	0029	0179	93	0167
19—20	0026	0161	99	0159
20—25	0,0093	0,0581	100	0,0581
25—30	0053	0330	(100)	0330
30—35	0030	0189	(100)	0189
35—40	0018	0110	(100)	0110
0—40	0,0835	0,5232	—	0,3133
Rest 5 %	0042	026	—	026
Summe	0,088	0,55	(62 %)	0,34

Anmerkung: Während die Einzelwerte der absorbierten Strahlung für die fortschreitenden Spektral-Intervalle aus den Hettner'schen Absorptionswerten berechnet sind, ergibt sich die prozentuale Gesamtabsorption aus dem Vergleich der beiden Summenwerte.

Um die Modifikation der Strahlung beim Durchgang durch Wasserdampf zu erkennen, wurden zunächst die Energiebeträge für Intervalle von  $1 \mu$  durch Mittelbildung (Planimetrierung) der Strahlungskurve entnommen. Dann wurden an diesen die jeweils herrschenden mittleren Absorptionen angebracht und die Einzelwerte addiert. Die innere Kurve der Abbildung 63 veranschaulicht Art und Menge der durchgelassenen Strahlung, die schraffierte Fläche bedeutet Absorption. Bei dem gegebenen Dampfdruck wird also nur Strahlung zwischen 3 und  $20 \mu$  durchgelassen, der Hauptteil strahlt aber in dem wesentlich engeren Gebiet von 8— $14 \mu$ . Bei stärkerer Absorption durch größere Wasserdampfmenge wird das Spektralgebiet der durchgelassenen Strahlung entsprechend enger.

Tabelle 25 zeigt das Ergebnis der Berechnungen im einzelnen. Bei der Addition ergibt sich für die Gesamtstrahlung 0,176 in den Raumwinkel 1 (Faktor 2!), in die Halbkugel  $0,55 \text{ gcal/cm}^2 \text{ min}$ . Die insgesamt durch Wasserdampf absorbierte Energie beträgt 0,34, also 62 % der ursprünglichen Strahlung.

F. Albrecht<sup>9)</sup> weist auf Grund quantentheoretischer Erwägungen nach, daß die Form der Absorptionskurve sehr stark von Druck und Temperatur abhängt. Nicht nur die Stärke der Absorption, sondern vor allem auch Anfang und Ende der Absorptionsbanden sind außerordentlich starken Schwankungen unterworfen. Dies tritt deutlich in den von Albrecht für tiefe Temperaturen berechneten Rotationsspektren zutage, die eine Auflösung in zahlreiche Einzelbanden erleiden. Hiermit lassen sich auch die Unterschiede zwischen den Messungen von Hettner und denen von Fowle in Amerika erklären. Hettner mißt nämlich im Laboratorium bei  $127^\circ \text{C}$ , während Fowle unter normalen Bedingungen mit anderen Methoden arbeitet.

So wird also die Ausstrahlung trotz der Absorptionslücke im Gebiet des spektralen Höhepunktes im ganzen doch recht empfindlich auf Änderungen des Wasserdampfgehaltes der Luft reagieren. Bei Erreichung der Sättigungsgrenze wird nur noch ein schmales Wellenband um  $10 \mu$  die Atmosphäre passieren. Wir müssen in diesem Bereich schon die Fowle'schen Nullwerte der Absorption in Ansatz bringen. Unser berechneter Wert von 62 % liegt daher zu hoch. Dafür sprechen auch neuere Messungen von Falckenberg.<sup>100, 101)</sup> Eine genaue Berechnung für verschiedene Drucke läßt sich zur Zeit nicht anstellen, da die vorliegenden Messungen hierfür nicht ausreichen.

In dem Augenblick, in dem Kondensation eintritt, wird die Absorption durch die flüssige Phase des Wassers vorherrschend.

Tabelle 26. Absorption der Strahlung durch Wasser<sup>209)</sup>

Dicke der Wasserschicht	Wellenlänge $\mu$	Absorption %
1 m	0,77	91
1 cm	1,00	35
	1,25	71
0,05 mm	1,50	18
	1,71	5
	1,94	46
	2,2	14
	2,7	88
0,01 mm	1,8	2
	3,1	94
	3,8	19
	4,7	42
	5,3	27
	6,1	92
	7,1	56
	8,4	50

Tabelle 26 gibt die Absorption des Wassers für vier verschiedene Schichtdicken wieder.

Die größeren Wellenlängen werden schon von dünnsten Wasserschichten restlos verschluckt. Besonders in dem für uns wichtigen Gebiet zwischen 8 und  $13 \mu$  findet starke Absorption durch flüssiges Wasser statt. Es ist daher verständlich, wenn bei aufziehender Bewölkung die Ausstrahlung auf einen sehr kleinen Betrag zurückgeht. Denn dann ist im wesentlichen nur noch die effektive Strahlung gegen die kalte Wolke wirksam. Gegebenenfalls kann auch Umkehr des Strahlungsgefälles eintreten, wenn die Wolke wärmer ist als der Boden.

Merkwürdig bleibt aber, daß bei unseren Messungen mit künstlichen Nebeln sich im allgemeinen nur Rückgänge der Ausstrahlung um 20—40 % nachweisen ließen, obwohl die Nebeldecke dem Auge undurchdringlich erschien. Hier werden wohl die Strahlen nicht restlos in die Tropfen eindringen, sondern ein Teil wird zwischen den Tropfen nach mehrmaliger Reflexion die Nebeldecke durchstoßen.

Von besonderem Interesse ist das Stadium des Übergangs von Wasserdampf zum flüssigen, tropfenförmigen (kolloidalen) Wasser. Albrecht<sup>10)</sup> macht darauf aufmerksam, daß bei einem Tröpfchendurchmesser

von  $10 \mu$  ein kritischer Wert erreicht wird, der zu Beugungen der gleichgroßen Wellen Anlaß gibt. Die Folge davon wird eine weitgehende Reflexion der Strahlung an der unteren Wolkengrenze sein. Dabei kommt die von einer Stelle der Erdoberfläche ausgehende Strahlung dem ganzen Boden wieder zugute.

**D. Welche Effekte sind durch die Lufttrübungsmethoden zu erwarten?**

Um die etwas komplizierten, sich gegenseitig überlagernden Effekte, die als Folge der Anwendung der Lufttrübungsverfahren beim Frostschutz auftreten, erklären zu können, haben wir im folgenden durch schematische Abbildungen die vier wesentlichen Grundtypen des Temperaturverlaufs dargestellt, in welche alle vorkommenden, aus verschiedenen Einflüssen zu erwartenden Temperaturverläufe mehr oder weniger eingegliedert werden können. Da gerade bei Räucher- und Nebelversuchen Vergleiche mit unbeeinflussten Thermometerablesungen nicht immer möglich sind, ist diese schematische Darstellung ein gutes Hilfsmittel für die Veranschaulichung der Effekte.

Auf allen Darstellungen der Abbildung 64 ist ein Temperaturverlauf über drei Stunden gezeichnet. Im Falle a ist der normale Temperaturrückgang zu sehen, wie er an einem Thermometer in einer windstillen Ausstrahlungsnacht beobachtet wird. Der Abfall erfolgt zunächst steil und wird dann immer gelinder, je mehr sich die Temperatur dem Taupunkt nähert. Bei Windstille liegen die an einem ungeschützten Minimumthermometer abgelesenen Werte 1—2 Grad unter der jeweiligen Temperatur der umgebenden Luft. Es ist annähernd der gleiche Betrag, um den sich freistehende Pflanzenorgane durch Ausstrahlung gegenüber der Luft abkühlen. Tritt Luftbewegung ein, so nähert sich die Instrumentaltemperatur der der Luft, bis bei größerer Windgeschwindigkeit (etwa 2—3 m/sec) kein merklicher Unterschied mehr zu beobachten ist.

Ein entsprechend starker Luftaustausch hebt also die Untertemperatur der Thermometer gegen Luft auf. In unserem Beispiel ist ein Unterschied von 1 Grad angenommen, der bei unseren Messungen bei schwacher Luftbewegung besonders häufig auftritt. Die Kurve *n* ist insofern stark idealisiert, als in Wirklichkeit der Übergang meist stufenmäßig erfolgt, was mit mehr oder weniger periodisch erfolgenden Veränderungen des Luftaustausches und dem hemmenden Einfluß der Vorkondensation in alternden Mikroluftkörpern erklärt werden muß. Von diesen Komplikationen sehen wir hier bewußt ab.

Für den Fall b ist nach einer Stunde ein Strahlungsschutz (Budigschirm) am Thermometer angebracht. Hierdurch wird ein Temperaturanstieg bewirkt, dessen Geschwindigkeit von der Trägheit des Thermometers abhängt und der so lange anhält, bis ein Angleich an die Kurve der Lufttemperatur stattgefunden hat. Der weitere Verlauf *s* wird parallel

der ursprünglichen Kurve *n* erfolgen, unter Voraussetzung gleichbleibender Außenbedingungen. Dieser Effekt des Strahlungsschutzes ist bei einer Abdeckung, die dem Budigschirm entspricht, als hundertprozentig zu bezeichnen. Erfahrungsgemäß wird weder bei fester Lufttrübung noch bei flüssiger ein hundertprozentiger Strahlungsschutz eintreten. Demnach wird sich der Abstand der Kurven *s* und *n* unter künstlichen Wolken verringern.

Im Falle c denken wir uns eine großflächige Bedeckung über das Thermometer gebreitet. Dies kann durch Überspannung mit festen Stoffen, also durch ein großes Zelt geschehen, oder auch durch eine natürliche oder künstliche Wolkendecke. Im Falle der großflächigen Bedeckung wird nicht nur die Unterkaltung des Thermometers gegen Luft infolge des Ausstrahlungsrückganges verhindert, sondern es wird dem Thermometer tatsächlich die im Boden aufgespeicherte Wärme zugute kommen. Die Energieabgabe der Bodenoberfläche infolge der

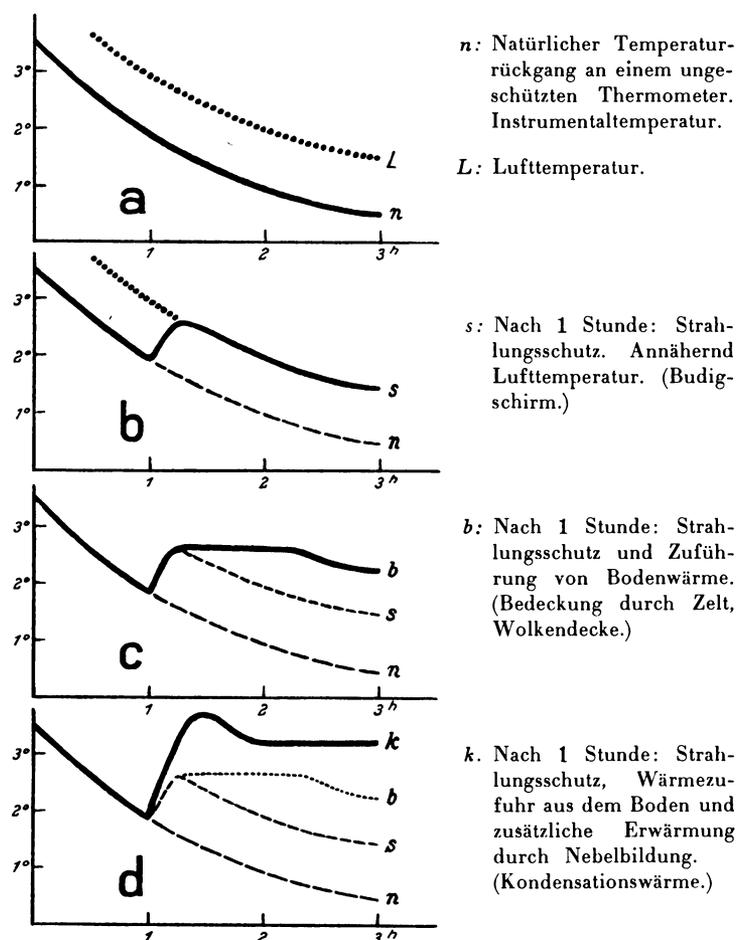


Abb. 64. Natürlicher und beeinflusster Temperaturverlauf an einem Thermometer während der Nacht.

Ausstrahlungsverluste fällt weg. Die aus dem Erdinneren nachrückende Wärme dient daher zur Erwärmung der Erdoberfläche, so daß auch die unmittelbar aufliegende Luft einen Temperaturanstieg erfährt. Ist die Wärmezufuhr aus dem Boden groß, so wird zunächst ein Anstieg über die Kurve *s* hinaus erfolgen; ist sie klein, so wird die durch die Messung erhaltene Kurve weniger fallen als *s*. Wir haben einen mittleren Verlauf für die Kurve *b* gewählt. Nach einer gewissen Zeit wird sich ein Gleichgewicht herstellen, weshalb die Kurve *b* dann annähernd parallel *s* bzw. *n* verlaufen wird. Wenn die oberen Bodenschichten kalt sind oder wenn infolge auflagernder Isolierkörper, z. B. Schnee und Humusdecke, eine Wärmeleitung aus dem Boden zu der durch Ausstrahlung erkalteten Oberfläche nicht stattfindet, wird die Kurve *b* mehr oder weniger in die Kurve *s* übergehen. Bei den Lufttrübungsverfahren kann unter günstigen Verhältnissen durch Zuführung von Bodenwärme ein wahrer Temperaturanstieg der bodennahen Luftschicht im Gegensatz zu dem auf das strahlungsgeschützte Thermometer im Falle *b* beschränkten Anstieg gleichfalls erfolgen. Er wird, da erfahrungsgemäß der Rückgang der effektiven Ausstrahlung unter der künstlichen Wolkendecke nicht als hundertprozentig anzusprechen ist, nur mehr oder weniger über die Kurve *s* hinausgehen.

Schließlich kann der Fall *d* eintreten, in welchem außer der Unterbindung der Ausstrahlung und der Zuführung von Bodenwärme noch zusätzlich anderweitige Wärme hinzukommt. Dieser Fall der Energiezufuhr ereignet sich bei Nebelbildung infolge der dabei freiwerdenden Kondensationswärme. In dem Augenblick, in dem die Kondensation beginnt, wird die Kurve rasch zu hohen Werten ansteigen, wobei sie sowohl die Kurve *s* als auch die Kurve *b* unter sich läßt. In dem gleichen Maße, in welchem die Temperatur normalerweise sinken würde, schreitet die anfangs heftig einsetzende Kondensation langsam fort, so daß sich allmählich ein Gleichgewichtszustand einstellt, der sich in annähernd konstantem Temperaturverlauf äußert. Der gleiche Effekt ist vorhanden bei Wärmezufuhr aus anderen Gründen, z. B. durch die Wärme, die bei der Verbrennung rußerzeugender Mittel frei wird, bei der Entstehung von Schwefelsäure aus Schwefelsäureanhydrid und Wasser oder bei der Verbrennung von Phosphor.

Wenn es gelingt, durch Messungen die vier Idealverläufe der Temperatur wirklich zu gewinnen, so haben wir eine Analyse vorliegen, welche auch einen Einblick in die energetischen Verhältnisse der Vorgänge gestattet. (Grundsätzlich macht es keine Schwierigkeiten, die Fälle *a*, *b* und *c* messend zu verfolgen, während der Fall *d* größere Schwierigkeiten bereitet.) Bei Reduktion auf die Masseneinheit entsprechen nämlich die durch Ausplanimetrierung zu gewinnenden Flächen zwischen den einzelnen Kurven jeweils den Energiebeträgen, die bei den Einzelvorgängen in Erscheinung treten. So gäbe also z. B. das Flächenstück zwischen den Kurven *s* und *b* das Maß für die vom Boden abgegebene Wärme.

### E. Die Versuche mit den verschiedenen Lufttrübungsverfahren.

#### 1. Lufttrübung mit Ammonchlorid (Chlorammon, salzsaures Ammoniak, $\text{NH}_4\text{Cl}$ ).

Während des Krieges wurden Apparate gebaut, die mittels Ammonchlorid eine dichte Lufttrübung zu Tarnungszwecken erzeugten. Salzsäure wird unter sehr hohem Druck in äußerst feiner Verstäubung aus Flaschen in gleichfalls aus Druckflaschen ausströmendes Ammoniakgas hineingeblasen. Es entstehen kleine Kristalle salzsauren Ammoniaks, welche verhältnismäßig gut in Schwebe bleiben. In Frankreich wird dieses Verfahren heute noch in der angegebenen Form verwendet. Nach einer österreichischen Meldung werden in Frankreich Ammonchloridnebel unter der Bezeichnung Rauchgas durch die Société Industrielle de Tourcoing hergestellt. Man verwendet zwei verflüssigte Gase, die bei gegenseitigem Kontakt ungeheure Wolken erzeugen, ohne gleichzeitige Verbrennung in den Kulturen hervorzurufen. Von den beiden Gasen spielt das eine die Rolle der Base, das andere die der Säure. Die ausströmende Gasmenge ist genau dosiert, so daß der Rauch völlig neutralisiert ist. Die Gasentwicklung ist regulierbar.

In Verbindung mit der I. G. Farbenindustrie erzeugte Kessler Ammonchloridnebel zur Lufttrübung. Das Verfahren beruhte jedoch nicht auf der oben geschilderten Art der Erzeugung von Chlorammonnebel, sondern in diesem Falle wurde das salzsaure Ammoniak durch ein Verbrennungspulver verdampft. In der Luft sublimierte das verdampfte salzsaure Ammoniak wiederum zu Kristallen von guter Schwebefähigkeit. Schäden wurden bei dieser Art der Chlorammontrübungen an den Kulturen nicht festgestellt. Das an sich aussichtsreiche Verfahren wurde in einigen Vorversuchen auf Saarstein und in Avelsbach auf seine Anwendungsmöglichkeit, jedoch nicht in Großversuchen mit zugehörigen Messungen auf seine Frostschutzwirkung geprüft. Jedenfalls ist die Anwendung vielversprechend. Das Verfahren hat den Vorteil, daß das Material billig und jederzeit käuflich zu haben ist (wenigstens das als Düngungsmittel im Handel befindliche salzsaure Ammoniak), daß weiter schädigende Wirkungen nicht festzustellen sind, sondern im Gegenteil infolge der düngenden Wirkung des Ammonchlorids ein günstiger Einfluß auf die Kulturen zu erwarten ist.

## 2. Lufttrübung mit Zinknebel (Bergermischung: Zinkstaub + Zinkoxyd + Hexachloräthan)

Kessler machte in den Jahren 1929—1931 einige Versuche, mit dem dichten Rauch von Zinknebel frostgefährdete Flächen zu überziehen (siehe Abb. 176, 177, Tafel 4). Die inzwischen bekannt gewordenen pflanzenschädigenden Wirkungen dieses Nebels ließen von weiteren Verwendungen Abstand nehmen. Da keine Literaturangaben vorliegen, sei erwähnt, daß G. Lüstner am pflanzenpathologischen Institut der Lehr- und Forschungsanstalt Geisenheim Versuche mit Zinknebeln anstellte und ein ungünstiges Urteil abgab, da starke Einwirkung von Zinknebel Schädigungen an Rebblättern und anderen Pflanzen hervorrief.

In einem 42 m<sup>3</sup> fassenden Treibhaus wurden folgende Pflanzen untergebracht: Fuchsien, Salbei, Geranien, Tetragonia, Gurke, Bohne, Kohl und Sellerie. 200 g Bergermischung wurden abgebrannt, und diese Konzentration von annähernd 5 g je Kubikmeter ließ man eine Stunde lang auf die Pflanzen einwirken. Die Lufttrübung war so dicht, daß die Sicht auf einen halben Meter genommen war. Nach dem Versuch ließen einige der Pflanzen, insbesondere die Gurken, die Blätter hängen und gemäß Bericht von Professor Lüstner vom 31. Mai 1928 gingen die Pflanzen in den folgenden Tagen vollständig ein.

## 3. Lufttrübung mit Räucherpulver Woesch.

(Zusammensetzung unbekannt; enthält scheinbar unter anderem Harz und schweflige Säure.)

Ein von der Firma Woesch, Feuerwerkerei in Würzburg, herausgebrachtes Räucherpulver, das auch in Form von Räucherfackeln hergestellt wird, wurde von Kessler auf seine Verwendbarkeit in kleineren Versuchen 1929 und 1930 geprüft.

Das pharmakologische Institut der Universität Würzburg hatte 1930 mit vier verschiedenen Rebsorten Versuche über die pflanzenschädigende Wirkung des Mittels angestellt. In einem luftdicht verschlossenen Versuchsraum mit Glaswänden, dessen Inhalt 1 m<sup>3</sup> betrug, wurden bestimmte Mengen des zu prüfenden Pulvers abgebrannt. Ein Meter lange, beblätterte Ranken von vier verschiedenen Rebsorten standen während der Beobachtungszeit in einem mit Wasser gefüllten Glaszylinder. Das Wasser wurde nach dem Versuch erneuert. Die Versuche zeigten, daß bei hohen Rauchkonzentrationen von 50 g Trockensubstanz je Kubikmeter und 5 g je Kubikmeter und Stunde die Blätter sich größtenteils gelbbraun verfärbten und welkten, die Augen jedoch nicht geschädigt wurden. Bei 1 g je Kubikmeter trat bei einstündiger Wirkung nur eine vorübergehende Bräunung der jungen zarten Blätter auf, welche nach einigen Stunden wieder verschwand. Am empfindlichsten erwiesen sich die Rebsorten „Früher Leipziger“ und „Blauer Trollinger“, während „Diamanttraube“ und „Amerikaner Bastard“ (*Vitis vinifera* × *Vitis riparia*) widerstandsfähiger gegen den Rauch waren. Da Konzentrationen von je 1 g je Kubikmeter Luft in der Praxis selten erreicht oder gar überschritten werden, wäre nach Ansicht des pharmakologischen Instituts die Verwendung in der Praxis unbedenklich. Die Zusammensetzung des Räucherpulvers wurde nicht angegeben, jedoch enthielt es, wie aus dem Geruch zu schließen war, bestimmte Mengen schwefliger Säure. Daß schweflige Säure eine erhebliche toxische Wirkung auf Pflanzen ausübt, hat Stocklasa<sup>372)</sup> festgestellt. Er bezeichnet es als heftiges Assimilationsgift für Pflanzen. Schon bei 0,001 % SO<sub>2</sub> in der Luft wurden von ihm Beschädigungen des Chlorophylls und in Zusammenhang damit Störungen der Plasmaströmung festgestellt. 0,01 % ige schweflige Säure wirkt bereits als heftiges Assimilationsgift. Für das toxische Verhalten von Schwefeloxyd (SO<sub>2</sub>), das infolge seiner Sauerstoffaffinität ( $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 = 2\text{SO}_3$ ) wahrscheinlich dieses Element (O<sub>2</sub>) aus den lebenswichtigen Teilen der Zelle herausreißt, ist nach Stocklasa<sup>372)</sup> charakteristisch, daß die Giftwirkung im Tageslicht ganz wesentlich stärker ist als während der Nacht. Schwefeldioxyd ist eben ein typisches Assimilationsgift, dessen toxische Wirkung während der Assimilationstätigkeit am stärksten ist.

Die Rauchentwicklung war mittelmäßig bis gut, wenn man sie mit den anderen chemischen Räuchermitteln vergleicht. In erster Linie war es der hohe Preis für die zum Einnebeln erforderlichen Mengen, der Kessler von einer weiteren Verwendung in Großversuchen Abstand nehmen ließ, zum anderen auch die eben erwähnte schädigende Wirkung auf Pflanzen bei einigermaßen hohen Konzentrationen.

## 4. Lufttrübung mit Phosphor (Phosphorpentoxyd).

Da das Wetterbureau der Vereinigten Staaten nach Beendigung des Weltkrieges immer wieder darum angegangen wurde, zu der Frage Stellung zu nehmen, ob nicht chemische Nebel als Schutz gegen die Schadenfröste in den Plantagen erfolgreich angewendet werden könnten, stellte es im Jahre 1923 in Verbindung mit dem chemischen Laboratorium für Kriegswaffen einige Vernebelungsversuche an. Schon von vorneherein teilte das Wetterbureau in keiner Weise die damals häufig vertretene Ansicht, daß die Vernebelung durch Verbrennung verschiedener Chemikalien nicht nur bedeutend billiger und sauberer, sondern auch erfolgreicher sein müsse als die Geländeheizung mit Öl.

Bei den Versuchen wollte man vor allem feststellen, ob der erzielte Effekt als eine Verhinderung der Ausstrahlung aufzufassen sei oder aber auf der durch die Verbrennung erzeugten Wärme beruhe. Aus diesem Grunde entschloß man sich, die Erwärmung der Luft auf ein Mindestmaß zu beschränken, um so die Ausstrahlungsverminderung leichter festzustellen. Da andererseits aber die Chemikalien trotz guter Rauchentwicklung billig sein sollten, griff man zur Verbrennung von Phosphor.\*) Die Vernebelung wurde so durchgeführt, daß man Phosphorstückchen regelmäßig im Gelände verteilte und dann entzündete.

Das zur Verfügung stehende Versuchsfeld lag bei Edgewood am Gumpowder-Fluß, etwa 100 km von Washington entfernt. Es stieß mit der einen Seite an den Fluß, an den anderen drei Seiten war es von Wäldern eingesäumt. Über die Größe des Feldes machen Kimball und McIntire<sup>200)</sup> keine Angaben; auch die Aufstellung der Instrumente ist nicht ganz eindeutig. Zum Zweck der Temperaturmessungen wurden vier Thermometerhütten aufgestellt, von denen jede einen Thermographen, ein Maximum- und ein Minimumthermometer enthielt. Zuvor wurde festgestellt, ob auch die Aufzeichnungen der vier Thermographen nicht wesentlich voneinander abwichen, und so die Eignung des Versuchsgeländes geprüft. Zur Messung der nächtlichen Ausstrahlung wurden zwei Pyrgeometer aufgestellt und zwar so, daß sich das eine außerhalb, das andere unter der Rauchdecke befand. Die Windgeschwindigkeit wurde mit einem Schalenkreuzanemometer ermittelt, die Windrichtung nach dem Zug der Wolken.

In der Nacht vom 9. auf 10. April war der Himmel heiter, die Temperatur sank in den Hütten bis auf  $-1,3$  Grad C. Es war beabsichtigt, die eine Hälfte des Versuchsfeldes zu vernebeln und das übrige Gelände mit den beiden anderen Thermometerhütten zum Vergleich heranzuziehen. Da aber die Windgeschwindigkeit nur etwa 0,5 bis 1 m/sec betrug und der Wind in seiner Richtung dauernd wechselte, gelang dieses Vorhaben nur schwer. Auch war es kaum möglich, das eine Pyrgeometer dauernd im Nebel, das andere dauernd frei von Nebel zu halten. Nur um 4 Uhr 50 morgens gelangen zwei korrespondierende Messungen. Die Ausstrahlung des Pyrgeometers gegen den heiteren Himmel zeigte einen Wärmeverlust von  $0,123 \text{ gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$ , im vernebelten Feld betrug er  $0,074$ . Der durch den Nebel bedingte Ausstrahlungsschutz betrug also 40 %. Zu dieser Zeit lag die Lufttemperatur in der Höhe des Instrumentes bei  $-2,2$  Grad C; die Luft war fast völlig mit Wasserdampf gesättigt.

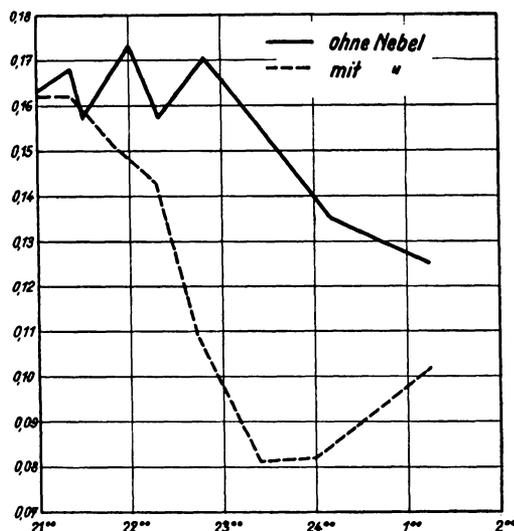


Abb. 65. Ausstrahlung in  $\text{gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$ .

Bei der Durchführung des zweiten Versuches in der Nacht vom 25./26. April war es wolkenlos. Der Wind kam aus N bis NE, seine Geschwindigkeit betrug im Mittel 4 m/sec. Das Temperaturminimum in dieser Nacht lag bei  $+5,0$  Grad C (Hüttenwert). Um 21 Uhr 30 wurde die Vernebelung begonnen und bis 1 Uhr 15 durchgeführt. Den Gang der nächtlichen Ausstrahlung unter der Rauchdecke und außerhalb derselben gibt die Abbildung 65 wieder. Der Effekt der Nebeldecke macht sich in der Herabminderung der Ausstrahlung gut bemerkbar. Zur Zeit der dichtesten Vernebelung betrug die Herabsetzung etwa

50 %. Ein Vergleich der Thermographenkurven der vier Hütten zeigte, daß die Temperatur der Luft außerhalb der Rauchdecke wie unter ihr keinen bemerkenswerten Unterschied aufwies.

In der Nacht vom 1. auf 2. Mai wurde ein dritter Versuch durchgeführt. Gegen 20 Uhr war der Himmel bedeckt, und es fiel leichter Regen. Als dann die Bewölkung aufriß, wurde um 21 Uhr 30 mit der Vernebelung begonnen. Diese wurde bis 02 Uhr 15 unterhalten. Die Windgeschwindigkeit betrug 1,5 bis 2 m/sec. Auf einer 60 Meter langen Front wurden in dieser Zeit ungefähr 800 Pfund weißer Phosphor verbrannt. Die untere Grenze der Wolke lag in Nähe der Feuerstelle etwa 2 Meter hoch, sank dann langsam und lag schließlich dem Boden auf (Abb. 178, Tafel 4). In einer Entfernung von 200 Meter von der Feuerstelle nahm die Dichte des Nebels ab. Da der Himmel häufig bewölkt war, konnten nur wenige Ausstrahlungsmessungen gemacht werden. Aber auch diese wenigen zeigten wieder dieselben Verhältnisse, nämlich daß die Ausstrahlung gegen den klaren Himmel doppelt so intensiv war als die unter der Nebeldecke. Während der Vernebelung trat auf dem geschützten Feld eine, allerdings nur ganz geringfügige, Temperaturerhöhung ein. Die Schlußfolgerung, die Kimball und Mac Intire aus diesen Versuchen ziehen, geht dahin, daß es überhaupt einmal sehr schwierig ist, eine gleichmäßige

\*) Nun entstehen bei der Verbrennung von metallischem Phosphor zu Phosphorpentoxyd ( $2\text{P} + 5\text{O} = \text{P}_2\text{O}_5$ ) nicht weniger als 370 große Kalorien. Es ist demnach eine ungeheure Hitzeentwicklung damit verbunden. Etwas Wärme entsteht gleichfalls noch bei der Anlagerung von Wasser an Phosphorpentoxyd, doch ist diese Wärmemenge unbedeutend gegenüber der Verbrennungswärme des Phosphors.

Nebeldecke über das Gelände zu legen und zu erhalten, und daß man einen rund 50 %igen Ausstrahlungsschutz erzielen kann, was jedoch praktisch keinen nennenswerten Temperatureffekt bedeutet. Daher spielt nach ihrer Ansicht die Einschränkung der nächtlichen Ausstrahlung durch Nebel in der Frostbekämpfung eine ganz unwesentliche Rolle. Was endlich die Kostenfrage betrifft, so haben die beiden Verfasser ihrer Arbeit einige Angaben über den Verbrauch an Phosphor und dessen Preis angefügt (Tabelle 27).

Tabelle 27. Verbrauch an Phosphor in kg je ha zu schützende Fläche und Stunde

Windgeschwindigkeit m/sec	kg weißer Phosphor	Kosten in Dollar
0,5	11,2	7,9
1,1	22,4	15,7
1,7	33,7	23,6

Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß die Handhabung von weißem Phosphor recht gefährlich ist. Aus dieser Aufstellung geht hervor, daß die Kosten der chemischen Vernebelung und Phosphor außerordentlich hoch sind: sie sind weit höher als die Kosten der Geländeheizung mit Öl.

Wir bemerken dazu, daß bei den angeführten Versuchen, die zweifelsohne keine glänzenden Versuchsbedingungen hatten, die Messungen mittels Thermographen in Hütten gemacht wurden. Die Thermometer standen also unter 100 %igem Strahlungsschutz. Wenn auch die Lufttemperatur nicht beeinflusst wurde, was wir auch bei den meisten Räucher- und Bedeckungsversuchen (außer dem Bedecken mit wärmeisolierenden Stoffen) feststellten, so konnten frei aufgestellte Thermometer unter dem Einfluß des Strahlungsschutzes doch höhere Werte anzeigen. Da es aber bei Frostschäden auf die Temperatur der Blätter und nicht auf die der Luft ankommt, ist die völlig ablehnende Stellung der Berichterstatter nicht ohne weiteres als richtig anzuerkennen.

Die Versuchsgesellschaft der norwegischen Moorgesellschaft Maeresmyren führte im Herbst 1928 einen Vernebelungsversuch<sup>108)</sup> durch, bei welchem roter Phosphor verbrannt wurde. Die Versuche hatten keinen besonders großen Umfang, da in der ersten Nacht 10—12 kg roter Phosphor verbrannt wurden, dessen Rauch 500 000—600 000 m<sup>2</sup> bedeckte. Beim zweiten Versuch in der nächsten Nacht wurden 15 kg Phosphor angewendet, die zum Einnebeln von 600 000 m<sup>2</sup> dienten. Foß<sup>108)</sup> folgert aus den Versuchen, daß mit einem Kilogramm rotem Phosphor bei ruhiger Luft 50 000 m<sup>2</sup> mit einer zusammenhängenden Rauchdecke eingenebelt werden können, während man bei bewegter Luft sehr viel mehr braucht, da das Abbrennen die ganze Nacht fortgesetzt werden muß. Nach seinen Angaben waren die Temperaturen an den dicht beräucherten Stellen um 1,5 Grad, an den weniger dicht beräucherten Stellen um 1,2 Grad höher geblieben als im unberäucherten Feld, in welchem die Temperatur von 00 Uhr bis 01 Uhr auf — 1,5 bis — 3,0 Grad zurückging. In der zweiten Versuchsnacht war infolge unruhiger Luft die Rauchdecke sehr unregelmäßig und ein zahlenmäßiges Ergebnis des Erfolges der Beräucherung nicht festzustellen. Foß erwähnt noch, daß an anderen Stellen in Norwegen Phosphornebel Anwendung fanden. Zahlenergebnisse über den Erfolg sind nicht beigefügt. Er erwähnt ferner einen Räucherapparat des Ingenieurs Jernberg in Schweden, nach dessen Angaben mit einem Kilogramm Stoff 3500 m<sup>2</sup> in dichten Rauch gehüllt werden, jedoch hätte die Vorführung ergeben, daß 4 kg in einer Minute verbrannt nur 500 m<sup>2</sup> einräucherten. (Derartige Versuche sind selbstverständlich in hohem Maße vom herrschenden Wind abhängig.) Aus dem einen durchgeführten Versuch in Maeresmyren folgert Foß eine voll ausreichende Wirkung des Phosphornebels als Frostschutzmittel und eine Schadenverhütung bei Frösten bis zu — 4,5 Grad, da ein nennenswerter Schaden an den Kulturpflanzen nicht eintrete, wenn das Minimum nicht unter — 2,5 Grad sinke, und da dem Phosphornebel eine temperaturerhöhende Wirkung von 2 Grad zuzuschreiben sei. Seine aufgestellte Rentabilitätsberechnung ist selbstverständlich bei einer angeblich ausreichenden Menge von 12 kg Phosphor auf 500 000 m<sup>2</sup> äußerst günstig.

##### 5. Kunstnebel aus Nebelsäure.

(Schwefeltrioxyd, SO<sub>3</sub> gelöst in HSO<sub>3</sub>Cl.)

Aus Tarnungsnebeln der Kriegszeit wurde das Verfahren des Schwefeltrioxydnebels in die Reihe der Verfahren zur Frostschadenverhütung übernommen. Während des Krieges wurde Schwefeltrioxyd, das in Chlorsulfonsäure gelöst war, aus Stahlbehältern, die unter starkem Druck standen, versprüht. Schwefeltrioxyd reißt aus der Luft Wasser an sich. Es bildet den Kern außerordentlich feiner Tröpfchen, die zunächst aus Schwefelsäure und

Schwefeltrioxyd, beim Altern der Wolken aus verdünnter Schwefelsäure bestehen. Die Teilchengröße der Nebel ist sehr klein. Das gewöhnliche Filter der Gasmasken wird durchschlagen. Bei dem Blasverfahren, bei welchem die Nebelsäure unter Druck versprüht wird, entstehen allerdings auch dicke Tropfen. Dadurch altert einerseits der Nebel schneller, andererseits kommen in der Umgebung der Blasapparate, wo mehr oder weniger dicke Tropfen der Nebelsäure auftreten, sehr starke Verätzungen der Kulturpflanzen vor.

*a) Prüfung von Nebelsäure auf Pflanzenschädlichkeit.*

Die Minimaxgesellschaft Berlin hatte der Biologischen Reichsanstalt für Land- und Forstwirtschaft das Verfahren im Juni 1929 in Kammersdorf vorgeführt. Zur Erzeugung der Nebel dienten zwei tragbare Apparate von 20 bzw. 8 Liter Inhalt, die zur Herbeiführung des zum Abblasen der Nebel notwendigen Überdruckes komprimierten Stickstoff in kleinen eingebauten Stahlflaschen enthielten. Die Stickstoffflasche wurde beim Inbetriebsetzen des Apparates durch einen Schlagbolzen geöffnet. Um die beim Füllen des Apparates eintretenden Unterbrechungen in der Nebelerzeugung zu vermeiden, wurde später als Nebelquelle ein mit 150 Litern Säuregemisch gefülltes Faß benutzt, das mit einem einfachen Aufsatz zur Regulierung des Nebelstromes versehen und mit einer großen Stickstoffstahlflasche verbunden war. Der Versuch begann 09 Uhr 30 bei 20 Grad Schattentemperatur und einem relativen Feuchtigkeitsgehalt der Luft von 53 %. Ein schwacher Südostwind trieb die Nebelschwaden meistens auf das Versuchsgelände, oft jedoch auch abseits, teilweise auch in die Höhe, so daß in diesen Fällen die Nebel die Reben nicht erreichten. Die größte Dichte zeigte der Nebel in geringer Entfernung von der Nebelquelle (bis zu etwa 30 m) und unmittelbar über dem Boden; weiterhin und in höheren Lagen (von etwa 10 m aufwärts) fand eine Zerteilung und Verdünnung der Nebel statt. Die Nebelschwaden entwichen trotz des sehr schwachen Windes ziemlich schnell, so daß ein ununterbrochenes Nebeln nötig war, um eine Nebeldecke zu erhalten. Insgesamt wurden 240 Liter Säuregemisch verbraucht. Der Versuch wurde um 13 Uhr 30 bei 22 Grad Schattentemperatur und einem relativen Feuchtigkeitsgehalt der Luft von 40 % abgeschlossen. Die Unterbrechung der Vernebelung durch Anfüllen der Apparate mit neuer Säure dauerte etwa insgesamt eine halbe Stunde.

Zwanzig einjährige Reben waren in verschiedenen Entfernungen von der Nebelquelle auf einem mit niedrigem Gras bewachsenen Gelände aufgestellt. In einer Entfernung von 11 m waren die Reben völlig, in einer Entfernung von 25 m noch fast völlig, bis etwa 30 m schwer verbrannt, bis über 40 m erheblich und bis 65 m teilweise verbrannt. Ein Teil der Reben war angefeuchtet, ein Teil trocken. Die angefeuchteten waren stärker verbrannt, während bei den trockenen Reben bei einer Entfernung von 57 m kaum noch Einwirkungen zu verspüren waren.

Das Versuchsergebnis faßte der Berichtsteller folgendermaßen zusammen: „Danach können Reben auch auf freiem Gelände, nicht nur, wie vermutet wurde, im Gewächshaus, durch Säurenebel erheblich beschädigt werden. Die nachteilige Wirkung der Säurenebel auf Reben nimmt bei zunehmender Entfernung der Reben von der Säurequelle gemäß der größeren Verdünnung der Nebel ab. Bei der Bewertung der Versuchsergebnisse wäre wohl zu berücksichtigen, daß die hohe Lufttemperatur die nachteilige Beeinflussung der Reben durch die Nebel gesteigert hat. Immerhin ist aus dem Versuch zu schließen, daß bei der Verwendung der Säurenebel immer mit einer Gefährdung der Pflanzen zu rechnen sein wird.“

Von einer Anwendung des Blasverfahrens als Frostschutzmittel wurde daher abgesehen (Abb. 179, Tafel 4).

An seiner Stelle wurde ein anderes Verfahren angewendet, das zuerst von der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft in Kiel ausgearbeitet war. Die Nebelsäure wurde hierbei nicht mehr versprüht, sondern auf gebrannten Kalk geträufelt, wobei sie unter starker Hitzeentwicklung, die durch die Gipsbildung und die Anlagerung von Wasser entstand, in ganz feiner Form verdampft wurde.

In Versuchen, die das Institut für Klimaforschung in Trier mit trockenen und nassen zweijährigen Reben ausführte, wurden bei normalen Konzentrationen (unter 1 g/m<sup>3</sup>) keine Schäden festgestellt. Einen Versuch über die Schädlichkeit der Nebelsäure bei Anwendung des Kalkverfahrens stellte auch die Biologische Reichsanstalt an. Dem Bericht über den am 20. September 1929 in Kammersdorf durchgeführten Versuch sind folgende Feststellungen zu entnehmen: Das von der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft benutzte Gerät (Abb. 180, Tafel 4) besteht aus einem bockartigen Gestell mit einer etwa 2<sup>1</sup>/<sub>2</sub> m langen und 20 cm breiten, von der Mitte aus in der Längsrichtung nach beiden Seiten zu abfallenden und mit einigen kleinen Löchern versehenen eisernen Rinne, einer am Boden befestigten Hürde aus Drahtgeflecht (etwa 250 cm lang, 30 cm breit und 40 cm hoch) und einem besonderen für das Säurefaß bestimmten, mit zwei Düsen und einem längeren Rohr versehenen Aufsatz. Bei Inbetriebsetzung des Gerätes wird die Hürde mit etwa faustgroßen Kalksteinen beschickt (beim vorliegenden Versuche waren es etwa 300 kg), ein mit 240 Liter Säuregemisch gefülltes Faß auf das Gestell gelegt und das

Faß herumgedreht, so daß aus den Düsen des nunmehr nach unten zeigenden Aufsatzes die Säure in zwei feinen Strahlen auf die Rinne und weiter durch die Rinnenlöcher tropfenweise auf den Kalk fließt. Im wesentlichen handelt es sich um eine neuartige, handliche und einfache Einrichtung des seit langem bekannten Kalkgerätes. Die Dauer der Nebelerzeugung beträgt etwa 5 Stunden. Die Einwirkung der Nebel auf die Reben dauerte  $3\frac{1}{2}$  Stunden bei einer Temperatur zwischen 19,5 und 23 Grad und einer relativen Feuchte zwischen 69 und 45 %. Bis zu einer Entfernung von 40 m wurden an benetzten Reben deutliche Schäden festgestellt und bis zu 25 m fast völlige Vernichtung. Selbst bei einer Entfernung von 75 und 100 m wurden noch einzelne ganz leichte Schäden konstatiert. Bei den trockenen Blättern waren in 11 m Entfernung die Blätter völlig verbrannt, in 25 m teilweise, in 50 m waren sie etwas angerollt und in 100 m Entfernung zeigten sich leicht angetrocknete Blattränder. Es ist demnach auch bei dieser Methode, die einen feiner verteilten Nebel herstellt, wenigstens unter den angegebenen Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen mit Schäden bei Reben zu rechnen.

Die pflanzenpathologische Versuchsstation der Lehr- und Forschungsanstalt für Wein-, Obst- und Gartenbau in Geisenheim (Lüstner) führte am 12. Mai 1928 gleichfalls Versuche durch, in denen Nebelsäure und Bergermischung ausprobt wurden. Die Einwirkung wurde festgestellt auf vier Sorten Reben, Äpfel, Birnen, Kirschen, Pflaumen, Aprikosen und Pfirsichen in Töpfen, außerdem wurden an Gemüse und Zierpflanzen verwendet: Saubohnen, Buschbohnen, Erbsen, Feldsalat, Rotkohl, Blumenkohl, Wirsing, Mangold, Tomaten, Gurken, Spinat, ferner Hortensien, Fuchsien, Geranien. Es wurden zunächst innerhalb 10 Minuten 12 g Nebelsäure, nach etwa 50 Minuten noch einmal 24 g Nebelsäure verdampft; diese Konzentration ließ man eine weitere Stunde einwirken, wonach das Treibhaus gelüftet wurde. Auf den Blüten und an den Glaswänden ließ sich mit Lackmuspapier deutlich eine saure Reaktion nachweisen. Die Pflanzen zeigten jedoch äußerlich keine Veränderungen. Auch nachträglich (Nachprüfung am 31. Mai 1928) wurden keine Schäden festgestellt. Zu bemerken ist noch, daß das Gewächshaus  $42\text{ m}^3$  Inhalt faßte und bei einer Verdampfung von 36 g Nebelsäure die Konzentration demnach rund 0,8 Nebelsubstanz im Kubikmeter betrug.

Die umfangreichsten Versuche über die Schädlichkeit der Säurenebel hat Ext<sup>98, 99)</sup> angestellt. Ext hat

1. Versuche mit einmalig, zu Versuchsbeginn entwickelten Nebeln,
2. Versuche mit strömenden Nebeln und schließlich
3. Versuche mit periodischer Nebelentwicklung gemacht.

Seine Versuchspflanzen waren: Pyrethrum, *Picea excelsa*, *Picea sitkaens.*, *Abies Dougl. viridis*, Rosenblüten, Aster, *Montbretia*, *Pelargonium*, *Levkoja*, *Tropaeol. maj.*, *Fragaria vesca*, *Fuchsia*, *Trifol. prat.*, *Primula abc.*, *Tilia parv.*, *Tilia grand.*, *Carpin. bet.*, *Rosa canina*, *Rosa incana*, *Begonia* und *Hordeum*. Es wurden die unteren Schädlichkeitsgrenzen und die zur Abtötung ausreichenden Tödlichkeitskoeffizienten festgestellt. Die beiden Faktoren Zeit = t und Konzentration = c wurden empirisch stufenweise variiert. In einem Koordinatensystem wurde auf der Abzisse der Faktor „Zeit“ von 100 zu 100 Minuten fortschreitend und auf der Ordinate der Faktor „Konzentration“ von 100 zu 100 mg fortschreitend eingetragen. Die Konzentration wurde nach Haber und Flury in mg des zu prüfenden Stoffes pro Kubikmeter Rauminhalt ausgedrückt. Bei einmalig entwickeltem Nebel kam Ext auf eine tödliche Konzentration  $c \cdot x \cdot t = 300\,000$ , bei strömendem Nebel auf  $c \cdot x \cdot t = 150\,000$ . Er faßt seine Versuchsergebnisse etwa folgendermaßen zusammen: Schwefelsäurenebel ist kein Atmungsgift für Pflanzen, in gewissen Konzentrationen jedoch mehr oder weniger schädigend durch Ätzwirkung. Als besonders säureempfindlich sind die Blätter wasserreicher, sowie rauhbehaarter Pflanzen anzusehen, während Koniferen praktisch ungefährdet sind, da diese hohe Konzentrationen auch lange Zeit hindurch vertragen. Nasse Pflanzen sind leichter zu schädigen, was besonders an den Spitzen von jungem Getreide (Gerste) festgestellt wurde.

Ext steht auf dem Standpunkt, daß bei Vernebelung ein Mindestabstand von 100 m, bei gewissen Pflanzenarten ein noch größerer Abstand von der Nebelquelle geboten erscheint. Er stellt einige Berechnungen an, welche Konzentration in einer Frostschutzwolke vorhanden ist.

Ulrich Müller hatte ein Blaulichtmeßgerät ausgearbeitet, mit dessen Hilfe Konzentrationsbestimmungen der Nebeldichte mit für die Praxis hinreichender Genauigkeit gemacht werden konnten. Dieser Apparat war empirisch geeicht und in Freilandversuchen in Zusammenarbeit mit Kessler in Avelsbach ausprobt worden (siehe S. 106). Es wurden in Abständen von 10—120 m Entfernung von den Nebelquellen normale Konzentrationen von 30 mg je Kubikmeter festgestellt (Februar 1930). Bei Konzentrationen von 60—100 mg im Kubikmeter traten bereits heftige, krampfartige Hustenreize auf. Es ist nach den vielen in der Zwischenzeit stattgefundenen praktischen Versuchen nicht anzunehmen, daß Konzentrationen von 100 mg je Kubikmeter wesentlich überschritten wurden, es sei denn in unmittelbarer Nähe der Nebelquelle.

Kessler und Schanderl haben im September und Oktober 1929 in einem Kellerraum, dessen Inhalt

34 m<sup>3</sup> Luft betrug, Nebelsäure zum Verdampfen gebracht. Bei einer Einwirkung von 50 cm<sup>3</sup> verdampfter Nebelsäure auf nasse und trockene Reben wurden nach halbstündiger Einwirkung keine Schäden festgestellt, außer einer ganz leichten Randspitzenverätzung bei einem Blatt.

In einem weiteren Versuch wurde die Einwirkung von 100 cm<sup>3</sup> nach einstündiger Dauer auf benäßte und trockne Topfreben beobachtet. Die trockenen waren kaum beschädigt, bei den angefeuchteten aber waren fast genau 50 % der Blätter vernichtet. Bei 1½-stündiger Einwirkung in einem neuen Versuch, in welchem wiederum 100 cm<sup>3</sup> Säure im gleichen Luftraum von 34 m<sup>3</sup> verdampft wurden, waren bei den trockenen Blättern die ältesten und derbsten Blätter unbeschädigt. Insgesamt waren dies 20,3 % der Blattflächen. Leicht beschädigt waren 39,6 %, schwer geschädigt 19,4 % und restlos getötet 20,7 %. Insgesamt waren also geschädigt 80 %. Bei den nassen Blättern betrug die Beschädigung unmittelbar nach der Besichtigung 87 %, nach drei Tagen 100 %. Der Umfang des Schadens an den trockenen Blättern hatte sich nicht vergrößert.

In den später folgenden, oft wiederholten praktischen Versuchen in Trier wurden nur in nächster Nähe der Nebelquellen bis zu 15 oder 20 Meter Entfernung Schäden an Reben festgestellt, während Gramineen auch in dieser Entfernung noch nicht beschädigt waren; dagegen waren auch diese unmittelbar um die Nebelbatterie herum vernichtet.

Die Öffentliche Wetterdienststelle Hamburg führte gleichfalls ab Mai 1930 mehrmals Nebelversuche durch und hat in der Praxis weder in Halstenbek an Forstpflanzen noch in anderen Fällen bei Obst Schäden durch die Vernebelung feststellen können. Demnach sind die von Ext gefundenen Ergebnisse durch die Praxis bestätigt, daß nämlich bei entsprechendem Abstand von den Nebelquellen, der praktisch auf 100 Meter zu beziffern ist, Schäden nicht mehr auftreten. Es ergibt sich aber daraus auch ohne weiteres, daß das Verfahren nur anwendbar über großen Flächen ist.

*b) Die Verfahren der Vernebelung mit Nebelsäure und die von den Firmen aufgestellten Kostenberechnungen.*

Das ältere Verfahren der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft, das heute nicht mehr angewendet wird, ist auf Seite 102 beschrieben. Heute wird ein bedeutend handlicheres Gerät benutzt. Es besteht aus einem Kübel, welcher mit gebranntem Kalk gefüllt wird, und einem Nebelsäurefaß, das auf den Kübel gesetzt und beim Beginn der Vernebelung umgekippt wird. Dabei läuft aus Düsen die Nebelsäure in dünnem Strahl auf den Kalk und es entsteht ein Nebel, der besonders bei hoher Luftfeuchtigkeit sehr dicht wird (Abb. 181, Tafel 4). Die Apparate werden in zwei Größen hergestellt mit einem Fassungsvermögen der Nebelfässer von 100 bzw. 30 Liter. Das letztere Gerät ist zum Tragen eingerichtet.

Auch die Minimaxgesellschaft Berlin benutzt heute das gleiche Verfahren. Es unterscheidet sich im Prinzip nicht von dem der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft in Kiel. Schließlich stellt noch die Firma Martini-Hüneke und Salzkotten in Salzkotten i. W. ein Frostschutzgerät her, das auch auf dem Kalkverfahren beruht (Abb. 66). Die Abbildung zeigt die Transportkanne mit der Nebelsäure, die etwa 17 Liter Nebelsäure faßt. Die Abbildung 66a stellt den absperrbaren Auslaufstutzen dar, der nach Beförderung des Apparates zum Verwendungsort — am besten mittels einer Rückentragel — nach Entfernen der Verschlussklappe eingeschraubt wird und mit einem Luftzuführungsrohr versehen ist. Nachdem dies geschehen ist, wird die Blechkanne mit dem Kopf nach unten auf den Bock gesetzt (Abb. 66b), in dessen Unterteil die Büchse mit dem gebrannten Kalk Platz findet.

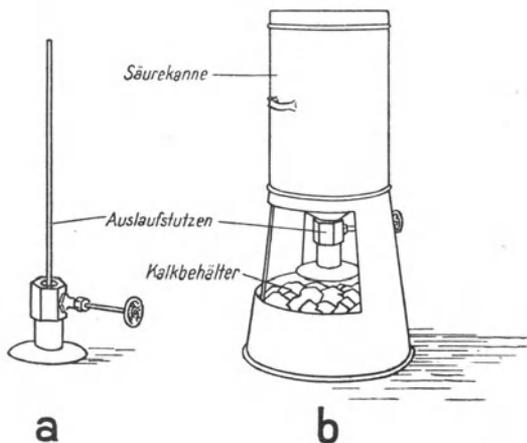


Abb. 66. Nebelsäuregerät der Firma Martini-Hüneke und Salzkotten.

Vorteilhaft ist es selbstverständlich, wenn die Nebelgeräte transportabel sind, da mit einer Änderung der Windrichtung in Frostnächten gerechnet werden muß. Die Apparate der Minimaxgesellschaft und der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft kosten annähernd gleichviel, nämlich rund RM. 48.— je Stück. Das Säurefaß kostet leer für 55 kg Säure bei der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft etwa RM. 14.—. 100 kg gebrannter Kalk (CaO) kosten etwa RM. 3.50. Die Nebelsäure kostet je Kilogramm 20—35 Pfennig (1936).

Die Minimaxgesellschaft gibt an Unkosten für den Betriebsstoff bei einem Areal von einem Hektar zirka RM. 8.—, bei 4 ha (in quadratischer Form) zirka RM. 4.—pro Hektar und bei einem Areal von 900 ha = 3000 m im Quadrat etwa RM. 0.28 pro Hektar an.

Die Hanseatische Apparatebaugesellschaft stellt folgende Unkostenberechnungen auf:

**Annahme I**

3 Frostnächte im Frühjahr und 3 Quadratkilometer gegen Frost zu schützende Fläche (1 km breit und 3 km tief)

**Anschaffungskosten, einmalige**

25 Geräte (da der Abstand voneinander 40 m betragen soll) 25 · 48.—	RM 1200.—
50 Reservefässer (da für jedes Gerät bei drei Frostnächten insgesamt drei Nebelsäurefässer verfügbar sein müssen) 50 · 13.50 . . . . .	„ 675.—
	<u>RM 1875.—</u>

**Unkosten je Frostnacht und 3 km<sup>2</sup>**

Amortisation der Geräte (halten bei guter Behandlung 10 Jahre, also RM 187.50 je Jahr oder RM 62.50 je Frostnacht) . . . . .	RM 62.50
Nebelsäure, je Gerät je ein Faß mit ca. 55 kg Inhalt, 25 · 55 = 1375 kg . . . . .	„ 302.50
Kalk, je Gerät, Inhalt eines Behälters ca. 15 kg, 25 · 15 = 375 kg . . . . .	„ 13 15
Arbeitslohn, 4 Mann für 25 Geräte, wobei damit gerechnet ist, daß die Geräte evtl. umgestellt werden müssen. Abtransport = 8 Stunden Bedienung in der Nacht = 8 Stunden 4 · 16 = 64 Stunden . . . . .	„ 32.—
	<u>RM 410.15</u>

**Unkosten je Frostnacht und 1 km<sup>2</sup> . . . . . RM 136.70**

Bei der Annahme: 3 Frostnächte im Frühjahr und 3 km <sup>2</sup> Fläche ergeben sich Unkosten je Frostnacht und 1 km <sup>2</sup> . . . . .	RM 136.70
Da 1 km <sup>2</sup> = 100 ha und 1 ha = 4 Morgen sind, so betragen die Kosten für den ha . . . . .	„ 1.37
für den Morgen . . . . .	RM —.34

**Annahme II**

3 Frostnächte im Frühjahr und 1/4 Quadratkilometer gegen Frost zu schützende Fläche (500 m breit und 500 m tief)

**Anschaffungskosten, einmalige**

12 vollständige Geräte zu RM 50.— . . . . .	RM 600.—
24 Reservefässer zu RM 13.50 . . . . .	„ 324.—
	<u>RM 924.—</u>

**Unkosten je Frostnacht**

Amortisation im Jahr RM 92.40, je Frostnacht . . . . .	RM 30.80
Nebelsäure 12 · 55 = 660 kg . . . . .	„ 145.20
Kalk 12 · 15 = 180 kg . . . . .	„ 6.30
Arbeitslohn 2 Mann 16 Stunden = 32 Stunden . . . . .	„ 16.—
	<u>RM 198.30</u>

**Unkosten je Frostnacht und 1/4 km<sup>2</sup> . . . . . RM 198.30**

Da 1/4 km <sup>2</sup> = 25 ha und 1 ha = 4 Morgen sind, so betragen die Kosten für den ha . . . . .	„ 7.95
für den Morgen . . . . .	„ 2.—

Diese Idealfälle treffen jedoch nicht ein. Wir können nicht damit rechnen, daß das zu schützende Feld gerade z. B. die wünschenswerte Form 1 km Breite und 3 km Tiefe hat. Wir können auch nicht damit rechnen, daß sich die Verteilung der Nebelwolke in der idealen Form abspielt, daß nämlich die Windrichtung völlig konstant bleibt, und daß die Nebelwolke die einmal eingeschlagene Richtung beibehält. Aber auch dann, wenn wir mit dem doppelten und dreifachen Einsatz an Geräten rechnen, ist über großen Flächen die Vernebelung zweifelsohne das billigste Verfahren. Voraussetzung ist, daß man entsprechend wieder die Unkosten auf die Nutzfläche verteilen lassen kann, nicht aber, daß zwischen den zu schützenden Obstflächen Wiesen, Felder oder Unland liegen, für die der Schutz nicht nötig war und deren Besitzer sich wohl kaum an den Kosten beteiligen.

### 6. Versuche mit Nebelsäure an Mosel und Saar.

Die Vernebelung kann ebenso wie das Frosträuchern nur dort zu einem Erfolg führen, wo die Frostentstehungsgebiete selbst erfaßt werden. In ebenem Gelände ist Frostentstehungsgebiet und Frostschadengebiet etwa gleich zu setzen, wenn es auch nirgends ein völlig ebenes Gelände und völlig ruhige Luft in Frostnächten gibt.

Im allgemeinen bleibt über ebenem Gelände die Kaltluftschicht ziemlich stabil liegen. Wenn über ein solches Gelände als Ersatz für die in der Frostnacht fehlende Wolkendecke eine künstliche Wolkendecke gelegt wird, so wird zwangsläufig die Abstrahlung von Wärmeenergie seitens der Bodenoberfläche geringer. Die aus dem Erdinneren nachrückende Wärme reicht aus, um den geringer gewordenen Wärmeverlust der Erdoberfläche zu ersetzen. Es bleibt dann die Erdoberfläche wärmer und auch die damit in Verbindung stehende unterste Luftschicht. Anders ist der Fall gelagert, wenn wir hängiges Gelände vor uns haben. In diesem Fall ist das Frostschadengebiet nur in geringem Maß gleichzeitig Frostentstehungsgebiet. Die eigentlichen Frostentstehungsgebiete liegen mehr oder weniger weit ab, und das gesamte Einzugsgebiet eines Tales wirkt als Frostentstehungsgebiet. Die in allen Tälern in klaren Nächten auftretenden nächtlichen Fallwinde lassen es von vorneherein als unmöglich erscheinen, erfolgreichen Frostschutz mit Vernebelung in Frostschadengebieten zu versuchen, welche unter dem Einfluß stärkerer Kaltluftströme (Fallwind) liegen. Es scheiden demnach bei der Vernebelung alle Flächen aus, bei welchen erhebliche Fallwinde auftreten.

Kessler's Versuche beschränkten sich von vorneherein auf zwei Fälle, in denen die Anwendung möglich war, nämlich

1. auf Versuche in ebenem Gelände und
2. auf Versuche in hängigem Gelände, bei welchem nur ganz schwache Fallwinde auftraten und das Einzugsgebiet des Fallwindes sehr klein war.

Die ersten Vernebelungsversuche wurden in den Jahren 1930 und 1931 zu den verschiedensten Jahreszeiten, darunter auch im Winter bei Schneedecke, durchgeführt. Als Versuchsfläche diente vorwiegend das Gelände des Avelertales, das an anderer Stelle eingehend beschrieben ist (S. 120). Die Versuche im Avelertal führten nicht zum gewünschten Erfolg. Der nicht sehr mächtige Fallwind führte die entstehenden Nebelschwaden mit sich und nur an den Stellen, an denen das Tal verstopft war, sammelten sie sich stärker an. Aber auch dort wurde eine Temperaturerhöhung nicht gemessen, weil sich unter die Nebeldecke die Kaltluft aus den ungeschützten Frostentstehungsgebieten schob. Immerhin haben diese Versuche wertvolle Aufklärungen über das Strömen der nächtlichen Kaltluft geliefert, da die Nebel sich als ausgezeichnete Luftfärbungsmittel bewährten. Gleichzeitig probten wir bei diesen Versuchen das Blaulichtgerät von U. Müller aus, das er für Konzentrationsmessungen in der Nebelwolke hergestellt hatte. Es bestand aus einer blauen Lampe, die mit konstant gehaltenem Strom aus einer Batterie gespeist wurde; aus der Entfernung, in welcher das blaue Licht soeben verschwand, ließ sich die Konzentration der Nebelwolke ermitteln. Das Instrument war vordem in einem schmalen und sehr langen Raum geeicht worden, in welchem genau dosierte Mengen von Nebelsäure verdampft worden waren.

Außerdem wurde in diesen Versuchen die Frage nach der pflanzenschädigenden Wirkung der Nebelsäure zu beantworten versucht (siehe S. 104).

#### a) Nebelsäureversuch bei Saarstein.

Nach verschiedenen Vorversuchen über die Stärke und das Abfließen der nächtlichen Kaltluft im Versuchsgelände wurde in der Nacht vom 15./16. Oktober 1931 bei dem Weingut Saarstein in der Nähe von Serrig an der Saar der Versuch durchgeführt, einen Frostschutz über einem Gelände zu erzielen, in welchem ein schwacher Fallwind herrscht und die Frostentstehungsgebiete nicht sehr groß sind. Im vorliegenden Fall war das gesamte Einzugsgebiet des Tälchens, aus welchem Kaltluft abfließen konnte, nicht größer als 2 km<sup>2</sup>. Es muß allerdings bemerkt werden, daß etwa die Hälfte des Einzugsgebietes mit einer Bodendecke versehen war, welche nach unserer Erfahrung ungewöhnlich viel Kaltluft liefert, nämlich Niederwald mit verfilzter Grasnarbe. Die andere Hälfte des Entstehungsgebietes war mit trockenen Wiesen und Feldern bestanden.

Die Saar fließt wenige hundert Meter von Saarstein in der Richtung von Süd nach Nord. Die Höhe des Wasserspiegels über NN beträgt 150 m. Vom östlichen Ufer der Saar erstreckt sich etwa 1800 m aufwärts in vorwiegend nordöstlicher Richtung das Tälchen. Die höchste Höhe des Einzugsgebietes kommt fast an 400 m heran.

Auf dem steilen Südosthang am unteren Ende des Tälchens liegt das Weingut Saarstein mit etwa 5 ha Größe (Abb. 182, Tafel 5). Der gegenüberliegende Nordwesthang weist eine wesentlich geringere Steigung auf. Unten an diesem Hang, also nicht auf der Talsohle, verläuft der Saarsteiner Bach, der früher einmal zum Antrieb einer Mühle gedient hat.

Etwa 300 m östlich der obersten Weinbergsecke liegt ein Plateau mit einer Straßenkreuzung in 270 m Meereshöhe; oberhalb des Plateaus steigt das Gelände sanft an. An dieser Stelle ist der Boden frei von Wald. Auch im südlichen Teil des Versuchsgeländes befindet sich ein kleiner Höhenrücken ohne Wald, der teils mit Wiesen und Äckern, teils, nach dem Saartal hin, auch mit einigen Weinbergen bedeckt ist.

Im nördlichen Teil des Versuchsgeländes, an den größten Saarsteiner Weinberg angrenzend, stand früher ein sehr alter Eichenhochwald, der zu dem staatlichen Kammerforst gehörte. Dieser wurde während des Ruhrkampfes von den Franzosen abgeholzt. Im Jahre 1931, in welchem die ersten großen Vernebelungsversuche durchgeführt wurden, stand an dieser Stelle nur niedriger Buschwald, der große Lücken aufwies, die auf der Flugzeugaufnahme zu erkennen sind (Abb. 182, Tafel 5). Leider kann man auf dem Bild die Wegkreuzung, an der die Nebelgeräte standen, nicht mehr erkennen. Die Bäume auf der Talsohle und am rechten Hang waren zur Zeit des Versuches nicht mehr vorhanden. Von der Saar aus (Abb. 183, Tafel 5) sieht man das Vorgelände des Tälchens und hat eine Vorstellung vom Profil des Tales.

Wir wußten aus den Vorversuchen, daß ein schwacher nächtlicher Fallwind durch das Tälchen nach der Saar hinzieht. Deshalb wurden die Vernebelungsgeräte einige hundert Meter oberhalb des Weingutes auf den Ort gestellt, an welchem der Bach den Weg kreuzt. Der schwache Fallwind sollte die Nebelwolken mitnehmen und das Tal einhüllen. Verwendet wurden fünf Nebelfässer, die uns die Hanscatische Apparatebaugesellschaft zur Verfügung gestellt hatte. Die Nebelsäure in 200-kg-Fässern lieferte die Fahlberg-List A.-G. Magdeburg. Verbraucht wurden in vier Stunden rund 500 kg Nebelsäure. Das Verfahren ist an anderer Stelle beschrieben (Seite 104).

Zunächst wurden sechs Hauptstationen mit je vier Minimumthermometern in Höhen von 5, 25, 50 und 150 cm aufgestellt (Abb. 67). Station I stand an der Wegkreuzung auf dem Plateau, also an der Stelle, wo der Einbruch der Kaltluft hauptsächlich zu erwarten war. Station II befand sich in 150 m Entfernung von I talabwärts am Bachufer. Station III stand mehr im mittleren Teil des Tallaufes am unteren NW-Hang gegenüber dem Ostrand des Weingutes Saarstein. Station IV vermittelte die Temperaturen über dem Wiesengrund am Ausgang des Tälchens. Station V stand unmittelbar am Saarufer in der Nähe der Mündung des Saarsteiner Baches. Station VI befand sich im oberen Weinbergshang neben der 2 m hohen Hütte mit den Thermometern der meteorologischen Station Saarstein.

Außer diesen gestaffelten Thermometern waren noch zahlreiche Temperaturmeßstellen in 50 cm Bodenabstand nach Maßgabe des Lageplanes über das engere Versuchsgelände verteilt. So stand ein Thermometer oberhalb der Wegkreuzung, ein anderes am Rand des Buschwaldes, mehrere Thermometer befanden sich auf dem Nordwesthang, einige Thermometer am Talausgang; eine Reihe von Meßstellen liefen den steilen Weinbergshang hinauf an der meteorologischen Station vorbei, und schließlich war eine Kette von über 20 Thermometern in der Mitte des Tallaufes über das ganze Profil ausgestreckt.

An der alten Mühle war auf einem hohen Weinbergspfahl der Geber eines Ångström'schen Pyrgeometers aufgestellt, während der Empfänger in Form eines Galvanometers und die elektrische Kompensationsvorrichtung in einem Raum der Mühle untergebracht werden konnten. An einem zweiten Weinbergspfahl neben dem Pyrgeometer war ein Åßmann'sches Aspirationspsychrometer aufgehängt. Knapp 100 m von der Mühle talabwärts war eine Windmeßstation eingerichtet. Auf vier Pfählen mit 25, 50, 100 und 200 cm hohen Enden waren vier Zählannometer angebracht, welche den Windweg angaben. Am Talausgang wurde von Zeit zu Zeit durch Entnahme von Proben die Wassertemperatur des Baches gemessen. In gleicher Weise wurde am Saarufer die Temperatur der obersten Wasserschicht des Flusses in gewissen Zeitabschnitten ermittelt. Die Temperatur des Bachwassers ging von 21 Uhr bis 04 Uhr von 8,0 Grad auf 7,4 Grad und die des Oberflächenwassers der kräftig strömenden Saar von 12,0 Grad auf 10,8 Grad zurück.

Die Witterung vor der Versuchsnacht deutete auf eine starke nächtliche Abkühlung hin. Am Morgen des 15. Oktober war der Einfluß eines kräftigen Hochdruckgebietes vorherrschend, dessen Kern über England lag. Die Wetterkarte ließ eine Verlagerung des Hochs nach Osten hin erkennen, wobei der Zustrom polarmaritimer Luftmassen bei uns zum Stillstand kommen mußte. Somit konnte eine klare Nacht mit guter Ausstrahlung und wegen allgemeiner Lufttrockenheit auch mit geringer Neigung zu Nebelbildung erwartet werden.

Unmittelbar nach der ersten Temperaturablesung wurde um 21 Uhr 03 mit der Vernebelung begonnen. Die ersten Schwaden kamen um 21 Uhr 10 am Spritzbehälter in der Nähe des Wirtschaftsgebäudes am oberen Ende des Weinbergs an.

Um 21 Uhr 30 war mit der abgehobenen Warmluft des Tales im angrenzenden Buschwald zu den Höhen zurückkehrender Nebel und nur dünner Nebel über dem Haus zu beobachten, während der NW-Hang und das Tälchen selbst nur geringe Spuren aufwiesen. Später war dann ein Zug aus dem Saarsteiner Tälchen saarabwärts festzustellen, während in größerer Höhe gleichzeitig eine Bewegung in Richtung auf den Hang beobachtet werden

konnte. Um 22 Uhr war der im Südwesten gelegene, 2 km entfernte Ort Serrig vollständig eingenebelt. Über dem Wasser der Saar schien nach Beobachtungen von oben zeitweise kein Nebel zu liegen. Dieser floß vielmehr auf beiden Seiten des Flusses zwischen Ufer und Hang talabwärts; um 22 Uhr 15 herrschte vorübergehend an der

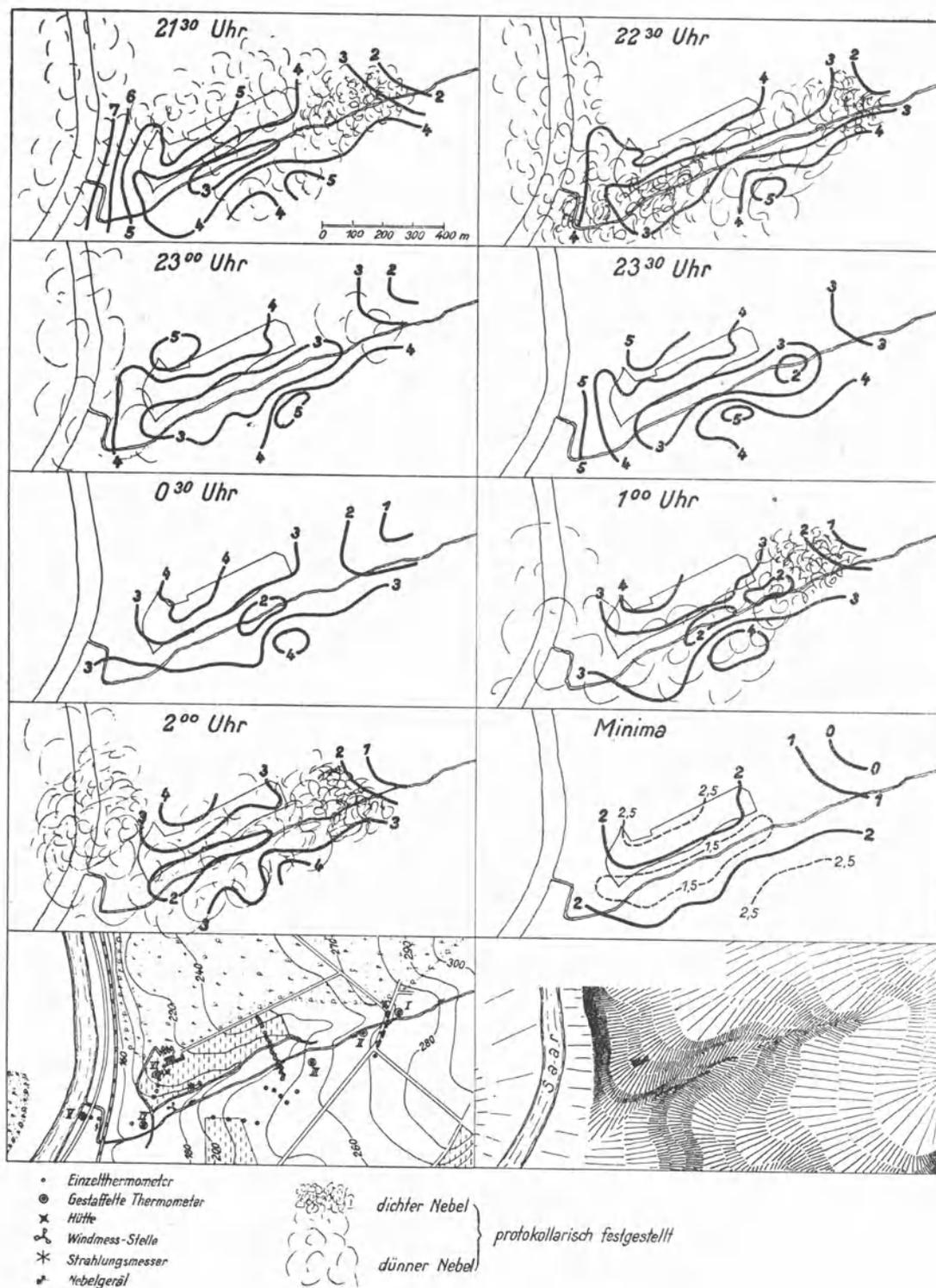


Abb. 67. Nebelversuch Saarstein. 15./16. X. 1931.

Vernebelungsstelle ein Abwind von fast 3 m/sec. Man konnte in gewissen Abständen von mehreren Minuten bis zu einer Viertelstunde ein Anschwellen des Fallwindes bemerken, als ob aus dem Gelände des Buschwaldes sich gelegentlich ein kleiner Luftkörper ablöste und ins Tal abrutschte. Bei zeitweiligem Hochschießen der Nebelwolke infolge der Überhitzung des Kalkes geriet dieselbe in einen leichten, talaufwärts gerichteten Luftstrom. Es war auch

bei diesem Versuch die typische nächtliche Luftzirkulation deutlich zu sehen. Während in der bodennahen Luftschicht der Wind talabwärts stand, stand er in 10 bis 20 m Höhe talauf. Um 22 Uhr 30 war der Nebel über der ganzen Saar verbreitet. Die Lichter von Serrig waren um diese Zeit nicht mehr zu erkennen, wohl aber die des nördlich gelegenen Saarburs. Um 22 Uhr 55 wurde die Vernebelung für  $1\frac{1}{2}$  Stunden unterbrochen.

Um 23 Uhr 10 war der Nebel nach den vorliegenden Protokollen überall sehr dünn. Der bewegliche Beobachter auf den Höhen über dem Weingut notierte, daß der Wald zwischen Saarstein und Beurig Nebel hatte, während Beurig und Saarburg selbst nebelfrei waren. Im Nordosten war schwache, mittelhohe Bewölkung zu erkennen. Um 23 Uhr 30 lag der Nebel nur noch dünn über der Talsohle. Alle Lichter waren deutlich zu sehen, auch die Saar selbst trat trotz fehlenden Mondlichts klar in Erscheinung. Dünne Nebelballen erreichten gegen Saarburg eine Höhe von etwa 50 m über den Kuppen. Um Mitternacht lag nur noch schwacher Dunst über dem Saartal.

Während des bisherigen Verlaufs war der Himmel fast wolkenlos. In Bezug auf die Luftbewegung konnten nur lokale Winde festgestellt werden.

Um 00 Uhr 35 wurde erneut mit der Vernebelung begonnen. Zu dieser Zeit herrschte schwacher Dunst über dem Saartal, während das übrige Gelände frei war. Um 01 Uhr 00 zog der künstliche Nebel in der Hauptsache über die Domänenfelder auf dem gegenüberliegenden Nordwesthang nach Saarfels oberhalb Serrig. Nur ein geringer Teil nahm den Weg durch das Saarsteiner Tälchen. Erst um 01 Uhr 30 war das Saartal wieder in starken Nebel gehüllt. Bei Saarstein reichte der Nebel noch bis zur halben Höhe des Berges. Darüber war alles frei. Es gelang also nicht, den eigentlichen Weinberg unter eine Nebeldecke zu legen. Das Tälchen und das Haupttal waren leicht einzunebeln. In letzterem hielt sich der Nebel besonders gut, als die Fallwinde schwächer geworden und nicht mehr soviel Warmluft unten abgehoben wurde.

Unter Verwendung der halbstündlichen Temperaturablesungen an den 50 cm hohen ungeschützten Thermometern (Instrumentaltemperaturen!) wurden viertelstündlich Isothermenkarten gezeichnet, von denen die wesentlichen hier beschrieben werden sollen.

Um 21 Uhr 30 (Abb. 67), kurz nach Beginn der Vernebelung, ist der Flachhang oberhalb der Wegkreuzung, dem Aufstellungsort der Nebelgeräte, die kälteste Stelle mit Temperaturen unter  $+2$  Grad. Auf der Talsohle des mittleren Tallaufes liegt eine langgestreckte Kälteinsel von unter 3 Grad. Hangaufwärts steigt von dieser Stelle aus die Temperatur nach beiden Seiten hin an. Insbesondere fällt der Weinbergshang durch seine Wärme auf. Die im Buschwald über dem Weinberg anfallende Kaltluft kann nur auf der Ostseite ins Tälchen oder auf der Westseite ins Saartal abfließen, da sie gegen den eigentlichen Weinbergshang durch eine Mauer abgeriegelt ist. Am Ausgang des Tälchens gegen die Saar beträgt die Lufttemperatur noch 6—7 Grad. Zu Beginn der Nacht hat sich also der Fallwind noch nicht so weit durchgesetzt, daß er bis zum Flußufer die Warmluft verdrängt hat. Später, nach Mitternacht, seher wir den Kaltluftstrom am Boden zum Saarufer vorstoßen.

Um 22 Uhr 30 ist die Abkühlung im Tälchen von dem hoch gelegenen Plateau her schon wesentlich weiter vorgetrieben. Eine Kaltluftzunge zwischen 2 und 3 Grad erstreckt sich von der Wegkreuzung bis an den Ausgang des Tälchens. Dort ist auch eine Ausbuchtung der Kaltluft saarabwärts zu erkennen. Von einer temperaturanhaltenden Wirkung des um diese Zeit über verschiedenen Teilen des Versuchsgeländes liegenden Nebels ist nichts zu verspüren.

Um 23 Uhr 00, unmittelbar nach der erstmaligen Abstellung der Vernebelung, aber nach fast zweistündiger Wirkung des künstlichen Nebels, lösen sich die von oben und von unten kommenden 3-Grad-Isothermen im oberen Verlauf des Tälchens wieder voneinander ab, was eine geringe Erwärmung um einige Zehntel Grad bedeutet. Gleichzeitig konnte im Tal fast Luftruhe beobachtet werden.

Alle Isothermen zeigen die merkwürdige Erscheinung, daß die Achse der Kaltluftzunge mit der Talachse nicht zusammenfällt, sondern gegen den Nordwesthang verschoben ist. Im großen und ganzen kommt die Achse der Kaltluft mit dem Bachlauf zusammen zu liegen. Dies mag zum Teil darauf beruhen, daß der Nordwesthang wesentlich flacher ist, zum Teil aber auch darauf, daß die Kaltluft über dem Bachbett den günstigsten Abfluß mit verhältnismäßig geringer Reibung erfährt (vgl. auch Abb. 69).

Um 23 Uhr 30 (Abb. 67) verschärfen sich die Gegensätze etwas, ohne daß das Gesamtbild wesentlich geändert wird. Im oberen Teil des Tälchens erfolgt weitere Abkühlung, im Saartal leichte Erwärmung.

Um 00 Uhr 30, zu welcher Zeit ein Auffrischen des Fallwindes beobachtet wurde, deuten auch die Isothermen auf ein stärkeres Strömen hin. Die Kaltluft stößt jetzt bis zur Saar durch.

Die Karten von 01 Uhr 00 und von 02 Uhr 00, zu welchen Zeiten wieder größere Teile des Versuchsfeldes eingenebelt waren, lassen keine Wirkung des Nebels erkennen. Diese müßte sich in einem Ausgleich der Temperaturen zeigen, wenn der Nebel vorwiegend im Tal lag, oder umgekehrt in einer Steigerung der Gegensätze, wenn der Nebel hauptsächlich die Hänge überzog.

Schließlich gibt die letzte Isothermenkarte (Abb. 67) ein Bild von der Verteilung der am nächsten Morgen abgelesenen tiefsten Werte. Auf dem Plateau wurde der Nullpunkt eben unterschritten, während die oberen Hanglagen Minima von + 2,5 bis + 3,0 Grad hatten (50 cm Bodenabstand).

Geben die Isothermenkarten eine Vorstellung von der räumlichen Verteilung der Temperaturen, so sollen die folgenden Diagramme den zeitlichen Temperaturverlauf an den verschiedenen Stellen veranschaulichen.

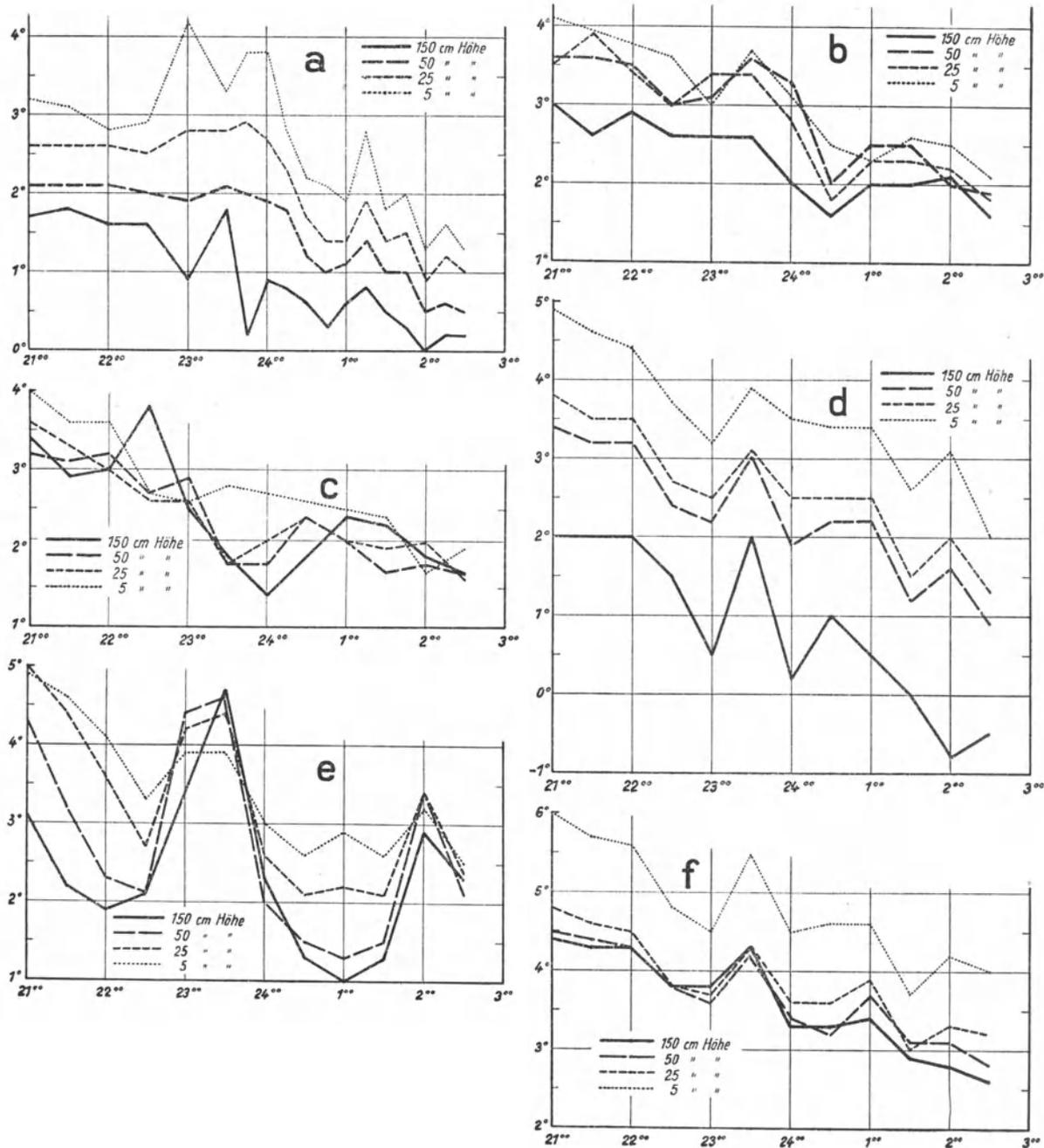


Abb. 68. Temperaturverlauf in vier verschiedenen Höhen beim Nebelversuch Saarstein (15./16. X. 1931).

- a) An Station I (Plateau oberhalb der Nebelgebiete) im Entstehungsgebiet der Kaltluft.
- b) An Station II (Bach oben) im stärksten Fallwind.
- c) An Station III (Talmatte) im Fallwind am unteren Weinbergsrand.
- d) An Station IV (Talausgang) im Austritt des Fallwindes in das breite Saartal.
- e) An Station V (Saarufer).
- f) An Station VI (oberer Weinbergsweg).

Betrachten wir zunächst die an den vier verschiedenen Höhen der Station I (Plateau) oberhalb der Nebelgeräte gewonnenen Temperaturwerte (Abb. 68a), so tritt uns als erstes eine starke Veränderung der Temperatur mit der Höhe entgegen; in Bodennähe finden wir die tiefsten Temperaturen, während nach oben hin wärmere

Luftschichten liegen. Auffallend ist der besonders in 150 cm Höhe beobachtete zweimalige Temperaturanstieg um 23 Uhr 00 und um 01 Uhr 15. Der erste ist wohl auf vorübergehende Neigung zu Wolkenbildung, der zweite auf ein gelegentliches Zurückfluten des Kunstnebels zurückzuführen.

Die Stationen II und III im oberen Tallauf (Abb. 68b und 68c) verraten eine auffallende Gleichförmigkeit im Verlauf ihrer Temperaturen. Hier macht sich die wirbelartige Durchmischung bei dem kräftigen Abströmen der Kaltluft bemerkbar. Nennenswerte Schichtung der Luft besteht im Gegensatz zu der Station im Kaltluftentstehungsgebiet oder zu der im Saartal mit seiner geringen Luftbewegung nicht. Einzig das tiefe Thermometer in 5 cm Bodenabstand zeigt tiefere Temperaturen, da es weniger von der wärmeaustauschenden Wirkung des Fallwindes betroffen wird. Unmittelbar am Boden wird die Luftbewegung durch Reibung erheblich abgebremst. Während die anderen Thermometer durch die Ventilation des Fallwindes annähernd Lufttemperatur zeigen, hat das unterste Thermometer bei geringer Ventilation etwas Untertemperatur gegen Luft. Hat der Fallwind eine gewisse Stärke erreicht, so tritt an den Stationen mit den trägen Glasthermometern keine Temperaturschichtung mehr auf; in unserem Fall schwoll der Fallwind zeitweise bis auf 3 m/sec an.

Der Temperaturverlauf an den Stationen II und III, die stets bei der Vernebelung von Nebel überflutet waren, läßt ebensowenig wie die Isothermenkarte eine Wirkung des Nebels erkennen.

Zwischen den äußersten Thermometern der Station IV am Talausgang (Abb. 68d) treten noch größere Unterschiede auf als bei I. Zwischen 5 cm und 150 cm Höhe stellen sich zeitweise Differenzen von fast 4 Grad ein. Das bodennahe Thermometer erreicht um 02 Uhr 00 eine Temperatur von  $-0,8$  Grad, während das höchste verhältnismäßig warm bleibt. Die beiden mittleren Thermometer zeigen fast keine Unterschiede.

Die allgemeine Temperaturerhöhung um 23 Uhr 30 ist bei Nebelfreiheit eingetreten und dürfte wie bei I und IV auf verstärkte Gegenstrahlung der Atmosphäre infolge Auftretens von etwas mehr Bewölkung zurückzuführen sein.

Ein deutlicher Einfluß des Nebels ist einzig und allein aus den Temperaturen der Station V am Saarufer ersichtlich (Abb. 68e).

Anfangs liegen die vier Temperaturkurven in ähnlicher Weise übereinander wie bei Station IV, nur nicht so weit auseinander. Kurz nachdem aber eine geschlossene Nebeldecke über der Saar beobachtet wurde, steigen die Kurven ab 22 Uhr 30 steil an, um eine Stunde später das Maximum zu erreichen. Zu diesem Zeitpunkt liegen die Kurven in umgekehrter Folge übereinander, d. h. das Thermometer unmittelbar am Boden (5 cm Höhe) zeigt den höchsten Wert. Nach Verflüchtigung des Nebels sinken die Temperaturen rasch wieder auf ihren natürlichen Stand, um nach dem Wirksamwerden der zweiten Vernebelung gegen 02 Uhr 00 ein zweites Maximum mit teilweiser Umkehr anzunehmen.

Nach diesem Kurvenbild kann auf einen Effekt des Nebels in unmittelbarer Bodennähe von rund 2 Grad geschlossen werden. Dieser ist mit dem Rückgang der Ausstrahlung und dem zur Erwärmung der unteren Schicht nutzbar gemachten Wärmenachschub zu erklären. Es war jedoch hier nicht der Kunstnebel allein, sondern es wurde auch offenbar durch die Schwebeteilchen des Kunstnebels ein natürlicher Nebel mit ausgelöst (demnach vermutlich Fall d auf Seite 97).

Die wärmste Station ist naturgemäß die Station VI im oberen Weinberg (Abb. 68f). Ihre drei bodennahen Thermometer zeigen fast gleiche Temperatur und sinken von 4,5 Grad zu Beginn des Versuchs nur auf 3 Grad. Die Temperaturen in 150 cm Höhe bewegen sich mit einem Abstand von etwa 1 Grad über den Temperaturen der drei anderen Thermometer. Die Station hat im Gegensatz zu Station III (unterer Weinbergshang) die typische Lage einer frostarmen Station. Sie wird weder von einem Fallwind berührt, noch taucht sie in einen Kaltluftsee ein. Die auf der Fläche selbst am Erdboden entstehende Kaltluft kann infolge der steilen Geländegestaltung ungestört nach unten abfließen. Die gleitende Kaltluft des Steilhanges ist hinreichend durchmischt, so daß bis zu einer Höhe von etwa 1 m vom Boden gleichartige Temperaturen an den Thermometern festgestellt werden. Lediglich in etwas größerer Höhe, etwa ab 1,50 m, ist es deutlich wärmer, wenn auch die Temperaturdifferenzen keine allzugroßen Beträge annehmen. Von unbedeutenden Ausnahmen abgesehen, ist die Station VI während des ganzen Versuchs nebelfrei. Auch hier sind im Verlauf keine Nebelwirkungen zu sehen, dagegen kommt der Temperaturanstieg als Folge aufkommender Bewölkung vorübergehend ein wenig zur Geltung.

Das für den mittleren Tallauf gewonnene Temperaturprofil (Abb. 69) zeigt ein ähnliches Bild wie der Querschnitt des Tales. Es unterscheidet sich von diesem jedoch wesentlich darin, daß die tiefste Zahl nach dem flachen Nordwesthang hin verlagert erscheint und daß der schwache Temperaturanstieg dem Steilhang, der steile Temperaturanstieg aber dem Flachhang entspricht. Die Verlagerung des tiefsten Temperaturpunktes gegen den Nordwesthang wurde bei Betrachtung der Isothermenkarte bereits besprochen. Sie ist wohl darauf zurückzuführen, daß auf der Talsohle und am Steilhang der Fallwind glatteren Abfluß hat. Läßt der Fallwind nach, so kommt die Temperaturschichtung über dem flachen Nordwesthang noch stärker zur Geltung. Um 23 Uhr 30 dagegen wird

der Fallwind stärker und die Schichtung der Luft undeutlicher. Nebelwirkungen lassen sich jedenfalls auch hier nicht feststellen.

In Abbildung 70 sind die an den vier verschiedenen hohen Zählern am Ausgang des Tälchens gemessenen Windgeschwindigkeiten dargestellt. Es handelt sich hier um Mittelwerte über Zeitintervalle von der Größen-

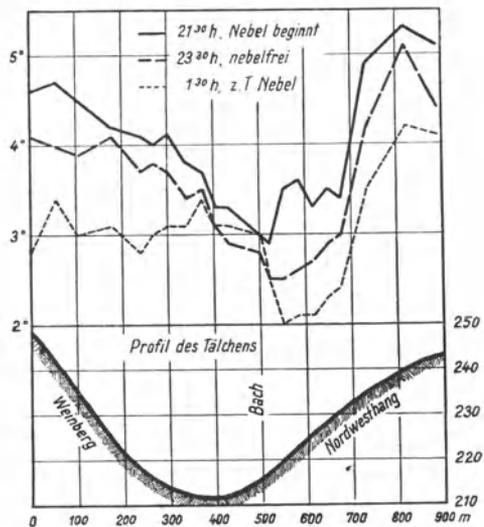


Abb. 69. Temperaturprofil des Tales in 50 cm Höhe.

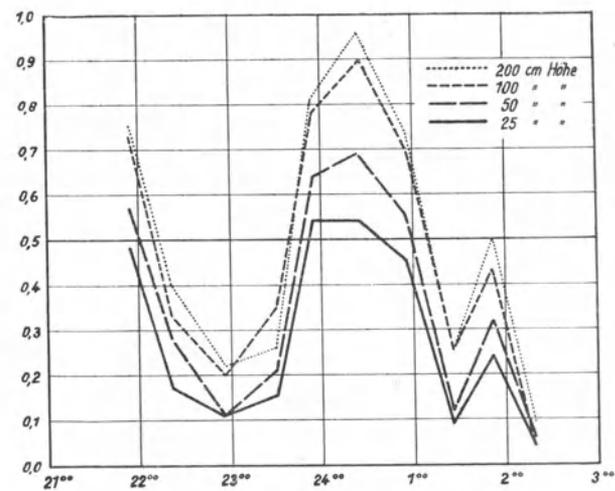


Abb. 70. Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen über dem Boden der Talsohle am Talausgang.

ordnung einer viertel bis einer halben Stunde. Im allgemeinen sind die kleinsten Geschwindigkeiten wegen der größeren Reibung in Bodennähe zu finden. Das Anemometer in 2 m Höhe erreicht einen höchsten Mittelwert von knapp 1 m/sec. Die geringste Strömung konnte gegen 23 Uhr 00 und 01 Uhr 20 festgestellt werden, während gegen 0 Uhr 20 der Fallwind am lebhaftesten wehte. Ein zweites Maximum trat vor 02 Uhr 00 auf.

Die in der Nähe der Mühle gemessene Ausstrahlung, Lufttemperatur und absolute Luftfeuchte sind in Abbildung 71 übereinander dargestellt. Etwa 20 Minuten nach Beginn der Vernebelung macht sich ein deutlicher

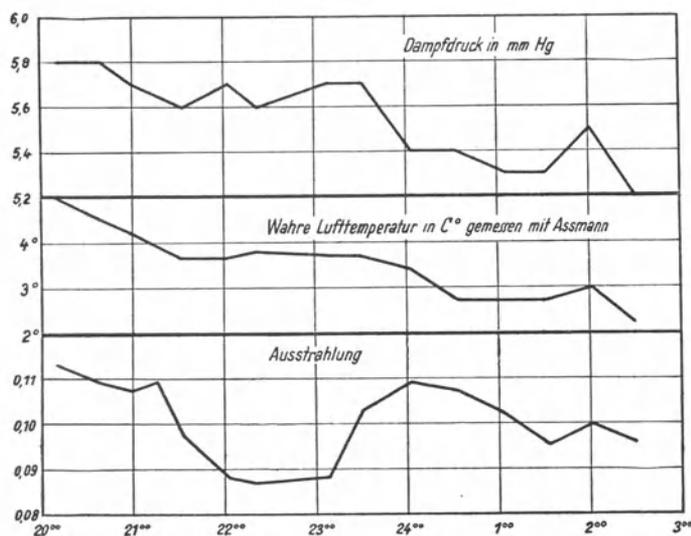


Abb. 71. Verlauf von absoluter Feuchte, Lufttemperatur (150 cm Höhe) und Ausstrahlung auf der Talsohle (Meßstelle: Mühle).

Rückgang der Ausstrahlung um 21 Uhr 30 bemerkbar. Mit dem Anhalten des Nebels geht die Ausstrahlung bis 22 Uhr 30 um etwa 20% zurück. Nach dem Rückgang des Nebels steigt die Ausstrahlung um 23 Uhr 10 wieder an und erreicht, obwohl zwischen 23 und 24 Uhr etwas hohe Bewölkung den Anstieg verzögert, nach völligem Verschwinden des Nebels gegen Mitternacht wieder den anfänglichen Wert. Auch der Einfluß der zweiten Vernebelung auf die Ausstrahlung ist deutlich meßbar.

Während der wirksamen Vernebelung ist am Verlauf der wahren Lufttemperatur, gemessen in 1,50 m Höhe mit dem Assmann'schen Psychrometer, eine Konstanz bzw. leichte Erhöhung der Lufttemperatur festzustellen. Diese Erhöhung beläuft sich auf etwa  $\frac{1}{2}$  Grad. Hier handelt es sich um frei werdende Kondensationswärme, da die Thermometer des Psychrometers Strahlungsschutz besitzen.

Die gleichzeitig beobachtete Erhöhung der absoluten Feuchte der Luft, gemessen mit dem Assmann'schen Psychrometer, beruht wohl darauf, daß während der Vernebelung auch das trockene Thermometer etwas angefeuchtet

wird, was eine Verminderung der Temperaturdifferenzen und eine scheinbare Erhöhung des Dampfdruckes zur Folge hat. Der natürliche Gang der absoluten Luftfeuchte ist in allen von uns beobachteten Fällen, auch in anderen Tälern, während einer klaren Nacht stets abnehmend. Die bodennahe Luftschicht wird im Verlauf einer normalen Frostnacht durch den fortgesetzten Entzug von Wasser infolge der Tau- und Reifbildung an den erkalteten Oberflächen ständig ärmer an absolutem Wassergehalt. Demnach haben in unserem Fall die vom Aspirator angezogenen Nebeltröpfchen auch am trockenen Thermometer Verdunstungskälte hervorgerufen.

Zusammenfassung der Ergebnisse des Vernebelungsversuchs in Saarstein.

1. Schon bei Auftreten eines geringen Fallwindes läßt sich eine geschlossene Nebeldecke nicht erzielen.
2. Eine geringe temperaturerhöhende Wirkung des Nebels ließ sich wohl in einzelnen Fällen nachweisen, im großen und ganzen war aber keine Wirkung vorhanden.
3. Das Vernebelungsverfahren eignet sich selbst bei Auftreten nur schwacher Fallwinde aus Kaltluftentstehungsgebieten kleinen Umfangs nicht als Frostschutzverfahren.

b) Vernebelungsversuch Föhren bei Trier vom 19./20. Mai 1933.

Während bei dem Vernebelungsversuch in Saarstein im Herbst 1931 die Möglichkeit des Frostschutzes durch Vernebelung in einem Gelände untersucht wurde, welches unter der Einwirkung eines schwachen Fallwindes aus einem kleinen Frostentstehungsgebiet stand, sollte bei diesem Versuch im Frühjahr 1933 die Vernebelung in einem mehr ebenen Gelände vorgenommen werden, weil nur bei diesem Typ wirkliche Effekte der Vernebelung zu erwarten sind. Da es im gebirgigen Gelände Westdeutschlands sehr schwer ist, geeignete ebene Flächen hierfür zu finden, mußten wir uns mit einem Gelände begnügen, das nicht als wirkliches Ideal für den vorliegenden Versuch anzusprechen ist. Das ausgesuchte Gebiet war die 2 km<sup>2</sup> große Fläche zwischen den Landstraßen Föhren—Hetzerath, Föhren—Bekond, Hochkreuz—Hetzerath. Diese Fläche liegt etwa 5 km nordöstlich des Ortes Schweich (Mosel). In dem beigegebenen Lageplan (Abb. 72) hat man sich am Schnittpunkt der beiden Landstraßen in der oberen linken Ecke die Station Föhren auf der Bahnlinie Trier—Koblenz zu denken.

Die Versuchsfläche stellte eine Hochebene dar, die mit Feldern bedeckt war. Die Höhenunterschiede des Geländes betragen maximal 30 m. Bei Föhren erhebt sich das Gelände bis 220 m über NN, während in der Ostecke des Versuchsgeländes eine Senke von unter 190 m Meereshöhe liegt. Diese Senke entwässert und entlüftet den größten Teil der Hochebene nach einem Bachtal, das durch Hetzerath absinkt. Das Versuchsgelände hat kein fremdes Einzugsgebiet, weist also ein selbständiges Klima auf. Wir hatten es im vorliegenden Falle nur mit der an Ort und Stelle entstehenden Kaltluft zu tun, die auf dem Felde nur langsam floß, weil die Höhenunterschiede gering waren. Die Thermometer waren mit Rücksicht auf das vorhandene Wegenetz gestellt, wobei vermieden wurde, sie an solchen Stellen anzubringen, wo die Vegetationshöhe 10 cm überschritt.

Die Wetterlage wurde am Morgen des 19. Mai 1933 von einem Hochdruckrücken beherrscht, der sich quer über Europa vom Golf von Biscaya bis nach Finnland erstreckte. Die Folge dieser Luftdruckverteilung war ziemlich heiteres Wetter im größten Teil Westdeutschlands. Da jedoch der hohe Druck im wesentlichen auf die über dem Festland liegenden Kaltluftmassen zurückzuführen war, während die höheren Schichten der Atmosphäre nur geringen Anteil daran hatten, blieb die Gesamtwetterlage nicht frei von gelegentlichen Störungen. Für die Nacht zum 20. Mai konnte dennoch bei äußerst schwacher Luftbewegung mit intensiver Ausstrahlung gerechnet werden, so daß ein Temperaturrückgang für die bodennahe Luftschicht bis in Gefrierpunktsnähe erwartet werden durfte. Wie die Entwicklung zeigte, ist diese Prognose auch tatsächlich eingetroffen.

In der Tabelle 28 sind die Werte der für den Versuch wichtigen meteorologischen Elemente von den benachbarten Stationen Trier-Tal, Trier-Berg, Eitelsbach-Ruwer und Altburg-Eifel zusammengestellt.

Tabelle 28

Meteorologische Station Meereshöhe	Trier-Tal 150 m	Trier-Berg 200 m	Eitelsbach 210 m	Altburg 535 m
19. Mai 1933				
III. Abl. (21 1/2 Uhr MEZ)				
Lufttemperatur . . . .	12,2° C	11,4° C	11,5° C	10,0° C
Absolute Feuchte . . . .	6,5 mm	6,6 mm	6,3 mm	5,4 mm
Relative Feuchte . . . .	61 %	65 %	62 %	59 %
Bewölkung . . . . .	0	1	0	0
Wind . . . . .	NE <sup>1</sup>	ENE <sup>1</sup>	NE <sup>1</sup>	SE <sup>4</sup>
Nächtliches Minimum	5,7° C	5,9° C	4,4° C	5,9° C
20. Mai 1933				
I. Abl. (7 1/2 Uhr MEZ)				
Lufttemperatur . . . .	9,6° C	8,2° C	10,0° C	10,3° C
Absolute Feuchte . . . .	6,6 mm	6,5 mm	7,7 mm	6,0 mm
Relative Feuchte . . . .	74 %	80 %	83 %	64 %
Bewölkung . . . . .	0 ☉	0 ☉	0 ∞ <sup>2</sup>	0 ☉
Wind . . . . .	NE <sup>1</sup>	E <sup>3</sup>	E <sup>3</sup>	E <sup>4</sup>

Während die Lufttemperatur an den meteorologischen Stationen im Schatten der Thermometerhütten und in 2 m Abstand vom Boden nur auf  $6-4\frac{1}{2}$  Grad über Null sank, stellten sich in der bodennahen Luftschicht auf dem Versuchsfeld Frosttemperaturen ein. Die im Einzugsgebiet des Fallwindes der Ruwer liegende Station Eitelsbach hat ein Minimum von  $+4,4$  Grad, das  $1\frac{1}{2}$  Grad niedriger liegt als das Minimum der 535 m über dem Meere aufgestellten Station Altburg. Diese Station liegt auf einem Berg, wo die Kaltluft nach allen Seiten abfließen kann, so daß sie immer ein relativ hohes nächtliches Minimum hat.

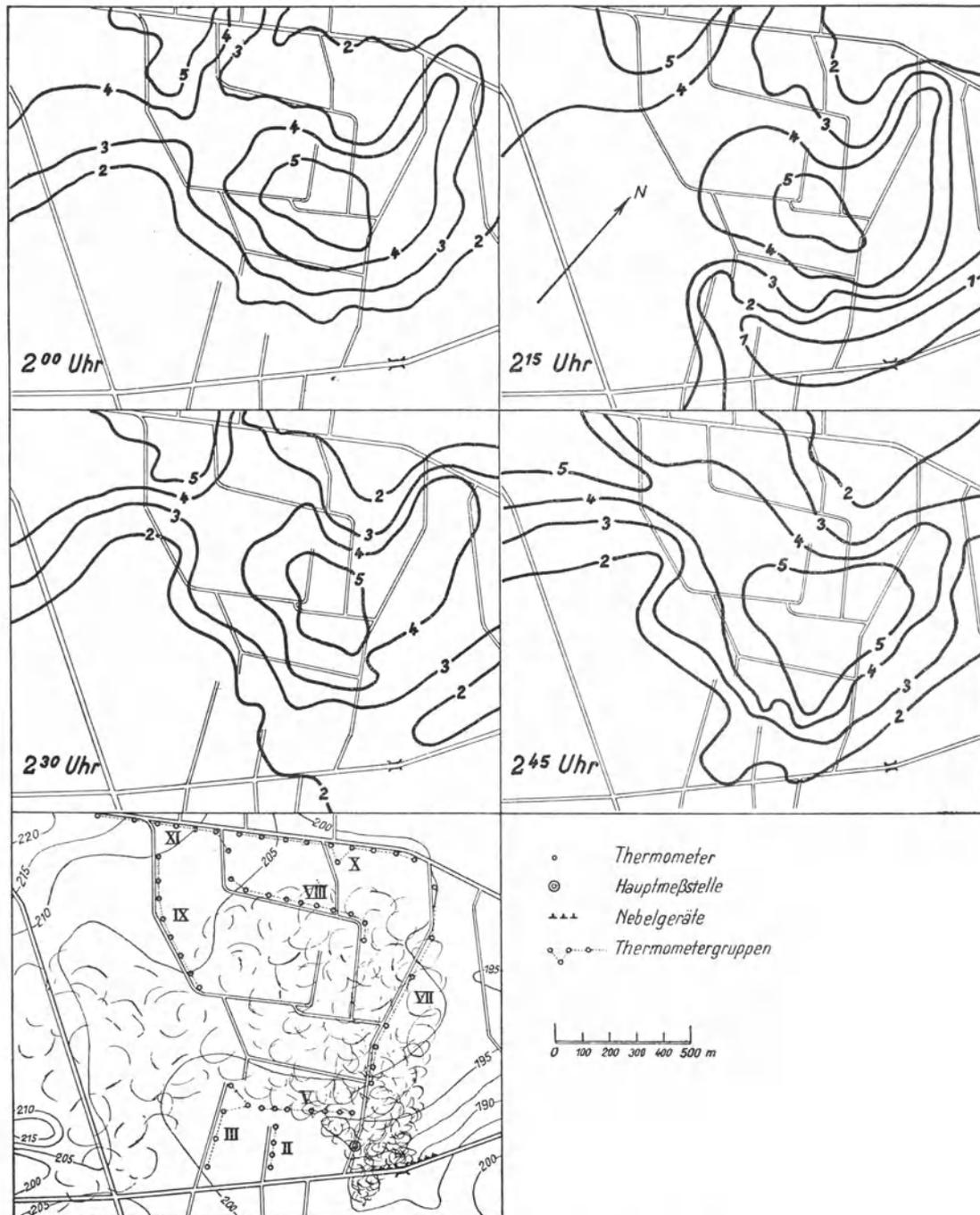


Abb. 72. Vernebelungsversuch Föhren 19./20. V. 1933.

Da sämtliche meteorologischen Stationen im klimatologischen Netz des Instituts für Klimaforschung am Abend des 19. Mai Ostwind meldeten und nach der Wetterlage anzunehmen war, daß dieser mit nur geringen Richtungsänderungen auch für die kommende Nacht erhalten bliebe, wurden die Nebelgeräte in der Ostecke des Versuchsfeldes längs der Landstraße aufgestellt.

Diese Aufstellung war zwar richtig bezüglich des herrschenden Oberwindes, aber es war andererseits wieder die unglücklichste Stelle, die wir treffen konnten, da in der bodennahen Luftschicht die am Boden entlang

schleichende Kaltluft in die Senke hinein floß. Während also die Nebelwolken mit dem schwachen Oberwind, der übrigens nicht immer konstant aus Osten wehte, über das Versuchsfeld getrieben wurden, kam am Boden entlang Kaltluft in umgekehrter Richtung in ganz langsamem Strom.

Die Nebelgeräte sind in dem Lageplan (Abb. 72) zu beiden Seiten der Straßenbrücke an der bereits beschriebenen Senke eingetragen. Im ganzen wurden 10 Geräte aufgestellt, für welche je 0,3 Zentner gebrannter Kalk bereitgestellt war.

Für die Bedienung der Nebelgeräte, für die Ablesungen an den Thermometern, die Herstellung der Verbindung zwischen der Versuchsleitung und der Vernebelungsstelle sowie den einzelnen Meßstellen hatten sich Mannschaften der SA und der Feuerwehr aus Föhren, Hetzerath und Bekond zur Verfügung gestellt. An den Nebelgeräten wurden vor Beginn des eigentlichen Versuchs die verschiedenen Handgriffe geübt, wobei die Leute zur Vorsicht beim Hantieren mit der Nebelsäure angehalten wurden. Diejenigen, die in unmittelbare Nähe der Nebelsäure kamen, waren durch Gummischuhe und Brillen gegen schädliche Säurewirkungen geschützt. Trotzdem sind Verbrennungen vorgekommen, die sich jedoch nur in Kleiderschäden äußerten.

Die Aufgabe der Bedienungsmannschaft bestand darin, nach Weisung der Versuchsleitung die Vernebelung in Gang zu setzen oder sie auf ein verabredetes Zeichen hin zu unterbrechen.

Die vorhandenen Düsen paßten nicht auf die neuen Vorratsfässer der Nebelgeräte, die für diesen Versuch zur Verfügung gestellt waren. Leider war uns dies vorher nicht bekannt, und so waren wir gezwungen, das Umfüllen von großen in kleinere Fässer während der Nacht auf dem Versuchsfeld vorzunehmen. Dieses Umfüllen war mit großen Schwierigkeiten verbunden, da sich beim Einatmen des entstandenen Säurenebels ein unerträglicher Hustenreiz bemerkbar machte.

Nachteilig wirkte sich das Umfüllen insofern aus, als dadurch bereits frühzeitig chemische Nebel entstanden, die sich bei der geringen Luftbewegung besonders in der Nähe der Nebelgeräte, wo die Abfüllung vorgenommen worden war, längere Zeit hielten und zeitweise auch in das Versuchsfeld hineinzogen. Sicherlich hat der Versuch darunter gelitten, daß die Nebelentwicklung nicht zur vorgesehenen Zeit plötzlich auftrat. Der Beginn des Versuchs wurde immer länger hinausgeschoben, da wir hofften, doch noch ein vollkommen freies Versuchsfeld zu bekommen. Dies wurde jedoch nur unvollkommen erreicht. Vernebelt wurden in zwei Stunden rund 800 kg Nebelsäure.

Unter Benutzung des Wegenetzes wurden insgesamt annähernd 70 Minimumthermometer aufgestellt. Jedes Thermometer war ohne Strahlungsschutz in 50 cm Höhe über dem Boden an einem Holzpfeiler befestigt. Im einzelnen ist die Verteilung aus dem Lageplan zu entnehmen, in welchem eine Zusammenfassung der Meßstellen in 11 Gruppen vorgenommen wurde.

Um möglichst gleichzeitige Ablesungen der Thermometer zu gewährleisten, wurde ab 01 Uhr 45 jede Viertelstunde ein Pfeifensignal gegeben, auf das hin jeder Inhaber einer Stationsgruppe (4—10 Thermometer) seine Reihe abschnitt und möglichst rasch mit Hilfe einer Taschenlampe die Temperatur ablas. Dabei wurde besonders darauf geachtet, daß durch die Körperwärme und den Einfluß der Taschenlampe keine Ablesefehler entstehen konnten.

Etwa 200 m westlich der Nebelgeräte waren die Strahlungsmeißinstrumente mit allem Zubehör aufgestellt. Diese Meßstelle war mit der Nebelbatterie durch Kabel telephonisch verbunden. Die Strahlungsstation verfügte in erster Linie über ein im Institut für Klimaforschung gebautes Ferneffektivaktinometer (Abb. 184, Tafel 5) nach P. Dubois<sup>93</sup>) (Teleffekt), das für die Messung der Ausstrahlung in bestimmten Zenitdistanzen bei kleinem Himmelsausschnitt besonders geeignet ist. Zu diesem Instrument gehören mehrere Zusatzapparate: Eine Brückenschaltung zur Messung der Temperaturen von Mantel, Spiegel und Thermobatterie mittels Widerstandsthermometern (Abb. 185a, Tafel 5), eine in einer Transportkiste lichtdicht eingebaute photographische Registriervorrichtung (Abb. 185b, Tafel 5) mit empfindlichem Moll-Galvanometer zur Messung der Ausstrahlungsintensitäten, eine als Dunkelkammer eingerichtete große Kiste (Abb. 186, Tafel 5) und ein als „Schwarzer Körper“ zur Eichung dienendes Gefäß mit einem Kühlmantel von Eiswasser (Abb. 184, Tafel 5).

Um vergleichsweise im Nebel und unmittelbar über der Nebeldecke messen zu können, war in nächster Nähe der Station eine Feuerwehrlater (Abb. 187, Tafel 5) aufgestellt, zwischen deren Spitze in etwa 12 m Höhe über dem Boden und dem Sitz des Beobachters ein Draht gespannt war, an dem sich der Geber des Angström'schen Pyrometers auf- und abbewegen ließ. Leider konnte von dieser Einrichtung nur unvollkommen Gebrauch gemacht werden, da die Nebeldecke in ihrer Höhererstreckung zu starken Schwankungen unterworfen war.

Kurz nach Mitternacht war für den eigentlichen Versuch alles bereit. Von 01 Uhr 45 bis 03 Uhr 00 wurden an jeder Station die Thermometer viertelstündlich abgelesen.

Mit der eigentlichen Vernebelung wurde erst um 02 Uhr 50 begonnen, nachdem sich allerdings vorher beim Umfüllen schon erhebliche Nebelschwaden gebildet hatten, die nicht mehr völlig abzogen. Ursprünglich war beabsichtigt, die chemische Vernebelung zeitweise zu unterbrechen. Dieses Vorhaben konnte jedoch nur unvollkommen

verwirklicht werden, da der Wind bei durchweg geringer Geschwindigkeit die Richtung häufig wechselte, die Nebeldecke jedoch nicht restlos weggeführt wurde.

Die meisten Stationen meldeten zum Teil fortdauernden, zum Teil zeitweisen Nebel. An fast allen Stationen konnte die Ankunft der Säureteilchen durch Geruch festgestellt werden.

Es war deutlich zu erkennen, daß der Säurenebel einen starken natürlichen Nebel auslöste. Man sah dies besonders bei dem schlagartigen Eintritt von Nebelbildung, obwohl erst geringe Teilchen Nebelsäure eingetroffen waren. Die Stärke des Nebels nahm gegen Morgen fortgesetzt zu. Die ganze Umgebung, auch die Täler, waren frei von Nebel, was durch Kontrollfahrten bis lange nach Sonnenaufgang festgestellt wurde. Nur die Hochebene selbst war mit Nebel bedeckt.

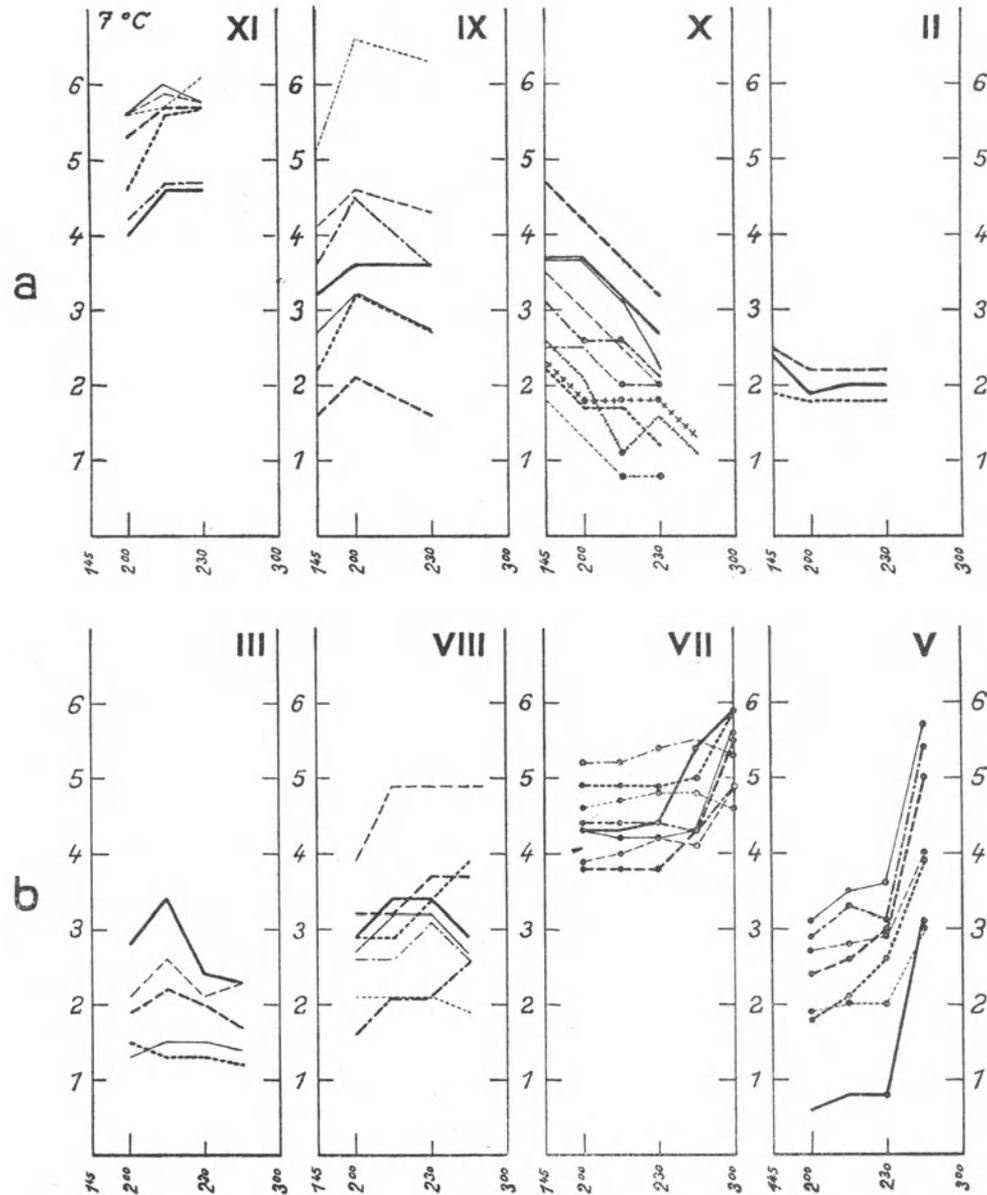


Abb. 73. Temperaturverlauf an verschiedenen Stationen des Vernebelungsgeländes bei Föhren.

Auch dieser Vernebelungsversuch ist, wie so viele unserer Nebelversuche, als nicht geglückt anzusprechen. Infolge des notwendig gewordenen Umfüllens der Nebelsäure lag bei der ersten Ablesung um 02 Uhr 00 bereits eine Nebeldecke in der Mitte des Feldes. Diese Nebeldecke wanderte nicht ab, so sehr wir den Versuchsbeginn auch hinauszögerten. Während nämlich am Boden entlang ein ganz schwacher Fallwind auf die Senke in der Ostecke des Feldes gerichtet war, herrschte ein schwacher Oberwind in der Richtung aus Ost. Deshalb blieb die Nebeldecke in der Mitte des Feldes unverändert liegen. Die Isothermenkarten lassen höchstens von vorneherein eine Wirkung des Nebels erkennen, nicht aber eine Wirkung während der Hauptvernebelungstätigkeit (Abb. 72). Die

höher gelegene Geländestelle im Westen des Feldes ist ohne weiteres wärmer, während die tiefer gelegenen Geländestellen kälter sind. Daß sich gerade in der Mitte des Feldes die Warmluft erhalten hat, könnte gegebenenfalls auf die bereits vorhandene Nebeldecke zurückzuführen sein, jedoch ist diese Schlußfolgerung nicht ohne weiteres beweiskräftig.

Wenn wir aber nicht die Isothermenkarten, sondern den Verlauf der Temperatur an den Stationen verfolgen, können wir allerdings mit größter Sicherheit einen Effekt der Vernebelung folgern. In Abbildung 73 sind die Stationsgruppen zusammengestellt, je nachdem sie nach Angabe der Beobachter zur Zeit der Ablesungen Nebel hatten oder nebelfrei waren. Auf dem Lageplan ist die Verteilung des Nebels sowie seine Dichte durch Striche angezeigt. (Die Stationsgruppen I, IV und VI mußten nach sorgfältiger Prüfung ausgeschieden werden, da die Beobachtungen nicht zuverlässig genug erschienen.) Danach waren völlig nebelfrei die Stationen II, III, X, XI, während von IX noch das Thermometer 276 etwas Nebel abbekam. Die Station VIII hatte dünneren, V und VII dagegen starken Nebel.

Der Temperaturverlauf auf der höchstgelegenen Station XI ist nach vorübergehendem Anstieg gleichbleibend, bei X durchweg fallend, bei IX fallend bis auf Thermometer 276, welches konstant bleibt. Die Gruppen II und III, die gleichfalls nebelfrei waren, zeigen schwach fallende Tendenz, die in der Hauptsache vom Nebel betroffenen Gruppen VII und V dagegen stark steigende. In der Gruppe VIII, die am Rande des Nebelfeldes lag, ist teils fallende, teils steigende Tendenz bemerkbar. Man kann also wohl mit einer gewissen Berechtigung eine temperatursteigernde Wirkung der Vernebelung beim Vergleich des Verlaufs am vernebelten und nicht vernebelten Thermometer finden.

Wir vermuten, daß der starke Temperaturanstieg bei Gruppe V nicht allein auf die Erhöhung der Thermometertemperatur durch Strahlungsschutz, sondern auch durch Kondensationswärme beim Bilden natürlichen Nebels entstand. Man hatte den Eindruck, daß sich die Nebelwolke, im Gegensatz zu dem gewohnten Bild bei einer Vernebelung tagsüber, beim Weiterschreiten nicht verdünnte, sondern daß sie bei dem Hineingleiten in die über der Hochfläche lagernde Inversion natürlichen Nebel auslöste und sich eher noch verdichtete.

Die photographische Registrierung der Ausschläge des mit dem Ferneffektivaktinometer verbundenen Galvanometers gestattet ein Urteil über die Größe der nächtlichen Ausstrahlung und über die Beeinflussung derselben durch die Vernebelung.

Unmittelbar vor Beginn der eigentlichen Vernebelung, nachdem die durch das Umfüllen entstandenen Nebelschwaden an der Meßstelle abgezogen waren, wurde ein Ausschlag von 29,7 mm registriert. Dieser war achtmal so groß als der Ausschlag, welcher der Ausstrahlung gegen einen Schwarzen Körper von 0 Grad entsprach.

Abbildung 74 zeigt den Verlauf der Registrierkurve in vergrößertem Maßstab zur Zeit der Hauptvernebelung. Man sieht den anfänglichen Ausschlag bei ungetrübter Luft unmittelbar nach dem Nebeleinsatz zurückgehen. Der spätere Rückgang beträgt bis zu 20 % vom Ausgangswert. Dabei ist zu bemerken, daß die Öffnung des Strahlungsapparates gegen den Zenit gerichtet war und sich etwa 2 m hoch über dem Erdboden befand. Die Kurve ist sehr starken Schwankungen unterworfen, die mit den andauernden Änderungen der Nebeldichte parallel laufen.

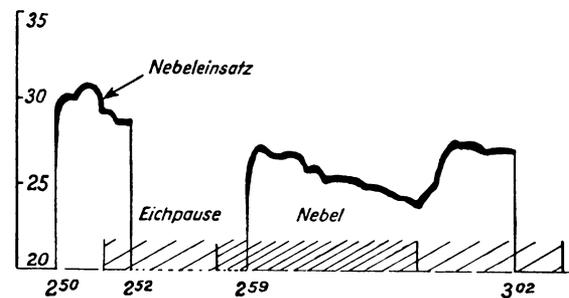


Abb. 74. Ausstrahlung und Nebel.

#### Zusammenfassung.

Bei dem Versuch Föhren, der auf einer Hochebene ohne Zufluß von Kaltluft aus fremden Entstehungsgebieten stattfand, ließ sich zwar keine besonders gleichmäßige Nebeldecke erzeugen, jedoch wurden 25 ha dicht und weitere 50 ha weniger dicht mit Kunstnebel überlagert, der im Verlauf von zwei Stunden aus 800 kg Nebelsäure mit zehn kleinen Geräten der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft erzeugt worden war. Im Bereich des dichten Nebels waren Temperaturanstiege von 2 Grad im Mittel und 4 Grad maximal zu verzeichnen, während die Lufttemperatur im nicht vernebelten Gebiet gleich blieb oder langsam fallende Tendenz aufwies. Im schwach vernebelten Gebiet war wenig Anstieg der Temperaturen festzustellen, jedenfalls lag der Anstieg in der Größenordnung der in einer Ausstrahlungsnacht üblichen Schwankung.

#### c) Vernebelungsversuch Trier-Euren.

Mit keiner Frostschutzmethode hatten wir derartige Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung wie mit der Vernebelung. Die Versuche sind einerseits von der Witterung, andererseits aber auch von der Geländegestaltung in besonderem Maße abhängig. Dazu kommt noch, daß nur Versuche auf großen Flächen uns ein

Bild geben können von der Wirkung dieser Methode und daß damit gleichzeitig wieder ein besonders großer Einsatz von Meßstellen und an der Messung beteiligten Personen verbunden ist. Je größer der Versuch wird, um so schwieriger wird es weiterhin, unbeeinflusste Flächen als Kontrollflächen gleichzeitig zu untersuchen, bei denen annähernd gleiche Verhältnisse herrschen wie über dem Versuchsfeld.

In der Nacht vom 19./20. Januar 1935 wurde auf dem Gebiete des ehemaligen Trierer Flugplatzes in Euren ein Vernebelungsversuch in größerem Maßstab durchgeführt, um die Verwendbarkeit des chemischen Nebels für die Bekämpfung der Frostschäden im Wein- und Obstbau zu prüfen.

Das gesamte Versuchsgelände hatte eine Ausdehnung von  $500 \times 500$  m, d. h. 25 ha. Das eigentliche Kernstück des Versuchsfeldes war in der Mitte der nordöstlichen Hälfte des Flugplatzes gelegen und maß  $200 \times 200$  m, das sind 4 ha. Die südliche Hälfte des Platzes war nahezu planiert, das engere Versuchsfeld wies jedoch in seiner Mitte eine kleine Vertiefung auf (Abb. 75). Die Höhenunterschiede betrug aber nirgends mehr als 2 m.

Am Nordostrand des engeren Versuchsfeldes waren in Abständen von je 30 m insgesamt acht kleine Nebelgeräte der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft Kiel aufgestellt. Verbraucht wurden 200 kg Nebelsäure.

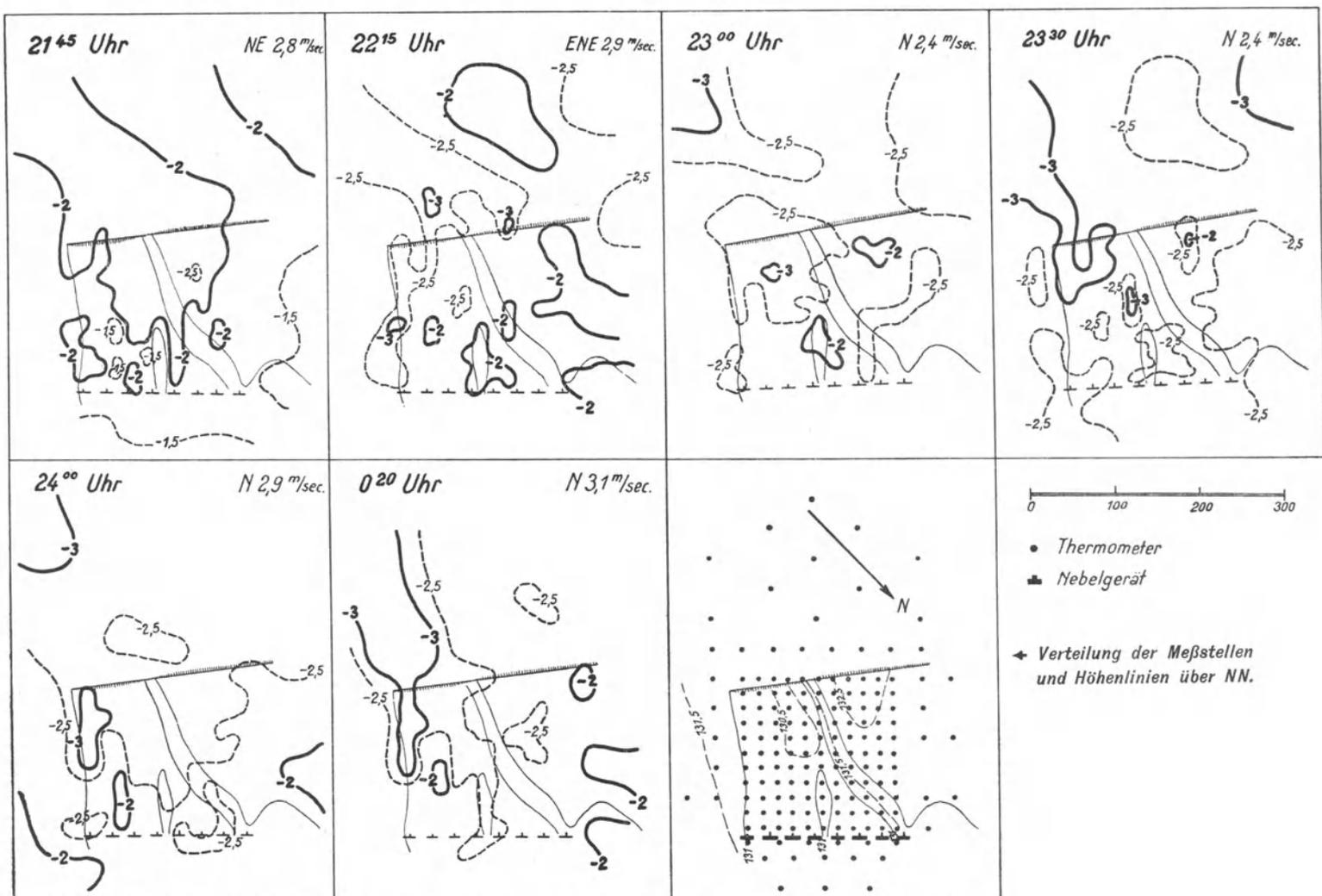


Abb. 75. Nebelversuch Trier-Euren am 19. Januar 1935.

Mit den Geräten wurde die Erfahrung gemacht, daß die Verschlüsse nach längerem Lagern nur mit größter Mühe, teilweise gar nicht mehr zu öffnen sind, was auf die zersetzende Wirkung der konzentrierten Säure zurückzuführen ist. Auch die Düsen verstopfen sich leicht durch Rost aus den Fässern, so daß empfindliche Unterbrechungen bei der Vernebelung entstehen. Diese Mißstände müssen unter allen Umständen überwunden werden, wenn die Geräte Eingang in die Praxis finden sollen.

Das ganze Versuchsfeld war mit Temperaturmeßstellen überzogen. Verwendet wurden Alkohol-Minimumthermometer, die in 50 cm Höhe über dem Boden in horizontaler Lage an Holzpfehlen befestigt wurden. Auf das

engere Versuchsfeld entfielen bei 20 m Abstand voneinander 121 Thermometer, während um diese Kernzone herum in wesentlich größeren Abständen 37 und vor dem Nordostrand, also auf der Luvseite, 14 Thermometer standen.

Zur Bedienung der Nebelgeräte hatte die Ortsgruppe Trier des Reichsluftschutzbundes Mannschaften gestellt, während die Thermometerablesungen, die viertelstündlich erfolgten, von dem SA-Nachrichten- und Pioniersturm übernommen wurden. Dabei hatte ein Mann durchschnittlich fünf Thermometer zu betreuen.

Die allgemeinen meteorologischen Beobachtungen sowie die Bedienung der aufgestellten Thermohygrographen, Schalenkreuzanemometer und Strahlungsmeßgeräte versah das Personal des Instituts für Klimaforschung. Insbesondere wurde auch ein hochempfindliches, photographisch registrierendes Ferneffektivaktinometer zur Messung der nächtlichen Ausstrahlung eingesetzt. Dieses Instrument war in der Institutswerkstatt auf Grund eigener Erfahrungen und Berechnungen gebaut worden und hatte sich schon in Föhren bewährt (Abb. 184, Tafel 5).

Die Messungen dauerten in der Nacht von 21 Uhr 15 bis 24 Uhr 15. Vernebelt wurde von 22 Uhr 20 bis 23 Uhr 30 mit geringfügigen Unterbrechungen.

Die auf Grund der korrigierten Ablesungen gewonnenen Isothermenkarten (Abb. 75) zeigten bereits vor dem Einsatz des Nebels deutliche Unterschiede in der Temperaturverteilung in 50 cm Höhe über dem Boden. Diese Differenzen können auf die kleineren Höhenunterschiede des Geländes zurückgeführt werden. Eigenartigerweise blieben sie aber nicht an derselben Stelle liegen, sondern wärmere und kältere Zonen wanderten über das Versuchsfeld, ohne daß irgendein System darin zu erkennen war. Eine ausgesprochene Schichtung der Luft konnte in der Versuchsnacht nicht zustande kommen. Es herrschte schon bei Beginn des Versuches ein NNE-Wind von 2 m/sec. Wir nahmen an, daß der Wind allmählich abflauen würde, wie dies auch nach unseren Erfahrungen in Ausstrahlungsnächten infolge der Ausbildung der stabilen Schichtung an der bodennahen Inversion einzutreffen pflegt. Der Gradientwind war jedoch stärker und wuchs im Verlaufe des Versuchs auf 3 m/sec an, so daß um 03 Uhr 00 der Versuch abgebrochen werden mußte. Die Thermometer waren durch die starke Windgeschwindigkeit gut belüftet und zeigten dadurch keinen Strahlungsschutzeffekt. Des weiteren konnte erst recht nicht mit einer Temperaturerhöhung der bodennahen Luftschicht infolge Ausstrahlungsverminderung gerechnet werden, da der Boden um diese Jahreszeit nur geringen Wärmeverrat besaß.

Zweifellos ist der an den Thermometern zu messende Effekt bei Vernebelung oder bei irgendeiner Lufttrübungsmethode stark von der Jahreszeit abhängig. Dies trifft nicht zu auf den Effekt, der hervorgerufen wird dadurch, daß infolge des Strahlungsschutzes eine geringere Unterkühlung der Thermometer gegenüber Luft eintritt. Hierbei spielt die Jahreszeit keine Rolle, sondern nur die Stärke der Ausstrahlung und der vorhandene Luftaustausch. Die Erhöhung der Temperatur der Erdoberfläche und damit die Erhöhung der Temperatur der bodennächsten Luftschicht als Folge des Strahlungsschutzes ist in ihrer Intensität jedoch ohne Zweifel jahreszeitlich bedingt. Ist der Boden in den oberen Dezimetern annähernd gleich temperiert wie die Erdoberfläche, so ist der Wärmefluß aus dem Erdinnern zur Erdoberfläche gering. Bei kaltem Bodeninnern wird daher auch bei gutem Ausstrahlungsschutz und dem daraus resultierenden geringen Wärmeumsatz der Bodenoberfläche deren Temperatur nicht ansteigen, da keine Temperaturdifferenz vorhanden ist, welche Wärmeleitung und Scheinleitung in den obersten Bodenteilchen in Gang setzen kann.

Anders ist es in der warmen Jahreszeit, wenn erhebliche Unterschiede in der Temperatur des Bodens und der Bodenfläche bestehen. Wenn in diesem Fall starker Rückgang der effektiven nächtlichen Ausstrahlung und des daraus resultierenden Wärmeentzuges der Bodenoberfläche eintritt, dann besteht eine so erhebliche Temperaturdifferenz im Boden selbst, daß ein starker Wärmefluß zur Bodenoberfläche einsetzt, welche sich erwärmt und diese Erwärmung der bodennahen Luftschicht mitteilt. Wir haben gelegentlich bei einem unserer Frostbekämpfungsversuche im Weinbau im Mai 1934 den Fall gehabt, daß die Bodenoberfläche eine Temperatur von  $-3$  Grad hatte, während das Thermometer in 10 cm Tiefe in Tonschieferverwitterungsboden 15 Grad über Null anzeigte. In solchen Fällen sind natürlich zusätzliche Effekte der Vernebelung und der Lufttrübung zu erwarten, die in einem wahren Temperaturanstieg der bodennahen Luftschicht unter dem Einfluß des Rückganges der effektiven Ausstrahlung bestehen, während in den anderen Fällen (bei niedrig temperiertem Bodeninnern) nur die Unterabkühlung der Thermometer gegenüber Luft mehr oder weniger aufgehoben werden kann.

Demnach konnte ein Effekt der Vernebelung von vorneherein nicht erwartet werden. Es fehlen alle Voraussetzungen, die zu einer Temperatursteigerung führen können.

Infolge des starken Luftaustausches bestand keine Untertemperatur der Thermometer gegen Luft, die obersten Bodenschichten waren annähernd gleichwarm wie die Bodenoberfläche und Kondensationswärme durch Bildung natürlichen Nebels konnte infolge der Nichterreicherung des Taupunktes in Verbindung mit dem starken Luftaustausch nicht frei werden.

### 7. Weitere Vernebelungsversuche.

Außer den beschriebenen Versuchen wurden eine Reihe weiterer Untersuchungen über die Wirkung der Vernebelung durchgeführt. Vorwiegend wurde Nebelsäure mit den Apparaten der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft Kiel verwendet, gelegentlich aber auch Bergermischung und Chlorammon. Bei einem der Versuche im Februar 1931 im Avelertal wurde erstmalig ein Gerät zur Bestimmung der Nebeldichte ausprobiert. Es war von Dr. U. Müller-Kiel gebaut und bestand aus einer Taschenlampe mit vorgehaltenem Kobaltglas und eingebautem Strommesser (Seite 106).

Zur Messung wird die Lampe allmählich so weit von dem Beobachter entfernt, bis das blaue Licht gerade verschwindet. Nach einer in einem Prüfraum vorgenommenen Eichung ist dann aus der Größe der Entfernung die Nebeldichte in Milligramm Nebelsäure je Kubikmeter zu bestimmen.

Die vorhandene Eichkurve ist nur für Abstände bis zu 7 m vorgesehen. Die in Avelsbach festgestellten Entfernungen waren jedoch meist größer. Durch Extrapolation der Kurve würden diese Entfernungen Dichtegraden von 5 bis 10 mg pro Kubikmeter entsprechen, gültig für einen Abstand von 100 m vom Nebelgerät. Für künftige Messungen müßte eine weitere Methode zur Bestimmung der Tröpfchengröße gefunden werden, da diese Größe für Absorption und Reflexion der Strahlung wesentlich mitbestimmend ist.

### F. Vernebelung von Frostentstehungsgebieten durch Flugzeuge (Frostschutz und Luftschutz).

Da wir im allgemeinen mit Frostentstehungsgebieten rechnen müssen, welche mehr oder weniger weit von der Auswirkungsstelle der Frostlage abliegen, so liegt der Gedanke nahe, auf diese Entstehungsgebiete Einfluß auszuüben. Wenn wir hierzu Flugzeuge einsetzen (Abb. 188, Tafel 6), so können wir ohne Zweifel hierbei einen erheblichen Einfluß auf die Frostentstehungsgebiete gewinnen, da es verhältnismäßig leicht ist, damit große Flächen zu vernebeln. Schwierigkeiten macht jedoch 1. die Tatsache, daß bei Nacht geflogen werden muß, daß 2. die Flugzeuge nicht sehr tief fliegen können, um nicht selbst Gefahr zu laufen, und daß 3. beim Abregnen von Nebelsäure aus zu geringer Höhe an Lebewesen Verbrennungen hervorgerufen werden können. Die Folge des Höherfliegens ist, daß die Nebelwolken oberhalb der Bodeninversion in Luftschichten mit höherer Windgeschwindigkeit entstehen und schneller abwandern. Trotz allem ist dieser Möglichkeit Augenmerk zu schenken. Die Anwendung über ausgedehnten Obst- und Gemüsebauflächen in der Ebene (z. B. bei Hamburg) erscheint heute schon durchaus wirtschaftlich und der Wunsch nach Durchführung solcher Versuche verständlich.

Gautier<sup>119)</sup> und Treichel<sup>383)</sup> schlagen eine Verbindung zwischen Luftschutz und Frostschutz vor. Fußend auf den Arbeiten von Bender<sup>50, 51, 52)</sup> weisen sie auf den Erfolg des Schwefelsäurenebels als Frostschutzmittel hin und schlagen wechselseitige Hilfe zwischen Stadt und Land vor. Im Kriegsfall sollen die Bauern ihre Nebelgeräte den Städtern und der Industrie als Tarnungsgeräte leihen, und umgekehrt sollen in Friedenszeiten die Industriewerke ihre Tarnungsgeräte den Bauern zu Frostschutzzwecken zur Verfügung stellen. Es wird der Vorschlag gemacht, eine solche Zusammenarbeit zunächst in und bei Hamburg auszuprobieren, weil Hamburg sehr luftgefährdet und andererseits von einer hochentwickelten Garten- und Landwirtschaft umgeben ist. Treichel schlägt besonders noch die Verwendung ortsfester Anlagen vor, von denen aus der Nebel mit Exhaustoren durch ein Röhrensystem etwa aus Steingut geleitet wird, um an geeigneter Stelle ins Freie zu treten. Er streift dabei auch die Möglichkeit, den Säurenebel mit Wasser anzureichern und ihn gegebenenfalls für Zwecke der Schädlingsbekämpfung mit Stoffen toxischer Wirkung zu beladen, wie es später Honigmann<sup>160)</sup> in die Tat umsetzte.

### G. Die Lufttrübung durch Räuchern als Frostschutz.

#### 1. Geschichtliches über das Frosträuchern.

Über die Geschichte des Frosträucherns berichten ausführlich Lüstner und Molz<sup>226)</sup>, denen wir hierin weitgehend folgen.

Verschiedene Stellen bei römischen Schriftstellern (Plinius, Columella) lassen erkennen, daß man schon vor rund 2000 Jahren die Reben durch Rauchentwicklung vor dem Erfrieren zu schützen suchte. Damit nimmt also diese Frostschutzmaßnahme, was das Alter anbelangt, unter allen Methoden sicher die erste Stelle ein.

Ob auch die Bewohner der andinischen Hochflächen den tatsächlichen Zusammenhang von Rauchentwicklung und Frostschutzwirkung erkannt hatten, ist nicht bewiesen. Fest steht nur, daß die Inkas der aufgehenden Sonne Rauchopfer darbrachten, um die Erfüllung eines Wunsches zu erleben.

Wann in Deutschland das Frosträuchern aufkam, wissen wir nicht. Irgendwelche genaueren Angaben hierüber sind in der Literatur nicht zu finden. Aus der das Mittelalter kennzeichnenden religiösen Einstellung darf

man aber wohl schließen, daß das Anwenden von Maßnahmen gegen Frostgefahr als ein Eingriff in die göttliche Vorsehung betrachtet wurde und deshalb verpönt war.

Bestimmtere Mitteilungen über das Frosträuchern tauchen erst im 18. Jahrhundert auf. Und nun allerdings will es scheinen, als ob sich diese Methode verhältnismäßig rasch Bahn gebrochen hat. Jedenfalls war schon lange vor Ende des gleichen Jahrhunderts das Räuchern in den Weinbergen vielfach üblich. Denn wir finden es nun in Württemberg und Tirol, in der Champagne, in Burgund, im Elsaß und in Ungarn, später auch an der Mosel und am Rhein. Man darf aber nicht annehmen, daß die damalige Winzerbevölkerung sich allgemein zur Frostbekämpfung bekannt hätte. Zahlreiche Einwände stellten sich der Ausbreitung entgegen. Von diesen Einwänden seien einige hier angeführt, weil sie die damalige Stellungnahme eines Teiles der Bauernschaft kennzeichnen:

„Ein solches Unternehmen ist ein Eingriff in Gottes Weltregierung und will dem Allmächtigen gleichsam Trotz bieten, als ob der schwache Mensch ihm verwehren wollte, seinen Weinberg erfrieren zu lassen.“\*)

„Unsere Vorfahren haben das Erfrieren der Weinberge nicht gehindert, so wollen wir es auch nicht: die Alten waren auch keine Narren.“

„Die Weinberge kosten ohnehin schon genug zum Erhalten, warum sollen wir neue Kosten aufwenden?“

Zu dieser Einstellung kam noch hinzu, daß zeitweilige Mißerfolge selbstverständlich nicht ausbleiben konnten, zumal das Räuchern bis jetzt noch immer Sache des Einzelnen war und man eine organisierte Frostabwehr noch nicht zustande gebracht hatte.

Deshalb muß die Erkenntnis, daß einzig und allein gemeinschaftliches Räuchern über große Flächen zum Erfolge führen könne, als der bedeutungsvollste Schritt in der Geschichte des Frosträuchern angesehen werden. Und es bleibt ein Verdienst der damaligen Regierung, auf eine gemeinsame Bekämpfung der Frostgefahr hingearbeitet zu haben. So sehen wir, daß mit dem beginnenden 19. Jahrhundert das Räuchern der Weinberge von seiten der Regierung vielfach empfohlen, in Franken und Rheinpreußen sogar befohlen wurde. In dem Regierungsblatt für die Kurbayerischen Fürstentümer in Franken von 1803<sup>280)</sup> heißt es:

„... Unter allen bis daher versuchten Mitteln hat indessen das Anzünden von Rauchfeuern in den kalten Frühjahrsnächten, wodurch ein hinlänglich dicker Rauch in den Weinbergen verbreitet wird, den Vorzug behauptet und sich durch die Erfahrung als nützlich bewährt. Die Bewohner mehrerer Weingegenden von Frankreich und Ungarn bedienen sich dessen nicht nur seit langen Jahren mit gutem Erfolg, sondern es ist solches auch in neueren Zeiten in Deutschland in mehreren Gegenden Frankens, Schwabens und des Rheines mit erfolgter Zufriedenheit angewendet worden . . . . Gewiß wird daher jeder Ortsvorstand in der Bereitwilligkeit des vernünftigen Teiles seiner Gemeinde eine zureichende Unterstützung für die Ausführung derselben finden. Sollten indessen an Orten, wo die Mehrheit der Gemeinde sich eine solche Ausführung angelegen sein läßt, einzelne Glieder durch ihr Nichtbeitreten der ganzen Anstalt ein Hindernis in den Weg legen wollen, so ist, insoweit sie solches betrifft, nicht nur ihr Anteil auf ihre Kosten auszuführen, sondern auch vom Ortsvorstande die Anzeige zur weiteren Rüge bei dem Amte zu machen.“

Ein Jahr später erschien wiederum eine Verordnung der kurfürstlichen Landesdirektion<sup>281)</sup>:

„Jeder Eigentümer eines Weinberges, auch derjenige, welcher mit einem Gute an denselben angrenzt, oder der ein solches zwischen Weinbergen besitzt, ist schuldig, von der Zeit an, wo der Stock zu treiben anfängt, bis Ende Juni, sodann von Anfange des Septembers bis zur Weinlese in seinem Gute stets diejenigen Materialien bereit zu halten, welche das Räuchern erfordert.“

Besonders interessant ist die Frostschutzverordnung aus dem 1803 für Württemberg,<sup>291)</sup> die wir hier, abgesehen von der längeren Einleitung, mit den Titeln wörtlich abdrucken:

„Gnädigste Verordnung, die Sicherung der Weinberge durch Rauchfeuer  
gegen die Nachtfröste im Frühjahre betreffend.

Carl Ludwig von Gottes Gnaden, königlicher Prinz von Ungarn und Böhmen, Erzherzog zu Österreich, Administrator des Hochmeistertums in Preußen u. s. w. Wir haben uns umständlich vortragen lassen und mit ganz besonderem Wohlgefallen vernommen, wie unverdrossen mehrere Unseres hohen Ordens Gemeinden des Tauber- und Neckaroberamtes im letztverwichenen Frühjahr sich bestrebt haben, zur Sicherung der Weinberge durch Rauchfeuer gegen die Nachtfröste im Frühjahr zu jenen bewährten Vorsichtsmaßregeln beizuwirken, die schon früher in mehreren Gegenden von Ungarn und Frankreich und Schwaben, Franken und am Rhein mit dem glücklichsten Erfolg angewendet worden sind.

\*) Solche Auffassungen spuken tatsächlich gelegentlich heute noch in den Köpfen von Einzelgängern, denn bei Vorträgen wurde Kessler dieser Einwand schon allen Ernstes entgegeng gehalten.

Da uns nichts mehr am Herzen liegt, als die Nahrungszweige und den Wohlstand Unserer getreuen Unterthanen im allgemeinen nach Möglichkeit zu sichern und zu erhöhen, sofort auch insbesondere die in manchem fruchtbaren und gelinden Frühjahre so schöne Hoffnungen der Weinbergsbesitzer dem unglücklichen Zufalle einer oft nur einzigen frostigen Nacht zu überheben, und da auch gegen die unter so vielen anderen durch erfahrene Landwirte angestellten Versuchen das Anzünden von Rauchfeuer in den kalten Frühlingsnächten, um dadurch einen starken Rauch über die Weinberge auszubreiten, als das wirksamste Mittel anerkannt worden ist: so haben wir den folgenden, zur zweckmäßigen Anwendung dieses Mittels, von Unserer nachgeordneten hochfürstlichen Regierung in untertänigstem Vorschlag gebrachten Vorbereitungen und Maßregeln Unseren höchsten Beifall verliehen:

1. Jeder Eigenthümer soll im Frühjahre, wenn die Weinstöcke ausgegraben werden, seinen Weinberg vorzüglich auf der Ost-, Nord- und Nord-Westseite mit Feueranlagen versehen, die am zweckmäßigsten auf ungebauten Flecken, Rangen oder Steigen in gehöriger Entfernung voneinander so angebracht werden müssen, daß das Feuer in Gruben gleichsam verschlossen, durch seine zu starke Hitze in der Nähe befindliche Weinstöcke nicht beschädigen und mit geringer Mühe gedämpft werden könne.

2. Im nehmlichen Zeitpunkte sollen die brennbaren Materialien, feuchtes Rebholz, Wellen von Tannen oder Fichtenreisern, Moos, Holzspäne, Sägemehl, Gerberlohe, Hecken und Gesträuche und dergleichen, jenachdem eines oder das andere minder kostspilich ist, gesammelt, in den Feueranlagen aufgeschüttet, mit umgekehrtem Rasen oder feucht gehaltener Erde zugedeckt und in dieser den Grabhügeln ähnlicher Lage bis zum Augenblick ihrer Benutzung vorräthig gehalten werden.

3. Die Bestimmung der Zeit, ob — und wann mit dem Anzünden dieser Brennhaufen angefangen werden mußte, ist unter Leitung des Beamten von jedem Ortsvorstand zu besorgen, welche wenigstens an den Hauptörtern einen Seelsorger, der sonstig wohl erfahrenen Einwohner ausfindig zu machen, der ausschließend, oder abwechselnd mit dem schnelleren, oder langsameren Vorrücken des Weinstockes, und bis zur Hälfte des Junius den Thermometer beobachtet und den verlässigsten Maßstab abgegeben wird, wann die Gefahr des Frostes wirklich bevorsteht.

4. Da diese Zeit der Gefahr aber sehr veränderlich ist, und nicht allemal mit der Zuversicht bestimmt werden kann, weil die Kälte verschiedentlich und öfters geschwind so stark wird, daß die Weinstöcke, jedoch selten, schon vor oder um Mitternacht, meistens aber gegen Tag, und manchmal auch dann, wo man die Furcht schon aufgegeben hat, noch erfroren sind, so muß der Beobachter des Thermometers auf die Witterung auch stets wachsam seyn, gewöhnlich aber gegen 2 Uhr des Morgens seine Aufmerksamkeit verdoppeln, den Amts- oder Ortsvorstand durch den aufzupassenhabenden Nachtwächter oder Gehilfen zeitig über die bevorstehende Gefahr unterrichten; welcher sodann augenblicklich ein durchaus hörbares Glocken- oder sonstiges vorher bekannt zu machendes Zeichen zur allgemeinen Wachsamkeit geben läßt; — vermehrt sich die Gefahr, dann erfolgt das zweite Zeichen zur wirklichen Anzündung der Brennhaufen, deren möglichst dicker Rauch durch feuchte Bedeckung und gleichbaldige Unterdrückung einer ebenfalls auflodernden Flamme so lang unterhalten werden muß, bis der Beobachter des Thermometers, vielleicht erst manchmal einige Stunden nach Sonnenaufgang, das Ende der Gefahr durch ebendasselbe zum drittenmale wiederholte Glocken- oder sonstig hörbares Zeichen allgemein verkündet.

5. Die Vorsteher der geringeren von den Amts- und Hauptortschaften ohnehin nicht zu weit entfernten Gemeinden haben auf das Glockenzeichen von jenen, besonders bei kalter Luft und hellem Himmel, die sorgfältigste Aufmerksamkeit zu verwenden, davon sich sogleich die Anzeige machen zu lassen, und ihre Gemeindeglieder sodann ohne den mindesten Aufenthalt von der bestehenden Gefahr ebenfalls zu unterrichten, damit diese auf die eben beschriebene Art ihre Fluren mit einem immerwährenden dicken Rauch überziehen und somit ihre begründeten Hoffnungen auf einen so leicht vereitelten Herbst lang möglichst sich erhalten.

6. Keinem Weinbergsbesitzer ist erlaubt, dieser gemeinnützigen Anstalt aus irgend einem Scheingrunde sich zu entziehen, und jeder Nachbar wird hierdurch ermächtigt, auf amtliche, ohne alle Verzögerung beizutreibende Kosten des Boshaften oder nachlässigen Nebenliegers dessen Antheil auszuführen.

7. Jeder der frevelmüthig sich begeben läßt, diesem einem so ansehnlichen Theile Unserer hohen Ordens Unterthanen Nahrung und Wohlstand sichernden Vorkehrungen nur das mindeste Hindernis in den Weg zu legen oder die angelegten Brennhaufen zu beschädigen, soll gleich jedem anderen Feldfrevler von seiner gewöhnlichen Amtsstelle angemessen gerügt oder bestraft, und davon Unserer nachgeordneten Regierung sogleich der Anzeigebericht erstattet werden.

Und indem Wir sofort Unserer nachgeordneten Regierung zu Mergentheim hiedurch gnädigst befehlen, auf den gehorsamsten Vollzug dieser Unserer Landesväterlichen Verordnung pflichtschuldigt zu wachen. Die Wirkungen der Anstalt alljährlich genau beobachten zu lassen, über die allenfallsigen Verbesserung- und Erleichterungen des Ganzen seiner Zeit gutächtlich weiteres zu berichten, und Uns zugleich denjenigen Beamten, Vorsteher und Gemeinde jedesmal namentlich bekannt zu machen, welche zur Erhaltung und Erhöhung der

Weinbau-Industrie am ausgezeichnetsten mitgewirkt haben, setzen Wir zugleich auf die eigene Klugheit Unserer getreuen Unterthanen, die sich der Weinbergskultur widmen, Unser gnädigstes Vertrauen, daß sie, ohne allen nur ihre eigenen Vortheile erzielen sollenden und sonstigen wohltätigen Zwang, gerne sich beeifern werden, jenen so unglücklichen Ereignissen zeitlich entgegen zu wirken, die ihre so großen Hoffnungen des 1795er und 1802er Frühjahrgang allein zerstört haben, und deren zeitigen Anwendung in der Nacht vom 14ten auf den 15ten Mai laufenden Jahres (wo schon um 1 Uhr morgens ein schwacher Reif sich eingestellt, der Thermometer um  $\frac{3}{4}$  vor 4 Uhr das 0 schon erreicht hatte, und die Rauchdecken der Weinberge bis nach 7 Uhr morgens erhalten werden mußten) den fleißigen Bürgern Unserer Residenzstadt Mergentheim jene tröstliche Aussichten auf einen ihre besondere Mühe vergeltenden Herbst bereits eröffnet hatten, welche die bekannten späteren und unabwendbaren Ereignisse wieder um größtentheils entfernen.

Urkundlich Unseres höchstens Handzeichens, und begedruckten geheimen Kanzlei-Insiegels. Gegeben Wien den 9. November 1803.

Carl  
Hoch- u. Teutschmeister.“

Wir haben damit gleichzeitig den ersten Bericht über eine erfolgreiche Frostbekämpfung in Bad Mergentheim vor fast 150 Jahren.

Mit dem einsetzenden 19. Jahrhundert häufen sich nun die Nachrichten über das Räucherverfahren. Danach wurde diese Frostschutzmaßnahme im Würzburgischen um 1803, in der Rheinprovinz um 1821, an der Mosel (bei Zell) um 1822 und bei Ahrweiler um 1825 eingeführt. Wenn trotzdem bei der Winzerbevölkerung das Interesse bald wieder erlahmte, so lag das höchstens teilweise an der Nachlässigkeit der Winzer oder gar an der der Regierung. Müller-Thurgau,<sup>269</sup> der sich mit dem langsamen Zusammenbruch der Räucherwehren eingehend beschäftigt hat, kommt auf Grund des Aktenmaterials zu folgendem Ergebnis:

„Ich habe die Überzeugung, daß das Resultat jener Räucherungen ein günstigeres gewesen wäre, wenn die Wissenschaft der Praxis damals besser an die Hand gegangen, daß man alsdann die Hoffnung nicht verloren und die Anwendung des Räucherns unter entsprechenden Umständen nicht aufgegeben hätte. Als besonders nachteilig wirkend hat sich das Dogma erwiesen, daß erst das rasche Auftauen durch die Sonne den Tod herbeiführe, und daß, wenn man dies durch Rauch verhindere, die gefrorenen Triebe und Blätter am Leben blieben. Hätten die Leute gewußt, daß es einzig und allein darauf ankommt, das Gefrieren zu verhindern, so würden sie wohl anders verfahren sein, und jene Fälle, wo es nicht gelang, die infolge niederer Temperatur gefrorenen Sprosse durch Rauchfeuer zu retten, wären nicht als Mißerfolge des Räucherns angesehen worden.“

Es ist verständlich; daß die wiederholten Mißerfolge auf die Winzerschaft entmutigend wirkten und so die in der besten Absicht von den Regierungen gegebenen Verordnungen langsam einschliessen. Erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde das Räuchern wieder aufgegriffen und Räucherwehren neu gebildet. Insbesondere verdienen hier zwei Wehren wegen ihrer Organisation eine Erwähnung; es sind das die Wehren von Kolmar (1884) und Ahrweiler (1887). Ausgehend von der Erkenntnis, daß das Räuchern aber auch nur dann einen Erfolg zeitigen könne, wenn sich auch die angrenzenden Gemeinden an der Räucheraktion beteiligen, strebte der damalige Landrat in Ahrweiler, Heising, den Zusammenschluß von möglichst viel Gemeinden an, und tatsächlich gelang es ihm, wenn auch erst nach jahrelangen Bemühungen, alle Gemeinden der Ahr von Kreuzberg bis zum Ausgang des Ahrtales auf eine Strecke von etwa 27 km zu einer gemeinsamen Räucherwehr zusammenzuschließen.

Zum Räuchern selbst benutzte man anfangs jegliches Material, vorwiegend Abfälle, die möglichst viel Rauch und Qualm erzeugten: grünes Reisig, Holz, Stroh, Mist, Unkraut und dergleichen und feuchtete unter Umständen das Material noch an. Später setzte man Teer zu und ging schließlich mehr und mehr zu reinem Steinkohlenteer und Naphta über, besonders nachdem Neßler<sup>273</sup> die Unschädlichkeit des Terrauches auf die grünen Teile der Reben geprüft hatte. Verbrannte man den Teer ursprünglich in ausgehobenen Gruben, so ging man wegen der damit verknüpften Verluste durch Versickern und des Verderbs der Bodenstelle, an der das Teerfeuer gebrannt hatte, bald davon ab und benutzte nun offene eiserne Pfannen, teilweise auch fahrbare Räucherwagen. Dies trifft besonders für Kolmar zu, während man im Ahrtal an den offenen Teerfeuern festhielt.

Lestout in Bordeaux hatte die Räuchermasse, etwa 7 kg, in kleine Holzkistchen eingegossen, die nur ausgelegt und angezündet zu werden brauchten; die damit erzielten Erfolge waren aber wenig befriedigend.

Auch die Räucherkerzen von Neßler haben sich nicht einbürgern können. Allerdings nicht wegen schlechter Rauchentwicklung, sondern weil die Anwendung im großen viel zu teuer zu stehen kam.

Schließlich baute man besondere Räucheröfen. Um die vielen Räucherstellen rasch anzünden zu können, wurden sogar elektrische Zündungen ausgearbeitet (Lestelle, Schaal und Oechslin), die allerdings schon allein infolge ihres Preises keinen Einzug in die Praxis fanden.

Um die Jahrhundertwende erschienen die Lemström'schen Fackeln auf dem Markt. Diese bestanden aus einem Torfzylinder, der mit einem Gemisch von Harz, Kohle, Torf und Teer gefüllt war. Die Fackeln wurden in Abständen von etwa zehn Metern ausgelegt. In der Anleitung sagt Lemström<sup>217)</sup>:

„. . . . . Nach dem Anzünden entwickeln die Fackeln während  $1\frac{1}{2}$ —2 Stunden hinreichend Rauch und Wasserdampf zum Herstellen des erforderlichen Schutzes; nach diesem Zeitraum aber entwickeln sie, die jetzt nur eine einzige glühende Masse geworden, nur Wärme. Um dieselben zum Hervorbringen von Wasserdampf zu zwingen, muß man jede Fackel mit einer Handvoll feuchtem Torfmoos oder Gras bedecken . . . .“

Das zeigt, daß man zu dieser Zeit der abschirmenden Wirkung des Rauches noch einen größeren Nutzeffekt zuschrieb als der von den Feuern abgegebenen Wärme. Auch Mc Adie<sup>241)</sup> nahm 1909 noch denselben Standpunkt ein:

„Ich kam zu der Überzeugung, daß alle jene, welche im Punkte Frostabwehr für Wärme und nicht für Rauch stimmen, keinen korrekten Standpunkt einnehmen.“

Die Lemström'schen Fackeln wurden in Deutschland von Zweifler<sup>430, 431)</sup>, Behrens und Steglich<sup>368)</sup> untersucht; die einzelnen Beurteilungen gehen sehr stark auseinander.

Die eingehende Untersuchung des Räucherverfahrens setzte mit dem anbrechenden 20. Jahrhundert ein. Der Anstoß hierzu scheint von amerikanischer Seite aus erfolgt zu sein, da sich dort die Bedeckungsmethoden bei den vor allem zu schützenden Bäumen ungenügend bewährten und auch praktisch kaum durchführbar waren. Namen wie Adamson<sup>1, 2, 3, 4)</sup>, Mc Adie, O'Gara<sup>295, 298)</sup> und Sullivan<sup>376)</sup>, um nur einige zu nennen, sind mit der Entwicklung des Frosträucherns verknüpft.

Im Jahre 1914 hat bei uns zum ersten Male Löschnig<sup>223, 224)</sup> in Österreich einige Versuche messend durchgeführt und zwar mit Räucherpech und mit verdampfendem Wasser. Von 1919—1920 hat sich in Holland ein Reichsausschuß zum Schutze gegen den Schaden von Nachtfrost mit dem Räucherproblem beschäftigt. Ferner ist hier ein von W. Schmidt, 1928, durchgeführter Feldversuch zu nennen, bei dem nicht nur die Temperaturverhältnisse, sondern auch die der Strahlung beobachtet wurden.

Außerdem liegen noch mehrere Versuche vor, die von Kessler seit 1928 in Oppenheim bezw. unter seiner Leitung vom Reichsausschuß für Frostabwehr im deutschen Weinbau in den Weinbaugebieten Rheinhessens, an der Mosel und Ahr durchgeführt wurden. Auf die dabei gewonnenen Ergebnisse werden wir später eingehen.

## 2. Die Frosträucherversuche in Nordamerika.

Aus den Vereinigten Staaten von Amerika liegt kein Versuch vor, der die Wirkung einer Rauchdecke als Frostschutzmaßnahme in ihrer Größe einwandfrei zu zeigen imstande wäre. Es muß das darauf zurückgeführt werden, daß dort der Rauch meist durch Verbrennen von Rohöl erzeugt und die Verbrennung nicht an wenigen Stellen, sondern in vielen kleinen offenen Behältern durchgeführt wurde. Schon aus diesem Grunde läßt sich eine Trennung des Gesamteffektes in die durch Rauch, bezw. durch Heizung bedingten Teileffekte nur schwer durchführen. Überhaupt geht aus den amerikanischen Arbeiten immer wieder deutlich hervor, daß an eine scharfe Trennung zwischen diesen beiden Effekten vielfach gar nicht gedacht wird. So wird z. B. in einem Bericht über einen Versuch, bei dem leichte Öldestillate in je einem Ofen auf 50 m<sup>2</sup> verbrannt wurden, andauernd von Räuchern gesprochen!

Dagegen können wir hier einen von Mc Adie berichteten Versuch anführen, bei dem 40 Tonnen nasses Heu in Verbindung mit Holz im Laufe einer Nacht verbrannt wurden. Wir werden diesen Versuch, da er von Mc Adie als Heizversuch bezeichnet wurde, weiter unten ausführlich besprechen und die von ihm gezogenen Schlußfolgerungen kritisch beleuchten. Schon in diesem Zusammenhang müssen wir aber sagen, daß die Wirkung der Rauchdecke auf die darunter frei aufgestellten Thermometer sehr gering war; denn während die Temperatur im Freien bis auf — 7,2 Grad C sank, betrug das Minimum innerhalb des geschützten Gebietes — 6,6 Grad C.

Auch O'Gara bezeichnet Stroh und Stallmist zwar als ausgezeichnete Materialien zum Räuchern, aber keineswegs als geeignet, um Temperaturerhöhungen zu erzielen. Adamson<sup>1)</sup> kommt auf Grund seiner Erfahrungen zu folgender Ansicht:

„Wenn man den Temperaturverlauf unter der Ruß- und Rauchdecke vergleicht mit dem Temperaturverlauf in offenem Gelände, so wird man erkennen, daß die Rauchdecke ein Sinken der Temperatur um ungefähr 2 Stunden zurückzuhalten imstande ist.“

Im Jahre 1920 hat Young<sup>201)</sup> Ausstrahlungsmessungen in einer Citrusplantage, die mittels offener Öfen beheizt wurde, durchgeführt. Im Mittel war eine 9%ige Abnahme der Ausstrahlung unter der Rauchdecke zu erkennen, sie erreichte maximal 26%. Aus diesen Zahlen folgert Young, daß die Verminderung der nächtlichen Ausstrahlung durch die erzeugte Rauchwolke in dem Problem der Frostbekämpfung eine unbedeutende Rolle spielt.

3. Die Frosträucherversuche in Österreich.

Im April 1914 hatte Löschnig einen Frostschutzversuch mit Räucherpech durchgeführt und dabei ein Versuchsfeld in der Größe von  $50 \times 50$  m, das eben zwischen anderen Weinbergen lag, benutzt. Die Räucherstellen, insgesamt 50, waren gleichmäßig über das Gelände verteilt. Es wurde darauf gesehen, daß das Räucherpech mit möglichst geringer Wärmeentwicklung brannte, um festzustellen, inwieweit die Rauchdecke allein die vom Boden ausgestrahlte Wärme zurückzuhalten vermochte.

Zur Beobachtung der Temperaturverhältnisse über dem Versuchsfeld selbst dienten 29 strahlungsgeschützte Thermometer, die teils in 50 cm, teils in 150 cm Höhe über dem Boden angebracht waren. Um den Effekt des Räucherns feststellen zu können, waren außerdem noch 4 Thermometer und 4 Thermographen in jeweils 80 m Abstand von den Seiten des quadratischen Versuchsfeldes in gleichfalls 50 cm Höhe aufgestellt worden.

Die Ergebnisse dieses Räucherversuches sind in Abbildung 76 wiedergegeben. Da wir mit der von Löschnig gezogenen Schlußfolgerung einig gehen, so wollen wir ihn selbst sprechen lassen:

- „1. Durch Räuchern kann eine Temperatursteigerung direkt nicht erzielt werden; es tritt bloß eine Verminderung der Wärmeabfuhr durch Strahlung ein.
2. Die Heizungen mit Räucherpech ergaben anfangs keinen ersichtlichen Erfolg. Bei der zweiten Ablesung um 01 Uhr 30 wurde eine Temperatursteigerung von 2,0 Grad und um 02 Uhr 40 eine solche von 1,4 Grad C, im Durchschnitt 1,1 Grad C erzielt.

Der Erfolg der Räucherung ist nicht anhaltend und verliert sofort nach Abziehen des Rauches seine Wirksamkeit.“

W. Schmidt führte in der Frostnacht vom 11./12. Mai 1928 einen Räucherversuch durch, bei dem als Versuchsfeld ein Grundstück diente, das schon früher von Löschnig zu Versuchszwecken benutzt worden war. Von diesem Feld sollte ein bestimmtes Stück im Ausmaß von 200 auf 300 m in einer Frostnacht intensiv mit den Räucherboxen der Teerag beräuchert werden. Das schwach geneigte Versuchsfeld war von Weinbergen bedeckt und zwar in schmalen, dem Gefälle nach verlaufenden Parzellen. Dazwischen lagen einige Parzellen Ackerland. Den Norden, Süden und Südosten nahm Wiese ein (Abb. 77, das beräucherte Gebiet ist umrahmt eingezeichnet).

Zur Feststellung der Räucherwirkung wurden Beobachtungen der Lufttemperatur, der Ausstrahlung und der langsamen Luftströmungen unter der Rauchdecke und außerhalb derselben vorgenommen. Etwa in der Mitte des beräucherten Gebietes stand eine meteorologische Hütte mit Thermometer und Thermograph. An 13 Stellen über dem eigentlichen Versuchsfeld waren Pfähle mit Extremthermometern nach Six ohne jeden Strahlungsschutz aufgestellt. Die Stellen 2, 3, 7

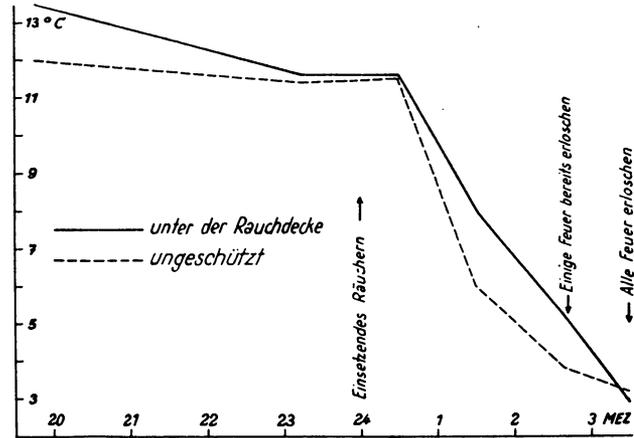


Abb. 76. Temperaturverlauf in 50 cm Höhe bei dem Versuch von Löschnig, 21./22. April 1914.

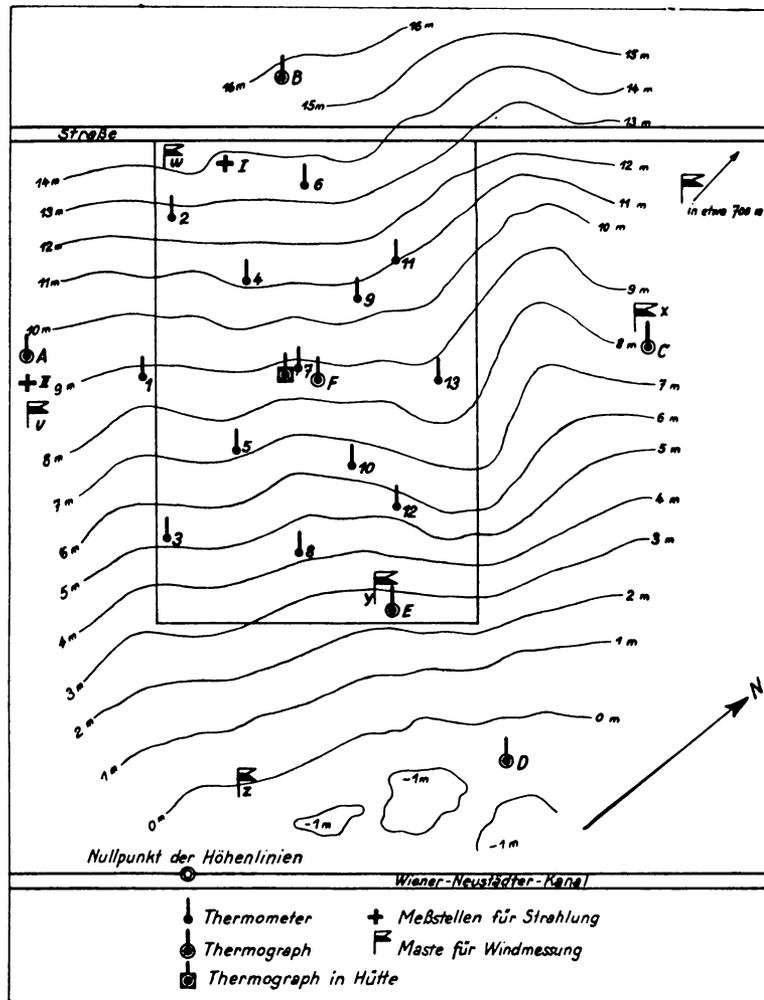
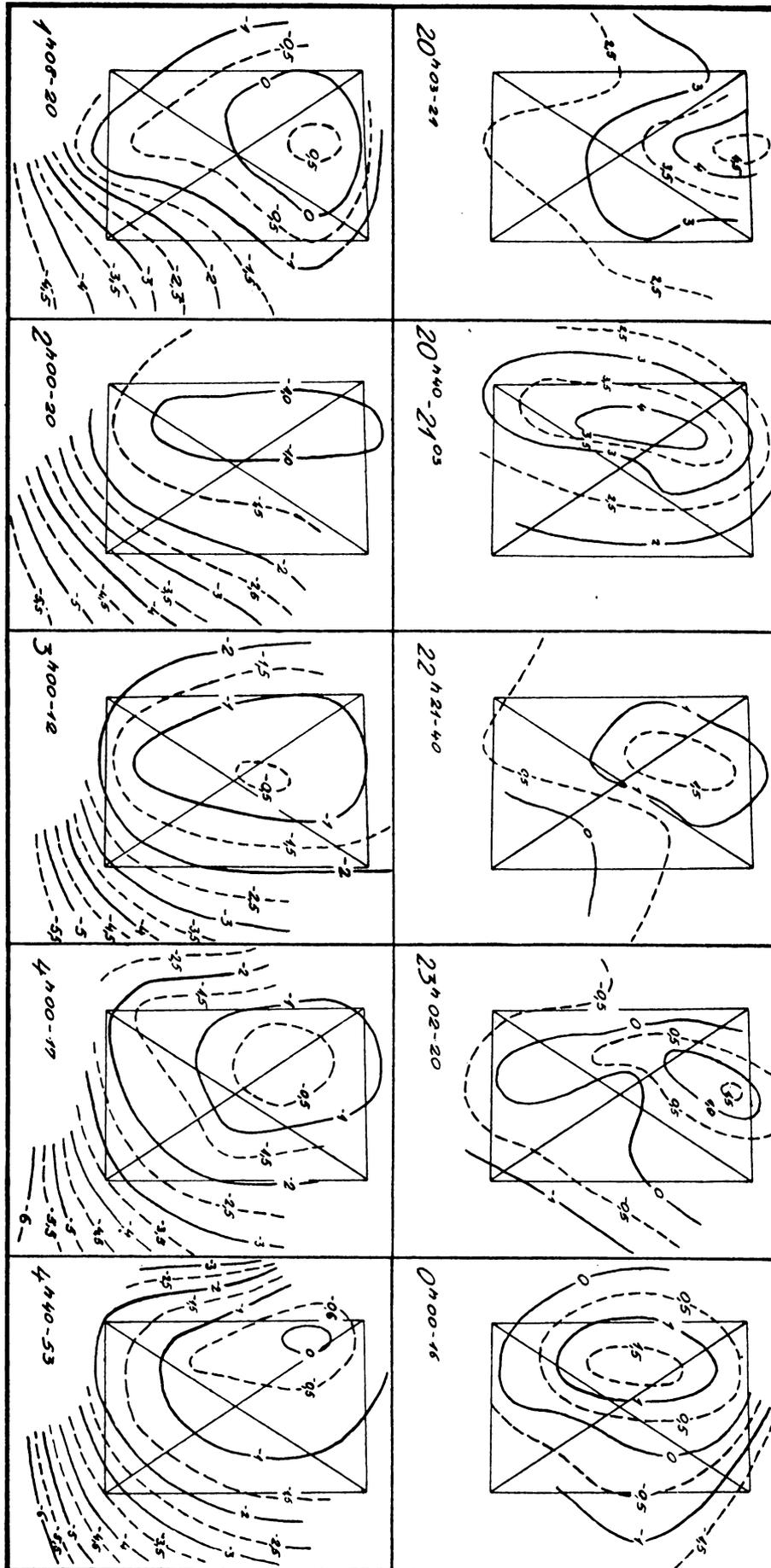


Abb. 77. Versuchsfeld bei dem Räucherversuch von W. Schmidt.



150 cm Höhe

Abb. 78a. \*) Isothermenkarten zu allen Beobachtungsterminen der Frostnacht vom 11./12. Mai 1928. 150 cm über dem Boden. Beräucherter Gebiet durch Diagonalen hervorgehoben.

\*) Die Abbildungen 78a, b sind der Arbeit von W. Schmidt, Meteorologische Feldversuche über Frostabwehrmittel, Anhang zum Jahrb. d. Zentralanstalt f. Meteorologie und Geodynamik, Jahrgang 1927 entnommen.

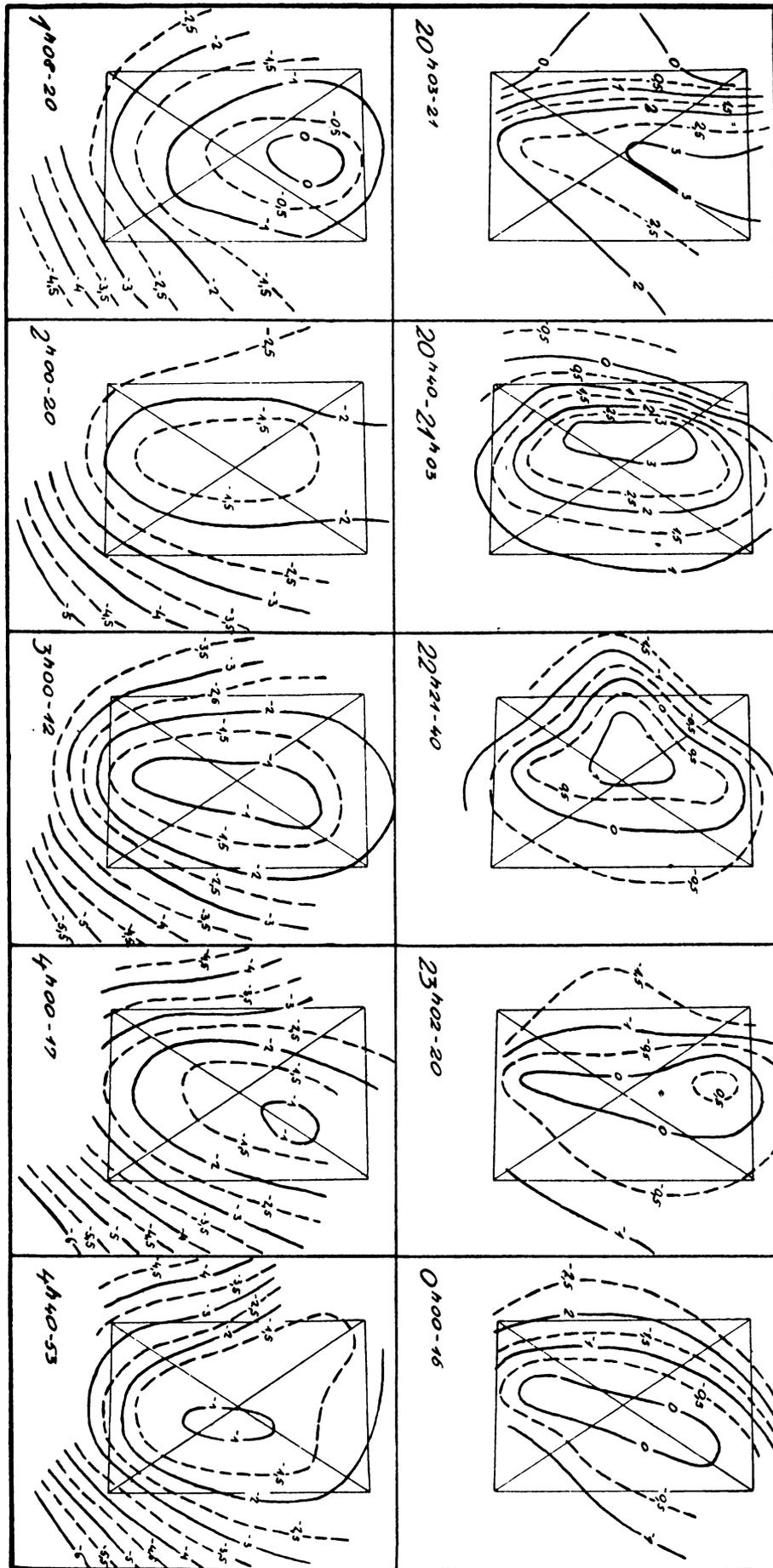


Abb. 78b. \*) Isothermenkarten zu allen Beobachtungsterminen der Frostnacht vom 11./12. Mai 1928. 5 cm über dem Boden. Beräucherter Gebiet durch Diagonalen hervorgehoben.

5 cm Höhe

und 11 hatten Thermometer in 5, 10, 20, 50, 100 und 150 cm Höhe, die übrigen in 5 und 150 cm. An den Punkten A, B, C, D und F standen Thermographen in 50 cm Höhe, in B und E noch je einer mit dem Thermometerkörper in 5 cm Höhe über dem Boden. Sie alle hatten einen einfachen dünnen Aluminiumschirm als Strahlungsschutz. Die Strahlungsinstrumente, zwei Pyrgometer nach Ångström, waren an den Punkten I und II aufgestellt. Außerdem stand noch ein Thermoelement mit Goldspiegel von Zeiß zu Strahlungsmessungen zur Verfügung. Ferner waren sechs 9 m hohe Maste (U bis Z) aufgerichtet worden, an denen sich Platten zur Beobachtung der schwachen Windbewegung emporziehen ließen.

Die Räucherboxen standen reihenweise in Abständen von je 10 m. Sie wurden um 00 Uhr 30, als die Temperatur an den tiefsten Stellen bereits etwas unter den Gefrierpunkt gesunken war, angezündet. Von etwa 01 Uhr 30 an wurden aber auch von anliegenden Weinbauern Reisigfeuer angezündet, so daß sich nun zum Teil auch über dem nicht mit den Teerdosen beräucherten Gebiet Rauch ausbreitete.

Die Six'schen Thermometer wurden von 20 Uhr 00 bis 05 Uhr 00 alle Stunden abgelesen und zusammen mit den Thermographenaufzeichnungen zu Isothermenkarten verarbeitet (Abb. 78). Der Vergleich dieser Kärtchen zeigt, daß sich eine im Hang auftretende flache Rippe die ganze Nacht hindurch durch höhere Temperaturen bemerkbar macht. Weiter erkennt man, daß um 03 Uhr 00, als die Räucherboxen schon über 2 Stunden brannten, die Temperaturverteilung in 150 cm Höhe über dem ganzen Versuchsfeld viel gleichmäßiger war als vor Einsetzen der Räucherung um etwa 24 Uhr 00; selbstverständlich hatte sich dafür das Temperaturgefälle am Rande sehr verstärkt. Die Wirkung des Räucherns reichte jedoch nicht aus, den Abfall der Temperatur auch nur zu verhindern, geschweige denn gar einen Anstieg der Temperatur über dem Versuchsfeld hervorzurufen.

Zur Bestimmung des durch das Räuchern erzielten Effektes hat Schmidt, um den Einfluß der Geländeneigung nach Möglichkeit zu berücksichtigen, mehrere Schnitte durch das Versuchsfeld gelegt und die Temperaturdifferenz zwischen dem geschützten und ungeschützten Gebiet bestimmt. Auf Grund dieser Vergleiche kommt er zu folgendem Ergebnis:

„Wir werden also als bewiesen annehmen, daß in dem angegebenen Fall durch Räuchern eine Temperaturerhöhung von etwa 2,5 Grad C erzielt wurde, verglichen mit jener, die ohne jeden Schutz eingetreten wäre. Ein vollständiges Hemmen des Temperaturrückganges war aber nicht möglich, dürfte sich auch schon aus der physikalischen Analyse der Vorgänge als ausgeschlossen erweisen.“

Um die Angabe dieses Effektes hier kritisch betrachten zu können, haben wir der Einfachheit halber die in 50 cm Höhe an den Six-Thermometern abgelesenen Temperaturen jeweils gemittelt, und in gleicher Weise

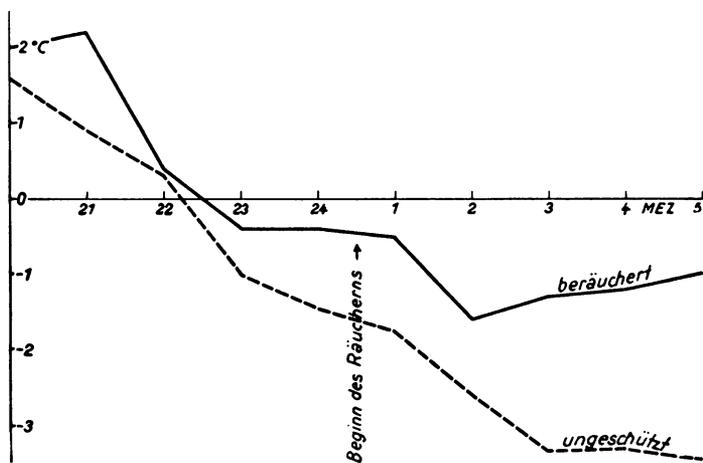


Abb. 79. Temperaturverlauf bei dem Räucherversuch von W. Schmidt, 11./12. Mai 1928.

die Angaben der Thermographen A und B, die ja beide etwa in gleicher Höhe außerhalb des beräucherten Gebietes standen. Die Werte sind in Abbildung 79 kurvenmäßig wiedergegeben. Wir finden die Angaben von W. Schmidt im allgemeinen bestätigt. An dem Temperaturverlauf über dem eigentlichen Versuchsfeld ist jedoch der plötzliche Verzug des Abfalles um 23 Uhr sehr auffällig, der zu einer Zeit eintrat, als noch gar nicht geräuchert wurde! Was die Angabe des Effektes von 2,5 Grad C betrifft, so können wir auch auf Grund der Abbildung 79 zwar ebenfalls eine solche Temperaturdifferenz um 05 Uhr 00 feststellen, wobei wir jedoch hinzufügen wollen, daß es sich bei dieser Angabe um den Maximalwert handelt. Von viel größerer Bedeutung ist aber, daß das später beräucherte Gebiet schon von vorneherein wärmer war als das ungeschützte, was sich natürlich in der Angabe des Effektes bemerkbar machen mußte. Denn wir müssen eben bei dem Vergleich der Instrumentaltemperaturen des geschützten und ungeschützten Gebietes bedenken, daß die mit Aluminiumschirmchen versehenen Thermographen etwa die wahre Lufttemperatur angaben, indes die ungeschützt aufgestellten Six-Thermometer sich zum mindesten vor dem Räuchern stark abkühlten. Wir werden die schon von vorneherein bestandene Temperaturdifferenz zweifelsohne mit 1 bis 1½ Grad C ansetzen dürfen. Da W. Schmidt in dieser Nacht den Ausstrahlungsschutz der erzeugten Rauchdecke zu 30—40 % gemessen hat, derselbe aber bei 100 %igem Schutz bei Thermometern der benutzten Bauart eine Erhöhung der Instrumentaltemperatur um etwa 1,5 Grad C bewirkt, so kämen also nur vielleicht 0,5 Grad C des oben angeführten Effektes auf Rechnung der Rauchdecke. Der dann noch verbleibende geringfügige Temperatureffekt dürfte auf die Heiz-

wirkung der Teerdosen, die ja reihenweise in Abständen von 10 m aufgestellt waren, zurückzuführen sein. Der Versuch von W. Schmidt ist also als kombinierter Heiz- und Räucherversuch zu bewerten. Leider macht aber W. Schmidt keine Angaben über die Menge des bei diesem Versuch verbrannten Materials, so daß wir ihn in dieser Hinsicht nicht weiter auswerten können.

#### 4. Die Frosträucherversuche in Holland.

In den Jahren 1919 und 1920 hat sich in Holland ein Reichsausschuß zum Schutze gegen den Schaden von Nachtfrost mit dem Räucherproblem befaßt und eine Reihe von Versuchen bei Amersfoort und Elst durchgeführt.

In der Nacht vom 19./20. Mai 1919 sollten zwei verschiedene Geländestücke beräuchert werden; das eine Feld trug in voller Blüte stehende Erdbeeren, das andere war ein Obstgarten mit jungen Bäumen, die zwischen die Kartoffeln gepflanzt waren. Da aber das letztere Versuchsfeld an einen Wasserkanal grenzte, so trat in der Nacht Nebelbildung über ihm auf, was eine exakte Versuchsdurchführung verhinderte.

Über dem Erdbeerfeld wurde eine Anzahl strahlungsgeschützter Minimumthermometer so verteilt, daß sie sich nur einige Zentimeter über dem Boden befanden. Außerdem standen noch zwei in Hütten untergebrachte Thermographen zur Verfügung, von denen der eine sich im beräucherten Gebiet, der andere außerhalb desselben befand. Ihre Höhe über dem Erdboden betrug 22 cm.

Die Feuerstellen lagen alle in einer Reihe. Als Räuchermaterial wurden Hobelspäne mit Naphtalin angewendet. Dieses wurde in Häufchen von 5—8 kg verteilt; der Abstand der einzelnen Häufchen voneinander betrug 2—3 m. Der Ruß stieg etwa 8 m hoch und bildete eine nicht sehr dichte Decke; überhaupt hatte das Wechseln des Windes zur Folge, daß das geschützte Gebiet nicht dauernd unter dem Schutz der Rauchdecke stand, während über dem ungeschützten zeitweise Rauchwolken auftraten.

Wie aus den beigegebenen Temperaturmessungen (Abb. 80) hervorgeht, betrug der Unterschied der Lufttemperatur geschützt gegen ungeschützt maximal 1,1 Grad C. Bemerkenswert ist noch die Beobachtung, daß die Pflanzen des ungeschützten Feldes Eisansatz zeigten, die des beräucherten dagegen nicht; die Blüten blieben aber in beiden Fällen unbeschädigt, da das Temperaturminimum nur  $-2,1$  bzw.  $-1,0$  Grad betrug.

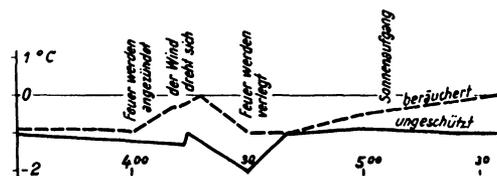


Abb. 80. Temperaturverlauf bei dem Versuch in Amersfoort, 19./20. Mai 1919.



Abb. 81. Temperaturverlauf bei dem Versuch in Amersfoort, 23./24. Oktober 1919.

Im Herbst desselben Jahres (23./24. Oktober 1919) fand ein weiterer Versuch statt; der Aufbau war dem vom Mai ähnlich. Da lediglich der Effekt des Räucherns festgestellt werden sollte, benutzte man ein Versuchsfeld ohne Pflanzenbestand.

Wie die Messungen (Abb. 81) zeigen, betrug der Temperaturunterschied diesmal etwa 2 Grad C. Dieser Effekt ist, zumal unter Berücksichtigung, daß die Messungen mit strahlungsgeschützten Thermometern vorgenommen worden waren, recht groß. Die Erhöhung der Lufttemperatur um diesen Betrag von 2 Grad hatte auch die Versuchsansteller vor die Frage gestellt, ob das Resultat wirklich nur durch verminderte Ausstrahlung erhalten worden war oder ob auch die Wärmeentwicklung der Feuer einen Einfluß auf die Temperatur ausgeübt hatte; die Lösung dieser Frage war allerdings mit dem damals gewonnenen Beobachtungsmaterial nicht möglich. Nach unserer Ansicht war sie zweifelsohne in erster Linie ein Erfolg der Beheizung, da 50—80 000 große Kalorien auf Flächeneinheiten von 4—9 m<sup>2</sup> in verhältnismäßig kurzer Zeit freigemacht wurden.

Bei einem Versuch am 2. Januar 1920 befand sich ein Thermometer in 15 m Abstand von der Räucherstelle und war in der Richtung des Windes aufgestellt; im Lee standen je zwei Thermometer in 10 und 20 m Abstand; von diesen war jeweils eines durch ein Holzschirmchen gegen die Strahlung der Feuerstelle geschützt (Abb. 82). Bei der Versuchsdurchführung zeigten sich im Luv keine Temperaturänderungen, es war also auch keine Erwärmung am Thermometer durch Absorption der von der Feuerstelle ausgehenden Strahlung festzustellen. Im Lee dagegen stiegen bei allen Thermometern die Temperaturen an, und zwar war der Effekt in 10 m Abstand größer als der bei 20 m, außerdem bei dem ungeschützten jeweils größer als bei den geschützten. Da der Himmel in dieser Nacht bedeckt und somit die Ausstrahlung geringfügig war, müssen wir den Effekt wohl ausschließlich

der Heizwirkung der Feuerstelle zuschreiben. Der geringere Effekt bei den beschirmten Thermometern beruht darauf, daß diese nicht so gut von der warmen Luft umspült wurden.

Am 19. März wurden vier Thermometer im Luv einer Räucherstelle, und zwar 10 m von ihr entfernt, in einer Reihe aufgestellt. Auch im Lee wurden Thermometerstaffeln aufgebaut; ihr Abstand vom Feuer betrug 10, 15 und 20 m. Infolge der Pflanzendecke und einer Reihe von Wassergräben, die das Versuchsfeld durchzogen, konnte der gleiche Bodenabstand der Thermometer nicht immer gewahrt werden. Die Nacht war klar und der Wind schwach. Der beobachtete Anstieg der Lufttemperatur um etwa 1 Grad C muß auch in diesem Falle auf Heizwirkung zurückzuführen sein.

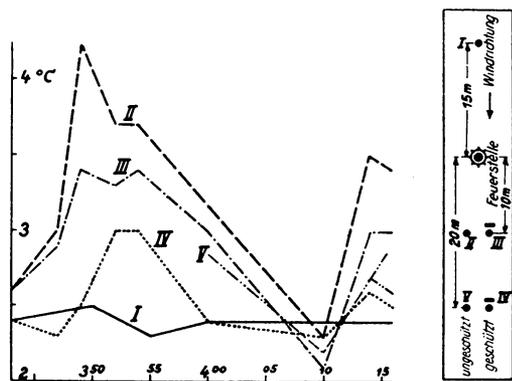


Abb. 82. Temperaturmessungen bei dem Versuch in Amersfoort, 2. Januar 1920.

lang in Betrieb genommen wurden, betrug der Effekt in der Mitte des Feldes gut 2 Grad C, am Rand nur mehr  $\frac{1}{2}$  Grad. In der zweiten Nacht, in der 30 Feuer unter zweimaligem Nachlegen eine Stunde lang unterhalten wurden, erreichte der Effekt nur etwa 1 Grad C.

Wir nehmen an, daß auch bei den späteren Versuchen in gleicher Weise wie bei denen vom 19./20. Mai und 23./24. Oktober 1919 die Thermometer gegen Strahlung geschützt waren, obwohl dies nicht mehr besonders vermerkt wurde. In diesem Falle können wir mit den von den holländischen Versuchsanstellern gezogenen Schlußfolgerungen nicht ganz einig gehen, da diese die Steigerung der Lufttemperatur auf Ausstrahlungsschutz durch die Rauchdecke, wir dagegen auch auf Heizwirkung zurückführen.

Für eine Temperaturerhöhung um 1 Grad C pro Hektar und Stunde werden 40—50 Gulden an Unkosten gerechnet. Daher werden die Ausgaben für das Räuchern nur dann als tragbar angesehen, wenn es nur wenige Stunden durchgeführt werden muß.

## 5. Die in Deutschland durchgeführten Frosträucherversuche.

### a) Der Frosträucherversuch 1928 in Oppenheim.

Nach einem großen Frühjahrsfrostschaden im Jahre 1926, bei welchem der Verlust für den deutschen Weinbau auf rund 40 000 000.— RM. geschätzt wurde, übertrug der Direktor der hessischen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau in Oppenheim am Rhein dem dorthin versetzten Landwirtschaftsassessor Dr. Kessler die Durchführung einer Frostabwehraktion. Den Gemarkungen Oppenheim und Dienheim, die zusammengehören, hatte das Schadensjahr 1926 einen Verlust gebracht, der zwischen 2—300 000 RM. geschätzt wurde.

Zwar bestand schon einmal um 1900 herum eine Frostabwehrorganisation in Oppenheim, doch war diese nach einem völligen Mißerfolg bei einem starken Frühjahrsfrost im Jahre 1902 wieder eingegangen. Der Schaden des Jahres 1926 belebte sie aufs neue, und die Leitung sollte nunmehr von Kessler in die Hand genommen und gleichzeitig der Versuch gemacht werden, Klarheit zu schaffen, ob das Frosträuchern überhaupt einen Wert hat. Die Literatur wies nämlich derart widersprechende Urteile über das Ergebnis des Frosträucherns auf, daß man kein klares Bild gewinnen konnte. Für 1927 war zunächst das Räuchern mit offenen Teerfeuern vorgesehen worden. Doch kam es glücklicherweise nicht zu einer Durchführung der Frosträucheraktion, weil die 100 Feuerstellen auf der 125 ha großen Gemarkung zum Schutze der Reben nicht ausgereicht hätten.

Für das Frühjahr 1928 wurden dann umfangreiche Vorbereitungen getroffen. Es wurden 37 000 kg Räucher- mittel und 2200 Räucherapparate beschafft. Inzwischen hatte es sich nämlich bei mehreren Versuchen herausgestellt, daß die Verbrennung von Räuchermaterialien in offenen Gruben mit großen Verlusten verbunden ist. Bei freiem Sauerstoffzutritt tritt außerdem eine vollkommene Verbrennung ein und damit eine schlechte Rußausbeute der Räucher- mittel. Das von L. Maurer konstruierte Oppenheimer Räucherrohr (Abb. 189, Taf. 6) verbesserte die Rußausbeute um ein Mehrfaches. An Stelle der Räucherrohre traten später die Räucherapparate Maurer (Abb. 190, Tafel 6), welche auf dem gleichen Prinzip beruhten. Das Rohr wurde so tief über die Oberfläche des brennenden Naphtalins gesenkt, daß nicht genügend Sauerstoff zur Verbrennung hinzutreten konnte. Infolge der nunmehr unvollständigen Verbrennung wurde die Rußausbeute schätzungsweise auf das fünffache gegenüber

der Verbrennung in offenen Gruben gesteigert. Der Preis des Räucherapparates betrug 3.—RM. In Abbildung 191, Tafel 6 ist dieser Räucherapparat tragbar dargestellt. Ähnlich, wenn auch nicht gleich gut, wirkte der Räucherapparat Waas, Geisenheim, welcher schon länger bekannt war. Sein Preis ist etwa der gleiche (Abb. 192, Tafel 6).

Der Frostwarndienst war so organisiert, daß die Wetterdienststelle Gießen die Beratung während der kritischen Zeit übernahm und telephonisch eine Diagnose der Gesamtwetterlage mit anschließender Vorhersage durchgab. Die örtliche Beobachtung des Taupunktes, die wochenlang durchgeführt wurde, ließ erkennen, daß die Frostvorhersage, die allein auf der Taupunktsbestimmung fußte, nicht zuverlässig war und daß ein Wachdienst eingerichtet werden mußte. Die Winzer in Oppenheim und Dienheim waren unterrichtet, daß sie auf die Alarmzeichen hin ausrücken mußten.

Bereits am 8. Mai 1928 war aus der Gesamtwetterlage erkenntlich, daß Einbrüche polarer Luft erfolgen mußten. In der Nacht vom 10./11. Mai trat nach Aufklaren ein so erheblicher Temperaturrückgang in der bodennahen Luftschicht ein, daß sowohl diese wie auch die folgende Nacht ausgesprochene Frostschadensnächte wurden. In der ersten Nacht wurden von 04 Uhr 30 bis 06 Uhr 00 mit Hilfe von 2200 Apparaten rund 30 000 kg Teer und Naphtalin über den in der Rheinebene liegenden Weinbergen, die 125—150 ha groß sind, verrußt, nicht etwa verbrannt! Eine 50—60 m dicke Rauchwolke lag über dem Gelände. Schäden wurden keine beobachtet, während Frostlagen der umliegenden Gemarkung schon in dieser Nacht erhebliche Schäden zeigten. Die niedrigste Temperatur erreichte um 00 Uhr in 1 m Höhe an frei aufgestellten Thermometern 0 Grad, um 04 Uhr —1,5 Grad. Weitere Beobachtungen liegen aus dieser Nacht nicht vor.

In der nächsten Nacht mußte bereits um 23 Uhr 30 alarmiert werden. Um 24 Uhr war schon 0 Grad in 50 cm Höhe erreicht und in 1 cm Höhe wurde bereits —1 Grad gemessen. Von 00 Uhr 30 bis 06 Uhr wurden etwa 50 000 kg Teer und Naphtalin über der vorhin genannten Fläche verrußt. Die Rauchwolke war um 06 Uhr, das heißt 1 $\frac{1}{4}$  Stunde nach Sonnenaufgang, noch so stark, daß die Autos auf der Landstraße Oppenheim-Dienheim mit Licht fahren mußten. Der Zugverkehr auf der Strecke Mainz—Worms war stark behindert, und die Züge mußten wegen mangelnder Sicht von den Bahnwärtern mit Signalen weiter geleitet werden. Leider standen nur 14 Thermometerstellen zur Verfügung, davon drei außerhalb des beräucherten Feldes. Auf Abbildung 83 erkennen wir, daß die Temperatur eines Thermometers in 1 m Höhe im beräucherten Feld nur gelegentlich auf 0,5 Grad unter Null sank, die eines Thermometers außerhalb der Rauchdecke jedoch bis —4 Grad zurückging. Das Minimum, das in dieser Nacht unmittelbar über dem Boden (2 cm) außerhalb der Rauchdecke gemessen wurde, betrug —6 Grad, innerhalb des beräucherten Feldes —1,8 Grad.

Im ganzen deutschen Weinbau, besonders aber auch in der unmittelbaren Nachbarschaft von Oppenheim und Dienheim, waren in den Frostlagen große Schäden aufgetreten. Der Verlust, der den deutschen Weinbau betroffen hatte, wurde auf rund 60 000 000.—RM. geschätzt. In Oppenheim dagegen war im beräucherten Feld praktisch überhaupt kein Schaden festzustellen. Nur an der äußersten Grenze des beräucherten Feldes, wo ganz vereinzelt noch einige Weinberge lagen, die nicht unter dem Schutz der dichtesten Rauchdecke standen, traten einige Schäden auf.

#### b) Die Versuche des Reichsausschusses für Frostabwehr 1929.

Der Erfolg dieser 1928 durchgeführten Frostabwehraktion in Oppenheim führte in Verbindung mit den katastrophenhaften Schäden der beiden vorhergehenden Jahre dazu, daß das Versuchswesen über die Verhütung der Frostschäden vom Reichsernährungsministerium aufgegriffen und finanziell unterstützt wurde.

Jedes deutsche Weinbaugebiet wollte nun seinen Frosträucherversuch haben, denn im Frosträuchern sah man damals das A und O der Frostschadenverhütung. Den weinbaulichen Fachstellen wurde die Durchführung der Versuche übertragen, während die Leitung O. Kessler hatte, der zum Geschäftsführer des „Reichsausschusses für Frostabwehr im deutschen Weinbau“ ernannt worden war.

Große Räucherversuche wurden eingerichtet, u. a. in Oppenheim (Rheinhessen), in Weinsberg (Württemberg), in Veitshöchheim (Franken), in Wallhausen an der Nahe, in Grünhaus an der Ruwer und ein weiterer im Ahrtal bei Ahrweiler. Bei einer Besichtigung der für das Frosträuchern vorgesehenen Flächen stellte Kessler fest, daß

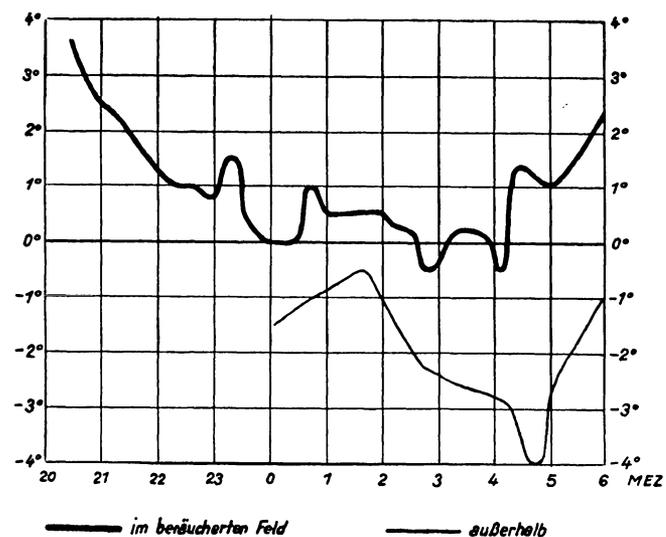


Abb. 83 Temperaturverlauf im beräucherten Feld und außerhalb. Räucherversuch vom 11./12. Mai 1928. Oppenheim.

in den meisten Fällen, vor allem aber im Ruwer- und Ahrtal, das Frosträuchern praktisch versagen muß. Die in den tief eingeschnittenen Tälern der Eifel und des Hunsrücks auftretenden Fallwinde mußten eine Frostscha-denverhütung durch Frosträuchern illusorisch erscheinen lassen. Daher wurden von ihm besondere Richtlinien für die vom Reichsausschuß für Frostabwehr im deutschen Weinbau zur Bekämpfung der Frühjahrsfröste im Jahre 1929 geplanten Großflächenversuche herausgegeben.

Darin wurde festgestellt, daß es zwei Gruppen von Frostabwehrmethoden gibt und zwar solche, die vom einzelnen Besitzer in seinem eigenen Feld ohne Rücksicht auf die Mitarbeit seiner Nachbarn angewendet werden können, und solche, die nur als Gemeinschaftsaktion, auf großer Fläche durchgeführt, Aussicht auf Erfolg haben. Zu dieser letzteren Art gehört das Frosträuchern. Die Versuche wurden auf eine Mindestgröße von 50 ha festgelegt. Der Grund lag darin, daß bei den Frostbekämpfungsversuchen dann unverhältnismäßig große Mittel aufgewandt werden müssen, wenn man einen kleinen Raum in einem großen kalten Gebiet warm halten will. Es ist dabei ja nicht nur mit Verlusten in vertikaler Richtung durch Luftaustausch und Strahlung, sondern auch mit besonders großen Verlusten infolge horizontaler Luftbewegung zu rechnen. Je größer die Versuchsfläche ist, umso mehr besteht die Aussicht, daß die Nachbarflächen von der Erwärmung einer daneben liegenden Fläche Nutzen ziehen, zumal wenn sie in der Windrichtung liegen und somit besonders stark von dem horizontalen Luftaustausch betroffen sind. Würden die Räucherversuche, die doch zum Zwecke einer zahlenmäßigen Bewertung der Methode eingerichtet werden sollten, auf zu kleinen Flächen gemacht, dann müßte zur Schadenverhütung eine im Verhältnis zur Fläche zu große Intensität der Abwehrmittel aufgewandt werden. Gerade beim Frosträuchern würden sich daher Heiz- und Räucher-effekt so überlagern, daß sie nicht mehr zu trennen wären.

Tatsächlich fanden wir später bei einigen amerikanischen Räucherversuchen, daß es in erster Linie Heizversuche waren. Dasselbe läßt sich für Räucherversuche von Schmidt (S. 128) feststellen, und es war in gewisser Hinsicht auch bei dem großen Räucherversuch von Oppenheim 1928 der Fall.

Die aus anderen Gründen ausgesuchten Flächen waren nun, wie schon erwähnt, größtenteils nicht geeignet zur erfolgreichen Anwendung des Räucherns. An einem Beispiel aus Rheinhessen, wo in zwei Gemarkungen Frost-räuchern durchgeführt werden sollte, erläuterte Kessler die unterschiedliche Beurteilung der Versuchsbedingungen. Die Karte der Frosteinzugsgebiete der Räucherversuche Oberingelheim und Oppenheim (Abb. 10, S. 19) zeigte die Verschiedenheit der Lage. Während in Oppenheim die Kaltluft an Ort und Stelle in der Ebene entsteht und im Entstehungsgebiet liegen bleibt, ferner auch keine nennenswerten Kaltluftmengen aus der Umgebung zufließen können, hat Ingelheim mit Kaltluft aus einem weit über 300 qkm großen Einzugsgebiet zu rechnen.

Auf Grund dieser Verhältnisse wurden in erster Linie Oppenheim und Veitshöchheim für reine Frosträucher-versuche ausersehen; in den anderen Fällen sollten kombinierte Verfahren angewendet werden. Wir müssen vorwegnehmen, daß die geplante Durchführung des Großversuches in Oppenheim bis heute noch nicht zustande gekommen ist, ebensowenig wie in Veitshöchheim. Das Ausbleiben von ausgesprochenen Frostwetterlagen in den darauffolgenden Jahren und die Verlegung der Zentrale des Versuchswesens in das stärker gefährdete Weinbaugbiet der Mosel waren die Ursache. Eingerichtet ist Oppenheim immer noch mit Frosträucherapparaten, die nach einem festgelegten Plan vom Reichsarbeitsdienst in Oppenheim in Tätigkeit gesetzt werden (1936). Exakte Messungen über den Erfolg liegen nicht vor.

## 6. Die Prüfung der Frosträuchermittel.

### a) Laboratoriumsversuche über Rußausbeute.

Zu Beginn des Versuchswesens in Deutschland (1928) stand das Verfahren des Frosträucherns ganz im Vordergrund. Abgesehen von einigen Bedeckungsversuchen waren bisher keine anderen Methoden im Weinbau verwendet worden. Zunächst mußten sichere Grundlagen für das Frosträuchern geschaffen und zwar in erster Linie die Wirtschaftlichkeit geprüft werden. Eine quantitative Bewertung der Rußausbeute, verbunden mit einer Beurteilung der betriebstechnischen Vor- und Nachteile, sollte in Angriff genommen werden. Bisher war fast durchweg mit Abfallmaterialien der eignen Betriebe oder mit billig beschaffbarem anderen Abfallmaterial geräuchert worden. Von nicht betriebseigenen Mitteln fand früher nur Gasteer in größerem Umfang Verwendung. 1928 verwendete dann Kessler in Oppenheim Rohnaphtalin und Räuchermittel Höchst (bestehend aus einem Gemisch von Anthrazenpech mit Torf) in großen Mengen. In einem Versuch im Avelertal wurde gleichfalls im Jahre 1928 durch die Provinziallehranstalt für Weinbau, Obstbau und Landwirtschaft in Trier das Räuchermittel Höchst angewendet.

Zunächst wurde auf dem Wege der Laboratoriumsuntersuchung eine Beurteilung der verschiedenen Materialien versucht, zu denen bis zum April 1929 noch eine Reihe weiterer gekommen war. Die Literatur gab keinen Aufschluß über die Möglichkeit einer solchen Untersuchung.

Die hessische chemische Prüfstation für die Gewerbe in Darmstadt führte im Auftrage des Reichsausschusses für Frostabwehr im deutschen Weinbau die Untersuchungen durch und fragte bei rußerzeugenden

Firmen an, da in der Literatur nichts zu finden war. Die Firmen wiesen darauf hin, daß es Laboratoriumsmethoden zu quantitativer Rußbestimmung nicht gebe, und wenn solche Untersuchungen im Laboratorium durchgeführt würden, so wichen doch die Ergebnisse von der Rußausbeute in der Praxis weitgehend ab. Tatsächlich waren die Laboratoriumsversuche, durch Verschwelen der Produkte zu einem Urteil über die Menge der Rußbildung zu kommen, erfolglos. Rußbrände und mehrfache Explosionen ließen davon Abstand nehmen. Die verschiedenen Versuche, die Kessler sowohl wie Darmstadt anstellten, sind in Abbildung 84 skizziert.

So wurde dann eine Methode verwendet, welche eine der rußerzeugenden Firmen angab. Aus ihr konnte die annähernde Rußausbeute berechnet werden. Es wurden folgende Analysen gemacht:

1. Bestimmung des gesamten Kohlenstoffes durch die Elementaranalyse.
2. Bestimmung der Rückstände (Koks).

Hierbei wird der Stoff entflammt, mit der eigenen Reaktionswärme abgebrannt und zum Schluß wird durch Erhitzen nachgeholfen, bis keine brennbaren Gase mehr entweichen.

3. Bestimmung des Wassergehaltes nach der Methode Holde.  
(Bestimmung des Wassergehaltes von Fetten und Ölen.)

Die Mengen von 2 und 3 werden vom Gesamtkohlenstoff abgezogen und das Ergebnis ist der verrußungsfähige Kohlenstoff. 40—50 % des verrußungsfähigen Kohlenstoffes gibt die annähernde Ausbeute an Ruß.

Diese Untersuchung ergibt selbstverständlich nur Annäherungswerte. Die Leitung des Prozesses, die Verwendung von besonderen Räuchergeräten und Schwankungen in der Zusammensetzung des Materials bedingen in der Praxis erhebliche Unterschiede. Immerhin ist es möglich, die vermutlich besten Materialien herauszufinden. Die Untersuchungsergebnisse vom April 1929, welche die chemische Versuchsstation für die Gewerbe in Darmstadt durchführte, sind in den Tabellen 29 und 30 angegeben.

Tabelle 29

Nr.	Bezeichnung	Kohlenstoff %	Koks %	Wasser	Asche %	empirisch gef. Rußgehalt % *)
1	Geschleudertes Naphtalin . . . . .	90,3	0,4	unmeßbare Spuren	0,3	45
2	Nicht geschleudertes Rohnaphtalin . . . . .	92,9	8,5	„ „	0,2	42,2
3	Anthrazen-Rückstände Zeche Moltke . . . . .	87,3	0,6	4,3	0,3	41,2
4	Meyer gelb . . . . .	89,8	0,4	0,3	0,5	44,6
5	Meyer braun . . . . .	88,8	4,1	0,8	1,0	42,0
6	Räuchermittel Höchst . . . . .	78,2	3,3	1,9	2,2	36,5
7	Räuchermittel Flörsheim . . . . .	80,0	6,4	1,2	1,7	36,2
8	Hinsberg Nackenheim . . . . .	76,3	8,3	1,3	2,1	33,4
9	Weber 126 . . . . .	76,4	7,0	2,5	0,7	33,5
10	Weber 120 . . . . .	78,5	9,2	1,5	1,6	33,9
11	Weber 106 . . . . .	75,5	11,1	2,5	1,0	31,0
12	Gasrohteer . . . . .	87,2	18,7	3,0	0,5	32,8
13	Straßenteer . . . . .	90,4	21,6	unmeßbar	0,2	34,4
14	Pech . . . . .	91,0	24,8	„	0,2	33,1
15	Hartpech . . . . .	91,0	41,5	—	0,2	24,7

Tabelle 30. Schwelversuche im Laboratorium

Präparat	Brennpunkt	Brenndauer	Rauchprodukte	Krustenbildung	Entzündung
Geschleudertes Naphtalin . . . . .	99° C	sehr lang	Schwarzer intensiver Rauch mit starker Rußbildung, starke Sublimation von Naphtalin **)	keine	Erhitzung nötig
Wasserhaltiges Rohnaphtalin . . . . .	103° C	„ „	wie oben	„	wie oben
Räuchermittel Höchst . . . . .	brennt bei gewöhnlicher Temperatur	kurz	weißgrauer leichter Rauch mit geringen Rußflocken	stark	brennt sofort
Gasrohteer . . . . .	85° C	„	Rauch- und Rußbildung minimal (schwarz)	keine	Anheizen nötig
Straßenteer . . . . .	137° C	mittelmäßig	Rauch schwarz, gegen Ende heller werdend. Rauch- und Rußbildung mittelmäßig	kohliger Rückstand	wie oben
Räuchermittel Flörsheim . . . . .	* 100° C	„	schwarzer intensiver Rauch mit ziemlicher Rußentwicklung (Naphtalinsublimation)	gering	brennt sofort ***)

\*) Die Berechnung des Rußgehaltes erfolgt auf Grund einer empirisch gefundenen Formel aus der Rußfabrikation. Wenn auch die in dieser Spalte errechneten Werte nur annähernde Gültigkeit haben, so sind sie doch beim Vergleich der Materialien geeignet, einen Aufschluß über deren Güte zu geben.

\*\*) Die Rauchprodukte setzen sich im Durchschnitt zusammen aus 60% Naphtalin und Verunreinigungen + 40% Ruß als reiner Kohlenstoff.

\*\*\*) Naphtalin in großer Menge vorhanden.

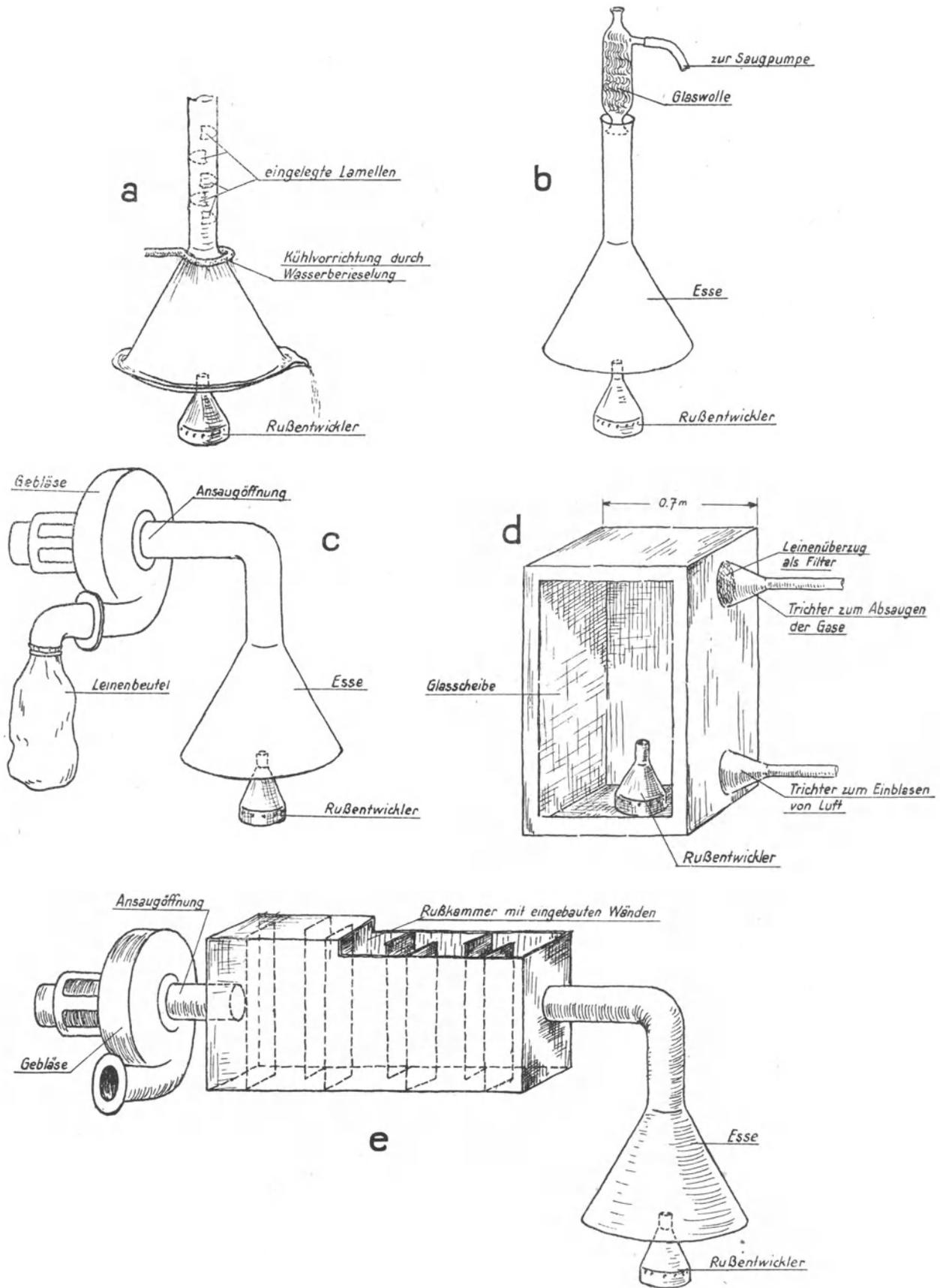


Abb. 84. Versuchsanordnungen zur gewichtsmäßigen Bestimmung der Rußerzeugung verschiedener Räuchermitel.

Daraus geht hervor, daß sehr günstig Naphtalin, besonders das geschleuderte Naphtalin abschneidet, dann etwa gleich gut das Material Meyer gelb, Meyer braun und Anthrazenrückstände Zeche Moltke. Die beiden Mittel Meyer gelb und Meyer braun waren Anthrazenrückstände; so erklärt sich die gleich gute Rußausbeute wie beim Anthrazen, die der des Naphtalins gleichkommt.

Das Räuchermittel Höchst besteht aus Anthrazenrückständen, vermischt mit Torfmull, und das Räuchermittel Flörsheim vorwiegend aus Naphtalin.

Gasrohnteer und Straßenteer fallen ebenso wie Pech und Hartpech erheblich ab, was durch den Anteil an Rückständen ohne weiteres erklärlich ist.

Es wurden nun weitere Prüfungen angestellt, indem das Material im Freien bei gutem Windzug und mit Verbrennungsvorrichtungen umgesetzt wurde. Dabei wurden zunächst einige Zahlen über die Brenndauer gewonnen. Es stellte sich hierbei heraus, daß von den beiden Naphtalinen 1 kg Stoff in vier Minuten, bei Gasrohnteer 1 kg Stoff in 6 Minuten, bei den mit Zusatzmitteln versehenen Materialien, Räuchermittel Höchst und Räuchermittel Flörsheim 1 kg Stoff in 24 Minuten abbrannte. Gasrohnteer und Straßenteer, sowie Pech und Hartpech verkrusteten ebenso wie alle Mittel, welche Zusätze erhalten hatten. Glatt, ohne Rückstände, brannten nur ab Naphtalin und Anthrazenrückstände, natürlich auch die beiden Materialien Meyer gelb und Meyer braun, welche beide Anthrazenrückstände waren, die unter anderem Namen zur Prüfung eingereicht waren.

Zusammenfassend ist zu der Bewertung der Mittel zu sagen, daß Naphtalin und Anthrazenrückstände von den anderen rußbildenden Mitteln nicht erreicht werden und daß jeder Zusatz hierzu verfehlt ist, da er nur eine Verteuerung dieser industriellen Abfallmaterialien, keineswegs aber eine Verbesserung, sondern eher eine Verschlechterung darstellt.

Die Preise der Räuchermittel unterliegen gewissen Schwankungen. Annähernd ist für Naphtalin und Anthrazenrückstände ein Preis von 4.—RM. je 100 kg ab Werk üblich bei 15 t Bezug.

b) *Praktische Versuche, den Effekt des Räucherns zu ermitteln.*

Um über die praktische Handhabung der verschiedenen Mittel Erfahrungen zu gewinnen, wurden verschiedene Stoffe, nämlich Gasrohnteer, geschleudertes und nicht geschleudertes Rohnaphtalin und die Räuchermittel Höchst und Floria in einem kleineren Versuch nebeneinander verbrannt. Zu diesem Zweck wurden am 7. Februar 1929 in der Rheinebene bei Oppenheim zehn Räucheröfen je 2 m voneinander in einer Reihe aufgestellt. Auf der Leeseite befand sich im Abstand von 20 m von der Mitte der Ofenreihe ein Thermometergestell mit Alkoholminimumthermometern in 10, 55 und 155 cm über dem Boden.

Während der Versuchsnacht lag über dem Boden eine Schneedecke von 20 cm Höhe. Bei klarem Himmel und leichtem Nordwestwind konnte die Ausstrahlung sich voll auswirken. Die Temperaturen sanken während der Nacht bis auf — 14 Grad C. Zur Beurteilung des Räuchereffektes schien das tiefste Thermometer in 10 cm Höhe besonders geeignet. Da Schnee wie ein schwarzer Körper strahlt, so war mit einer raschen Abkühlung seiner Oberfläche und der darüber liegenden Lufthaut zu rechnen, die sich dem untersten Thermometer mitteilen mußte; von den Warmluftströmen, die von den Öfen aus hochstiegen, konnte es dagegen nicht mehr unmittelbar getroffen werden.

Um eine Vorstellung von der Größenordnung des durch die Rauchdecke bewirkten Effektes zu erhalten, wurde die Räucherung mehrmals auf kurze Zeit unterbrochen. Aus dem Verlauf der Ablesung ergab sich, daß zur Zeit der Räucherung die Instrumentaltemperaturen höher lagen als in den Zwischenzeiten. Der durch das Unterbrechen der Räucherung hervorgerufene Temperatursturz im Vergleich zu dem Wiederanstieg der Instrumentaltemperatur bei wiederbeginnender Räucherung lieferte den gesuchten Effekt.

Als Beispiel greifen wir die Ablesungen zwischen 16 Uhr 50 und 17 Uhr 30 heraus (siehe Abbildung 85). Hieraus geht hervor, daß der wahrscheinliche Effekt fast 1 Grad C betrug. Da die Thermometer ohne Strahlungsschutz waren, handelte es sich hier also wohl im wesentlichen um die Verhinderung einer Mehrabkühlung des Thermometers gegen Luft durch Ausstrahlen. Mit einem Temperaturanstieg in der bodennahen Luftschicht ist

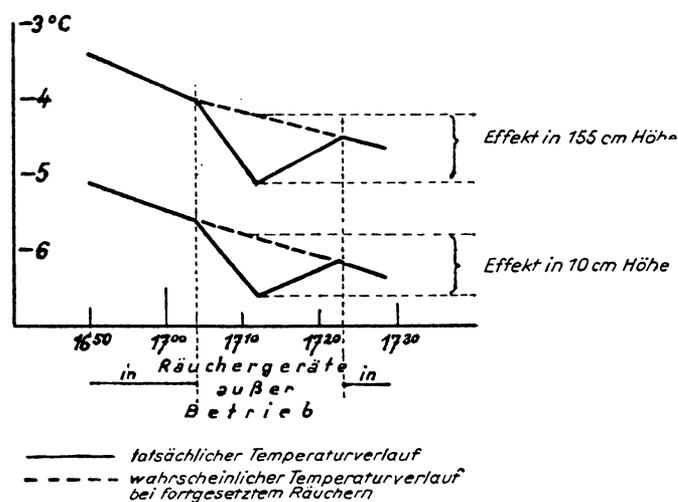


Abb. 85. Bestimmung des Temperatureffektes der Räucher Methode durch intermittierendes Räuchern. Oppenheim 7. Februar 1929.

deswegen nicht zu rechnen, weil durch die isolierende Schneedecke ein Wärmenachschub aus dem Erdboden zur abstrahlenden Schneeoberfläche verhindert war. Unterschiede im Effekt der Räuchermittel wurden nicht festgestellt, dagegen erwies die praktische Handhabung, daß Rohnaphtalin der geeigneteren Stoff ist; Anthrazenrückstände entwickeln zwar ebensoviel Ruß, belästigen aber die Arbeiter durch starken Hustenreiz.

Auf Grund der Ergebnisse des eben besprochenen Versuches sollten im April 1929 zwei größere Versuche durchgeführt werden, um die Wirkungsweise des Räucherns über kleineren Flächen zu untersuchen. Trotz günstiger Aussichten am Abend trat aber in beiden Fällen während der Nacht plötzlich ein solcher Witterungsumschlag ein, daß nur einmal, nämlich in der Nacht vom 4./5. April 1929, das Anstecken der Räucheröfen zu Versuchszwecken

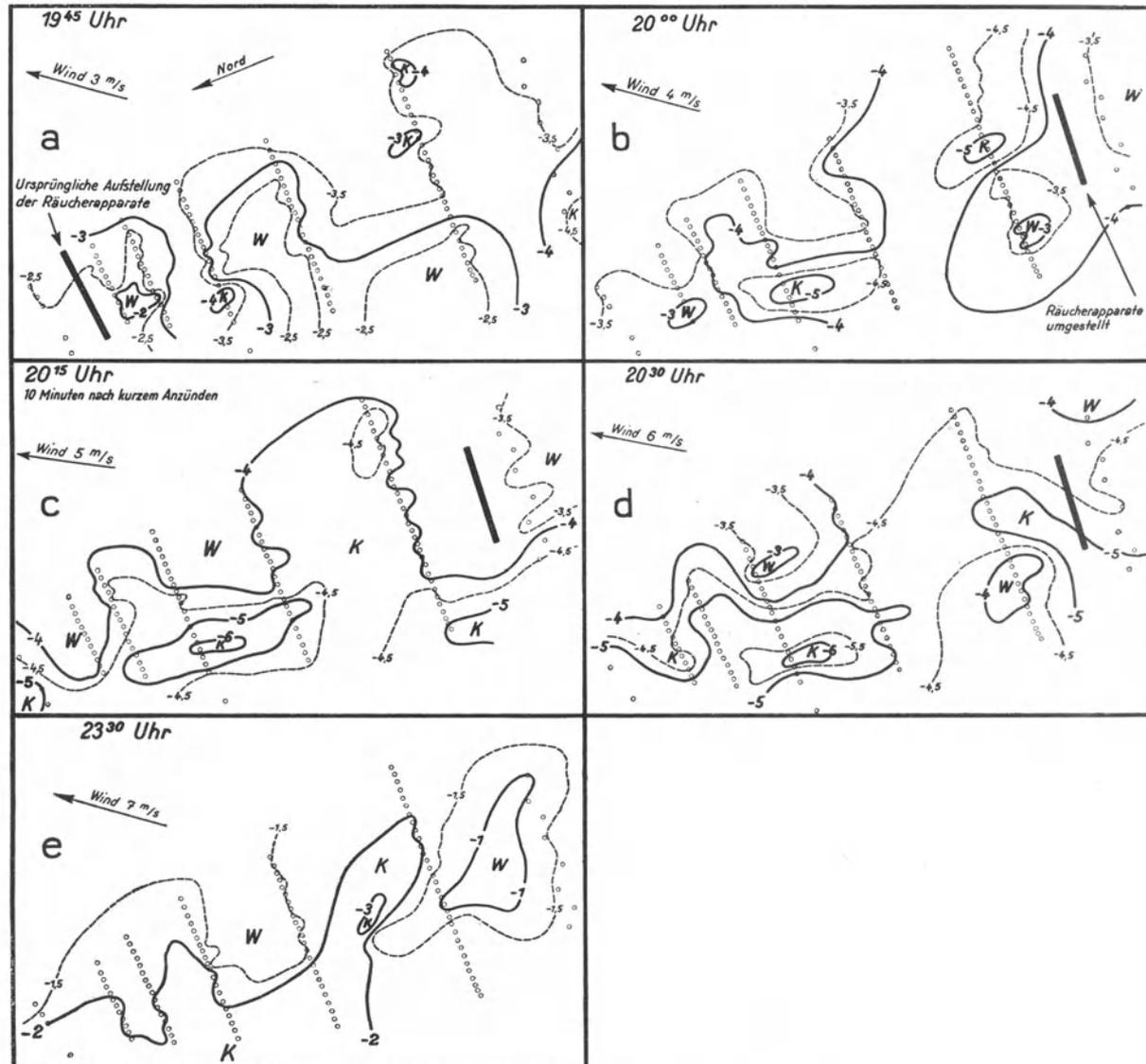


Abb. 86. Räucherversuch in Oppenheim, 4. April 1929.

lohnend erschien; aber auch in dieser Nacht konnte ein Versuch nicht erfolgreich durchgeführt werden. Es machten sich nämlich sowohl der bis auf 6—7 m/sec anschwellende Wind als auch wiederholte Dunstbildung störend bemerkbar. Ersterer verhinderte zunächst eine gleichförmige Ausbreitung der Rauchdecke; aber auch an den Stellen, wo die Rauchdecke in der Nähe der Öfen noch verhältnismäßig dicht war, konnte wegen der starken Durchmischung und des Anblasens der Thermometer keine meßbare Wirkung an denselben festgestellt werden. Auffallend ist im Protokoll, daß das Einsetzen des Dunstes kurz nach Inbetriebnahme der Räucheröfen notiert ist.

Wir fügen einige Isothermenkarten dieses Versuches bei, weil sie zeigen, wie zunächst der Aufbau des Versuches gedacht war, und daß die Temperaturverteilung über einem ebenen Versuchsfeld in Ausstrahlungsnächten auch bei starkem Wind große Unterschiede aufweisen kann (Abb. 86). Der Versuch war nach dem tagsüber herrschenden schwachen Nordwind ausgerichtet. Im Luv der Räucherbatterie, 20 m von dieser entfernt, stand eine Staffel

Thermometer, die zweite mit dem Wind 20 m von den Öfen entfernt, die anderen Staffeln 50 m, 100 m, 200 m, 300 und 400 m entfernt. Wir rechneten damit, daß dies eine gute Verteilung der Meßstellen sei, in der Annahme, daß der Rauch der Räucheröfen sich zwar immer mehr verteilen werde, aber einige Meßstellen an den Seiten der Staffeln dann außerhalb der Rauchwolke stehen würden. Aufgestellt waren 20 Räucheröfen System Maurer in Abständen von je 5 m. Als Räuchermaterial sollten nacheinander verschiedene Stoffe benutzt werden. Ein Windumsprung als Vorbote eines aufkommenden heranrückenden Tiefs brachte Ost-, später Südostwind und vereitelte die Durchführung des Versuches nach dem vorgesehenen Plan. Die Räucherapparate wurden umgestellt, aber auch nur kurze Zeit in Betrieb genommen, da der Wind immer mehr answoll, zuletzt auf 7 m/sec, da ferner noch Bewölkung und zeitweilig Nebel aufkam und außerdem allgemeiner Temperaturanstieg erfolgte. Die Ablesung der Thermometer geschah in viertelstündigen Zeiträumen durch Studenten der Technischen Hochschule Darmstadt. Jedem waren etwa fünf Thermometer zugewiesen, die er im Verlaufe von 2—2½ Minuten ablesen und notieren konnte.

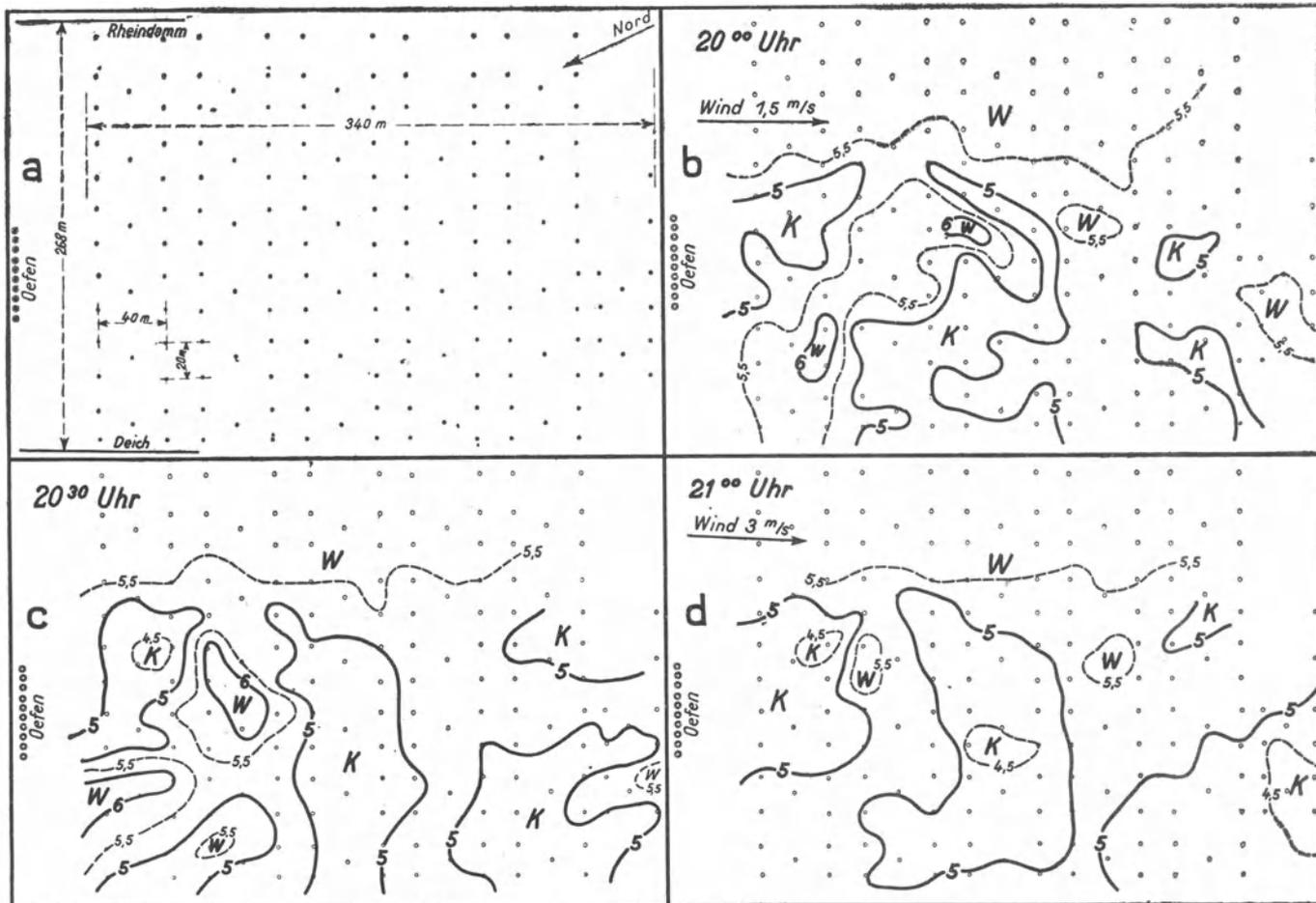
Beachtenswert ist auf den Isothermenkarten, daß hier unerwartet große Temperaturunterschiede auf kleinstem Raum in 50 cm Höhe auftraten. Es handelt sich um das ebenste Gelände, das weit und breit aufzufinden war und das nur ein ganz geringes Gefälle von wenigen Zentimetern nach dem Rhein zu aufwies. Nur ein Graben, der 1,5 m tief und 10 m lang war, befand sich zwischen der dritten und vierten Thermometerreihe (von links aus betrachtet). Daß es zu einer Ausbildung von Kaltluftpfützen in der bodennahen Kaltluftschicht kam, zeigte die Beobachtung, daß auf dem Grunde der Mulde — 11 Grad gemessen wurde, während an ihrem Rande das Minimum — 6 Grad erreichte. Die gestaffelten Thermometer zeigten stärkste Schichtung in den untersten 50 cm, weit geringere Temperaturabnahme in Höhen über 1 m. Der starke auffrischende Wind milderte nach 23 Uhr 00 die Gegensätze erheblich. Während um 20 Uhr 30 etwa 5 Grad Differenz zwischen dem Thermometer 5 cm über dem Boden und dem in 250 cm angebrachten Thermometer war, betrug diese um 22 Uhr 30 noch 1,3 Grad. Die Durchwirbelung der stark geschichteten bodennahen Luftschicht als Folge des stärker werdenden Windes war deutlich zu erkennen.

Die Isothermenkarten lassen vor Beginn des Versuches bereits Temperaturunterschiede im 50 cm-Niveau von 2 Grad erkennen, die sich zeitweilig auf 3 Grad steigerten. Erst als der Wind auf 7 m/sec answoll, wurden die Gegensätze wieder etwas gemildert und gingen auf 2 Grad zurück. Dabei blieben die Warm- und Kaltluftgebiete durchaus nicht an der gleichen Stelle. Sie wanderten vielmehr über das Feld, ohne daß eine Gesetzmäßigkeit erkennbar wurde. Jedenfalls zeigte dieser Versuch wie auch viele späteren Versuche, daß gerade in völlig ebenem Gelände eigenartigerweise größere Differenzen der Temperatur im gleichen Niveau auftreten als an leicht geneigtem Hang. Man vergleiche hier die Versuche in ebenem Gelände (Oppenheim, S. 179, Euren, S. 188, Föhren, S. 114) mit solchen im schwach geneigten Gelände, wo viel geringere Störungen durch Kalt- und Warmluftgebiete auftreten (Falkensteinerhof, S. 181). Ein Erfolg des Räucherns konnte bei diesem Versuch nicht festgestellt und auch aus den Versuchsbedingungen nicht erwartet werden.

Die vom Reichsausschuß für Frostabwehr angeordnete Durchführung großer Räucherversuche in allen deutschen Weinbaugebieten für die Frühjahrsfrostzeit 1929 ließ es nicht zu, günstigste Versuchsbedingungen abzuwarten. Bis zum 1. Mai sollten alle großen Versuche eingerichtet sein und bis dahin mußten auch die nötigen Erfahrungen vorliegen. Deshalb wurde jede günstige Gelegenheit im April 1929 ausgenutzt und der durch Witterungsumschlag am 4. April mißglückte Versuch neu eingerichtet. Wieder wurde das gleiche Versuchsfeld zwischen den Rheindämmen benutzt, das als vollkommen eben anzusprechen ist. Die Minimumthermometer wurden diesmal gleichmäßig über die Fläche von 270 × 300 m verteilt. Die Ablesung von je fünf Thermometern, die wiederum einen Abstand von 50 cm über dem Boden hatten, erfolgte durch Schüler der Lehr- und Versuchsanstalt für Weinbau in Oppenheim.

Die Isothermenkarten des Versuchs vom 10. April 1929 (Abb. 87) zeigten an diesem Tag verhältnismäßig geringe Unterschiede, die sich maximal auf 1½ Grad steigerten, normalerweise aber nur rund 1 Grad betrug. Auch die gestaffelt aufgestellten Thermometer wiesen zwischen 5 cm und 250 cm Höhe nur Unterschiede von 1,6 Grad im Höchsthalle auf, so daß diese Versuchsnacht als typisch für geringe Ausbildung von Kaltluft am Boden anzusprechen ist. Die Öfen wurden um 20 Uhr 05 entzündet und nach zehn Minuten Brenndauer wieder gelöscht, weil die vorübergehende Aufheiterung einer wiederum starken Bewölkung gewichen war. Der Nordostwind steigerte sich von 1,5 m/sec um 19 Uhr 30 auf 3 m/sec um 20 Uhr 40 und behielt Richtung und Stärke von da ab bei. Nach Mitternacht wurde der Versuch abgebrochen, weil es aussichtslos erschien, daß die Witterung sich besserte. Zur Feststellung eines Effektes des Frosträucherns waren die Versuchsbedingungen auch in diesem Fall nicht geeignet. Der Versuch zeigte aber, daß bei vorwiegend bedecktem Himmel eine schwächere Schichtung der bodennahen Kaltluftschicht auch bei geringen Windgeschwindigkeiten bemerkbar ist. Der Versuch am 4. April dagegen zeigte, daß eine Erkaltung der Thermometer durch Ausstrahlung unter Umständen auch durch starke

Winde von mehreren Sekundenmetern gelegentlich nicht ganz ausgeglichen wird. Wir haben selbst bei 7 m/sec zwischen 5 cm und 250 cm immer noch 1,3 Grad Differenz gemessen, wobei allerdings zu berücksichtigen war, daß dieses Thermometer in 5 cm Höhe durch das umgebende etwas höhere Gras geschützt und sehr schlecht ventiliert war. Die in 3 m Höhe gemessene Windgeschwindigkeit ist eben bekanntlich nicht gültig für die unterste, dem Boden aufliegende Luftschicht. Die Thermometer in 100 und 150 cm zeigten von einander keine Abweichungen, waren aber noch um 0,5 Grad kälter als das in 250 cm Höhe angebrachte.



Ahh. 87. Räucherversuch in Oppenheim, 10. April 1929.

Aus vielen Vorversuchen um diese Zeit hatten wir die Erfahrung gewonnen, daß zur Herstellung von Temperaturkarten bei Frostbekämpfungsversuchen der geeignetste Thermometerstand 50 cm von der Bodenoberfläche war. Man befand sich hier noch in großer Bodennähe, war aber nicht mehr zu sehr von den Zufälligkeiten des kleinsten Raumes abhängig. Bei jeder weiteren Annäherung an den Boden nahmen die Einflüsse der Unterlage derart zu, daß es immer schwieriger wurde, räumliche Zusammenhänge der Temperaturverteilung zu erkennen, weil sich hier kleinste Luftkörper ausbildeten, die neben erheblich anders temperierten lagerten, ohne daß bei der angewendeten Meßtechnik die Einzelstruktur und die Verlagerung hinreichend verfolgt werden konnten.

c) Die Verminderung der effektiven Ausstrahlung durch das Frosträuchern.

Beim Räuchern tritt, soweit es sich um feste Rußpartikeln handelt, stärkste Strahlungsabsorption ein (vgl. S. 96). Im Grenzfall einer vollkommen dichten Rauchdecke wird von der langwelligen Bodenstrahlung fast nichts durchgelassen werden.

In einer typischen Ausstrahlungsnacht vom 21./22. Mai 1930 wurde von uns der Einfluß einer mit Naphtalin erzeugten Rauchdecke auf die effektive Ausstrahlung des Bodens mit Hilfe des Angström'schen Pyrgeometers gemessen (Abb. 88). Die Werte der Ausstrahlung bewegten sich zu Beginn der Messung gegen Mitternacht um  $0,12 \text{ gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$ , bis zu welcher Höhe die Kurve nach Abstellen der Räucheröfen gegen 03 Uhr auch wieder anstieg. Dazwischen sind zum Teil erhebliche Rückgänge vorhanden. Das Meßinstrument stand bei dieser Unter-

suchung etwa 150 m von zehn Räucheröfen entfernt, deren Rauch von der schwachen Luftströmung eines Fallwindes in schwankender Dichte über das Pyrgeometer bewegt wurde (Bachemer Tal). Bei stärker werdendem Rauch war um 01 Uhr 20 ein Rückgang auf 0,093, bei besonders großer Rauchdichte um 02 Uhr 20 ein solcher auf  $0,071 \text{ g cal/cm}^2 \cdot \text{min}$  zu beobachten. Dem letzteren entspricht eine Verminderung der Ausstrahlung um 42 %.

Daß die Ausstrahlung selbst bei großer Dichte der Rauchdecke immer noch erhebliche Beträge aufweist, liegt daran, daß die vertikale Erstreckung einer solchen Decke verhältnismäßig gering ist. Die Rauchdecke erhält zwar von unten durch die Ausstrahlung des Bodens größere Wärmemengen, verliert aber auch reichlich Energie durch Strahlung nach allen Seiten, offenbar am meisten durch Strahlung nach oben.

Andererseits gibt es eine Reihe von Begleiterscheinungen des Räucherns, welche für eine zusätzliche Absorption, die selbst bei schwacher Rauchentwicklung vorhanden ist, sprechen. Es entsteht bei dem Frosträuchern nicht nur Ruß und sublimiertes Naphtalin, die einerseits als feste Lufttrübungen die langwellige Strahlung absorbieren und andererseits zu Anlagerung für Wassertröpfchen gleichsinnig dienen, sondern auch Kohlensäure in großen Mengen und zahlreiche Kohlenwasserstoffe, die selektiv absorbieren.

Von den Absorptionsbanden der Kohlensäure liegen nur zwei starke Bande im Bereich der Bodenstrahlung. Davon fällt die bei  $4,3 \mu$  noch in das Gebiet der kleinen Intensitäten, so daß als wesentlich nur die  $14,9 \mu$ -Bande verbleibt. Wenn sich der sonst geringe Gehalt der Luft an Kohlensäure in der dichten Rauchwolke schätzungsweise verzehnfacht, so wird die an dieser Stelle des Spektrums unweit des Strahlungsmaximums des Bodens erfolgende Absorption praktisch schon ins Gewicht fallen. Genaue Zahlenangaben sind deshalb schwer zu machen, weil nicht nur in der Praxis der Gehalt an Kohlensäure starken Schwankungen unterworfen ist, sondern auch die Breite der Absorptionsbande von Temperatur und Druck abhängig ist. Immerhin wird mit ein paar Prozent Absorption gerechnet werden können.

Die Kohlenwasserstoffe der aliphatischen sowie der aromatischen Reihe haben zahlreiche Absorptionsbanden im Gebiet der Bodenstrahlung. Von diesen liegen die stärksten zwischen  $3$  und  $4 \mu$ , um  $7 \mu$  und bei stärkerer Streuung zwischen  $10$  und  $12 \mu$ . Durch sie wird also ebenfalls eine zusätzliche Absorption zu erwarten sein.

Wie sich die Verminderung der effektiven Ausstrahlung unter einer Rauchdecke praktisch auswirkt, darüber ist auf Seite 135 ausführlich berichtet.

## 7. Frosträuchern mit Kaltluftabriegelung im Ahrtal.

### a) Die Luftzirkulation und Temperaturverteilung im Becken von Ahrweiler.

Als Kessler im Frühjahr 1929 im Auftrage des Reichsausschusses für Frostabwehr im deutschen Weinbau den Versuch übernahm, durch Frosträuchern die Weinberge in der Umgebung von Ahrweiler und zwar der Gemarkung Walporzheim, Ahrweiler-Stadt, Kalvarienberg und Bachem vor Schaden zu schützen, erklärte er zunächst, nachdem er Kenntnis von den lokalklimatischen Bedingtheiten genommen hatte, daß das Frosträuchern im Ahrtal aller Voraussicht nach praktisch mit einem Mißerfolg enden werde. Da aber große Frostscha­den vorausgegangen waren und z. B. die Weinberge von Bachem bei Ahrweiler 1926, 1927 und 1928 nahezu 100 %ige Schäden erlitten hatten, sollte unter allen Umständen ein Frostscha­den verhütet werden. Der Versuch im Ahrtal wurde nun, nachdem die Materialien und Räucherapparate bereits beschafft waren, abgeändert und ist nicht mehr als Räucherversuch im eigentlichen Sinne anzusprechen.

Von alters her wurde an der Ahr geräuchert, indem Teer in offenen Gruben verbrannt wurde. Man hatte zwar immer wieder die Beobachtung gemacht, daß der Rauch schnell abtrieb, sich über die Ursache jedoch keine klaren Gedanken gemacht und immer neue Gründe herbeigesucht, wenn das Räuchern versagt hatte. Entweder war zu spät angefangen worden oder man hatte zu früh aufgehört, so daß die Reben zu schnell auftauten, oder irgendein anderer Grund wurde vermutet.

Nunmehr ergaben die Vorversuche wichtige Aufschlüsse über die Ursachen der Frostscha­den im Ahrtal. Wie alle Täler hat auch das Ahrtal ein ausgesprochenes Kaltlufteinzugsgebiet. Dieses Einzugsgebiet, das sich mit dem Wassereinzugsgebiet der Ahr deckt, ist in der Abbildung 11 (Seite 20) zu erkennen. Ein großer Teil dieses Einzugsgebietes ist mit Wald bedeckt und dadurch nicht im besonderen Maße Kaltluftentstehungsgebiet, ein großer Teil jedoch wird von Feldern und Wiesen eingenommen. Besonders beachtlich ist, daß einzelne Einzugs-

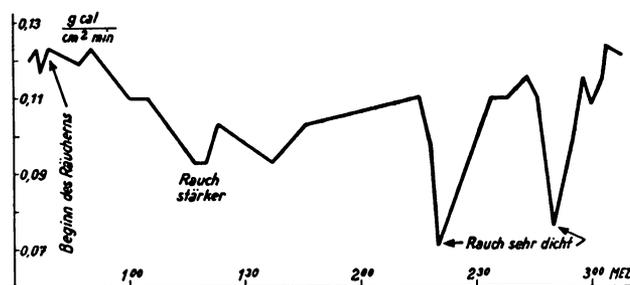


Abb. 88. Rückgang der effektiven Ausstrahlung unter einer Rauchdecke. Versuche in Ahrweiler 1930.

gebiete der Ahr bis in größere Meereshöhen hinaufreichen; die höchsten Erhebungen liegen über 600 m hoch, die Hohe Acht hat sogar eine Meereshöhe von 747 m.

Das Ahrtal von Walporzheim bis Altenahr bildet eine Schlucht, an deren südlichen Steilhängen die Weinberge liegen. Der untere Teil dieser Weinberge ist frostgefährdet, wenn auch nicht in besonders hohem Maße: Stärker gefährdet sind die Nebenlagen, die sich in den kleineren Seitentälern der Ahr befinden (z. B. die Weinbaudomäne Marienthal). Unterhalb Walporzheim tritt die Ahr aus den Schluchten des Gebirges heraus und fließt durch das weite Talbecken von Ahrweiler. Hier nehmen die Frostscha­den in den rund 150 ha umfassenden Weinbergen stark zu. Im allgemeinen sind die obersten zwei Drittel der am Steilhang zwischen Walporzheim und Ahrweiler-Stadt gelegenen Weinberge frostfrei. Die Weinberge zwischen Ahrweiler und Neuenahr sind dagegen bis zur Höhe hinauf frostgefährdet, so daß sie im Jahre 1929 zum großen Teil schon aufgelassen waren. Sehr frostgefährdet sind die auf der Talsohle liegenden Weinberge und die unteren Partien der Weinberge bei Bachem.

Der Versuch beschränkte sich auf die Weinberge des Talbeckens von Ahrweiler. Für diesen Fall liegen folgende Ursachen vor. Auf der Talsohle des Ahrweiler Beckens bildet sich nachts ein Kaltluftsee, der zum Teil durch die Kaltluft gebildet wird, die infolge der Abkühlung des Talbodens durch Ausstrahlung entsteht. Weitaus die meiste Kaltluft fließt jedoch nachts durch verschiedene Einbruchstellen in das Talbecken hinein. Die Einbruchstelle der gesamten Kaltluft aus dem oberen Ahrtal bildet die enge Talstelle an der „Bunten Kuh“ oberhalb Walporzheim. Es folgen einige kleinere Einbruchstellen aus Tälern, welche von Süden in die Ahr münden. Diese sind das Heckenbachtal, welches an der Bunten Kuh mündet, das Kalvariental, südlich Ahrweiler, und besonders das Bachemertal. Aber auch von den nördlich liegenden Bergen fließt durch einige Schluchten Kaltluft herunter, am meisten durch das Tälchen, das von Lantershofen herunterkommt.

Bei zahlreichen nächtlichen Versuchen wurde die Luft gefärbt und das Strömen der nächtlichen Fallwinde beobachtet. Über die Versuchsfläche waren rund 150 Thermometer, die in 50 cm Bodenabstand aufgestellt waren, verteilt. Es waren 24 Gruppen gebildet. In viertelstündigen Abständen wurden die Messungen, die an den Thermometergruppen gemacht waren, durch Fernsprecher, welche über das ganze Gelände verteilt waren, zur Zentralstelle an das Stadthaus in Ahrweiler gemeldet. Hier wurden sie in Tabellen eingetragen, so daß man auf der Zentrale in der Lage war, fortgesetzt den Temperaturverlauf im Gelände zu verfolgen. Die besonders gefährdeten Stellen waren auf einer großen Plankarte eingezeichnet und durch Fähnchen markiert.

Aus der Verteilung der Thermometergruppen, wie sie in der Abbildung 89 ersichtlich ist, geht hervor, daß an manchen Stellen die Thermometergruppen besonders gehäuft waren. Vor allem interessierte das Bachemertal, in welchem nicht nur der Talboden, sondern auch die seitlichen Hänge mit vielen Thermometern versehen waren. Über diese Messungen ist bereits an anderer Stelle ausführlicher berichtet (Seite 21).

Die Ablesung der Thermometer wurde teils durch Schüler der Provinzialschule für Weinbau in Ahrweiler, teils durch Beamte der Stadtverwaltung Ahrweiler besorgt. Die technische Leitung des Frosträucherns übernahm in vorbildlicher Weise die Stadtverwaltung Ahrweiler, die seit Jahren im Interesse der Winzer die Frostscha­denverhütung in die Hand genommen hatte.

Umfangreiche Vorarbeiten, die im Jahre 1929 geleistet wurden, führten dazu, daß im Frühjahr 1930 der eigentliche Versuch zur Frostscha­denverhütung ziemlich reibungslos trotz seiner Größe durchgeführt werden konnte. Es galt dabei, nicht nur die 30 Leute, die mit Thermometermessungen wenig oder überhaupt nicht vertraut waren, so zu schulen, daß fehlerfreie und genaue Ablesungen herauskamen, sondern auch die etwa 250 bis 300 mit der Bedienung der Räucherapparate betrauten Männer zu einer sinn­gemäßen Anwendung der Räucherapparate zu bringen. Es konnte in den Vorversuchen wohl festgestellt werden, welches die Haupteinbruchstellen der Kaltluft sind, jedoch waren die Schätzungen der einströmenden Kaltluftmassen in den einzelnen Nächten recht verschieden. Offensichtlich spielen besondere Verhältnisse in den Kaltluftentstehungsgebieten hier mit, welche sich verschieden stark auswirken. Es mußte daher den Leitern des Räucherdienstes Bewegungsmöglichkeit gegeben werden, die Apparate nicht genau nach dem Plane aufzustellen, bzw. noch in der Nacht Umstellungen vorzunehmen. Für unvorhergesehene Fälle blieben der zentralen Leitung etwa 200 Apparate zum Einsatz an Stellen, an denen die vorhandenen Geräte nicht ausreichten.

Die Stärke des nächtlichen Fallwindes wurde durch Lufttrübung festgestellt. An geeigneter Stelle wurde Naphtalin entzündet und das Fortschreiten der Naphtalinwolke über vorher abgesteckte Meßstrecken mit der Stoppuhr verfolgt. Es genügt jedoch nicht, an einer Stelle, z. B. auf der Talsohle, eine Rauchstelle zu errichten. Die Höherer­streckung des Fallwindes war neben seiner Geschwindigkeit und seiner durchschnittlichen Temperatur gleichfalls von Bedeutung, da sie mit zur Berechnung der Fallwindmasse herangezogen werden muß. Deshalb wurden Rauchwolken in größere Höhen getrieben, indem aus schmalen Blechtrommeln der Ruß des brennenden Naphtalins durch Brandsätze, z. B. durch Zufügen von Kaliumperchlorat, in größere Höhen geschleudert wurde. Wir konnten dabei die Rauchwolken bis 20 m über die Talsohle emporschießen. An der Bunten Kuh, d. h. an der

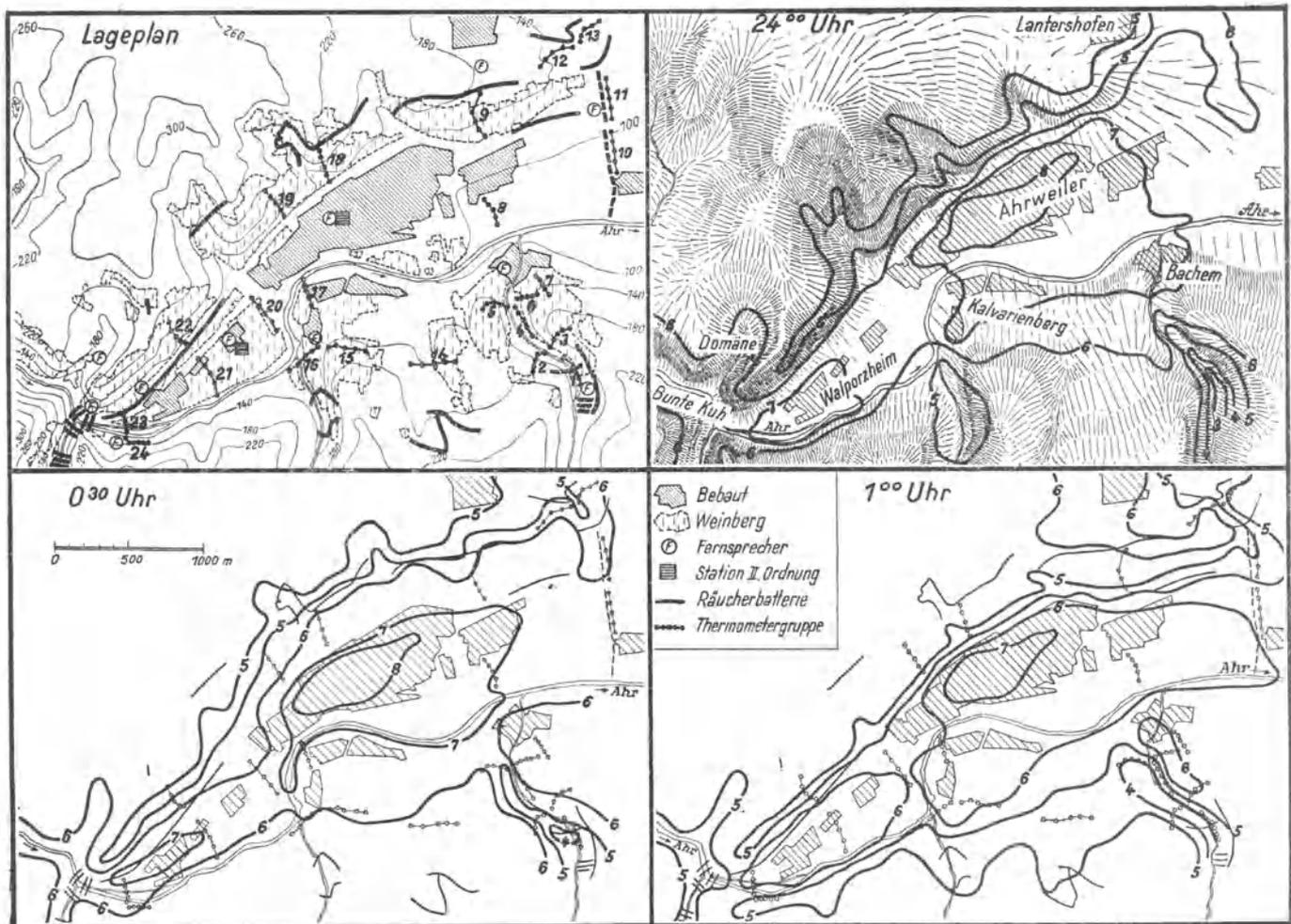


Abb. 89. Frosträuchern und Kaltluftabriegelung im Ahrtal, 17./18. Mai 1929.

Einbruchsstelle des Fallwindes des oberen Ahrtales, erreichten wir die obere Grenze des Fallwindes nicht mehr. Dieser brach hier stark wirbelartig ein und riß die Rauchwolken zu stark mit sich, so daß wir keine besonders große Höhe erreichten. Die Stärke dieses Fallwindes betrug in den unteren Metern mehr als 3 m/sec im Maximum. Im Bachemental reichte der Fallwind von maximal etwa 1,8 m/sec bis ungefähr 10 m über die Talsohle; darüber befand sich eine Luftschicht, die praktisch ohne Bewegung war. Die darin befindlichen Rußteilchen blieben über längere Zeiträume bis zu 10 Minuten an der gleichen Stelle, bis sie gelegentlich von einer größeren Luftunruhe mit geführt wurden.

Besonders eindringlich konnten wir Fallwinde in dem flachen Fallwind des Tälchens von Lantershofen studieren. Da hier das Einzugsgebiet nicht sehr groß und das Tal, das er durchströmt, ziemlich flach ausgebildet ist, hatte er eine geringe Geschwindigkeit, die im höchsten Falle nur etwa 60 cm in der Sekunde betrug. Diese höchste Geschwindigkeit erreichte er in der Zone zwischen 50 cm und 150 cm Bodenabstand. In den unteren 50 cm war er durch Reibung stark gebremst, da im April, besonders aber im Mai das Gras einige Dezimeter hoch war. Oberhalb der 150 cm verlangsamte er sich allmählich. Bereits in etwa 5 m Höhe trat fast völlige Windstille ein. Die höher hinauf geschossenen Rußteilchen zeigten, daß in 15 m Höhe, besonders deutlich in noch größerer Höhe, eine bergwärts gerichtete Strömung vorhanden war.

Wenn wir an mehreren Einbruchstellen des Ahrweiler Beckens im Morgendämmern die Räucherapparate in Betrieb gesetzt hatten, sahen wir von den Höhen die Luftzirkulation des Tales in aller Deutlichkeit vor uns. Die von den Räucherstellen in das Tal hinein getragenen Rauchwolken lagerten sich in einer gewissen Höhe über dem Becken. Der untere Abstand der Rauchwolken mag durchschnittlich etwa 20 m über der Talsohle betragen haben. Er war natürlich nicht scharf begrenzt, da schwerere Rußflocken nach unten durchrieselten. Die leichtesten Rußteilchen wanderten bergwärts ab und wurden zum Teil vom Gradientwind erfaßt und nach einer Richtung getrieben; in denjenigen Fällen jedoch, in denen ein ausgeprägter Gradientwind nicht vorhanden war, wanderten die Rauchwolken oben nach allen Seiten auseinander. Die Kaltluft, die ins Tal eindringt, hebt demnach wärmere

Luftschichten ab. Diese fließen oben nach allen Seiten auseinander. Während man das Einfließen der Kaltluft dadurch, daß es in Bodennähe und besonders bei schluchtenartiger Ausbildung der Täler in gerichtetem Strom erfolgt, gut sehen kann, ist das Abfließen der verdrängten Warmluft nur bei intensiver Luftfärbung möglich, da dieses Abfließen der abgehobenen Warmluft meist gleichmäßig nach allen Seiten über dem Tal erfolgt.

Aus den Meßergebnissen einer der Versuchsächte des Frühjahres 1929, nämlich der Nacht vom 17./18. Mai 1929, haben wir den Versuch gemacht, an Hand von Messungen Kartendarstellungen der Temperaturverteilung des Ahrtales zu machen. Es ergibt sich dabei folgendes: Am kältesten ist die Einbruchsstelle am Bachemertal. Auch die anderen Einbruchgebiete sind erkennbar durch ihre niedrigere Temperierung. Eine deutliche Ausnahme macht jedoch die Stelle, an welcher der Fallwind des oberen Ahrtales mit großer Mächtigkeit hereinbricht. Hier zeigten die Meßstellen nicht nur in dieser Nacht, sondern auch in allen anderen Versuchsächten auffallenderweise höhere Temperaturen, obwohl sie vom Hauptstrom der Kaltluft des oberen Ahrtales betroffen werden. Wir hatten dieses Ergebnis keineswegs erwartet, sondern zunächst damit gerechnet, daß gerade diese Stelle besonders kalt sein müsse. Bei späteren Versuchen stellten wir jedoch die Gründe für die ungewöhnlich hohe Temperatur im Fallwind des oberen Ahrtales fest. Messungen an gestaffelten Thermometern ergaben, daß dieser starke Fallwind sehr wenig Schichtung aufweist. Die Schichtung wird fast völlig verhindert durch die Stärke des Fallwindes, in welchem wärmere und kältere Luftteilchen durcheinander gewirbelt liegen.

Die von uns verwendeten Instrumente, nämlich die Glasthermometer, geben eine mittlere Temperatur an, die in einem nicht geschichteten Fallwind in 50 cm Höhe über dem Boden höher liegen muß als dort, wo ein Fallwind langsam strömt und sich infolgedessen die kältere Luft am Boden absetzen kann. Es kommt ferner hinzu, daß von einer gewissen Windstärke ab, die zwischen 2 und 3 m/sec liegt, die durch die Ausstrahlung hervorgerufene Untertemperatur der Thermometer gegenüber Luft durch die Belüftung der Thermometer fast gänzlich aufgehoben wird. So erklärt sich also, daß die Thermometer im Strom des Fallwindes nicht etwa besonders niedrige Temperaturen, sondern im Gegenteil höhere Temperaturen anzeigten, als erwartet werden konnte. Wenn der Fallwind zum Ruhen kommt und langsam strömt, setzen sich sofort die kälteren Teilchen am Boden ab, so daß im erweiterten Talbecken nunmehr niedrigere Temperaturen gemessen wurden als im stärkeren Fallwind. Der Häuserblock von Ahrweiler und Bachem bleibt natürlich wärmer als die Umgebung (Abb. 89). So kommt es, daß zunächst (um Mitternacht) eine schmale kältere Zone am Weinbergstrand entlang liegt und daß im vorliegenden Fall nicht etwa die untersten Partien die kältesten waren. Um 01 Uhr ist dieser kälteste Strich, nachdem sich der allgemeine Temperaturrückgang im Tal fortgesetzt hat, an den unteren Rand der Weinberge verlagert. Im Laufe der Nacht nimmt allmählich immer mehr die Abkühlung des Talbeckens zu, wobei sich nur noch das Stadtgebiet selbst als deutlich wärmer abhebt.

#### *b) Die Frosträucher- und Kaltluftabriegelungsversuche im Ahrtal 1930.*

Glücklicherweise brachte das Frühjahr 1929 keinen Frost, so daß wir Gelegenheit nehmen konnten, in diesem Jahre eine Reihe von Vorversuchen zu machen und für 1930 einen eingehenden Plan zum Frostschadenverhütungsversuch im Ahrtal zu entwickeln.

Aus der Abbildung 89 ist die Verteilung der Thermometer und die der Räucherbatterien zu erkennen, wie sie als Resultat unserer auf den Vorversuchen aufgebauten Überlegungen vorgenommen wurde. Als wichtigstes Ergebnis war die Bestimmung der Mächtigkeit der Fallwinde an den verschiedenen Einbruchstellen anzusehen. Mit der Rauchdecke konnte natürlich nur ein minimaler Erfolg, der bestenfalls in einer Verminderung der Mehrabkühlung der Pflanzen gegen Luft bestand, erzielt werden. Nunmehr sollten an den Einbruchstellen die Räucheröfen zusammengefaßt und statt zum Räuchern in erster Linie zum Anheizen des Fallwindes benutzt werden.

Wenn zwischen der brennenden Oberfläche und dem Schornstein hinreichend Luft eintreten konnte, brannte das Naphtalin und besonders der Teer unter großer Hitzeentwicklung. Man konnte in einer Stunde etwa 20 kg Teer (mit je 10000 W.E.) oder etwa die gleiche Menge Naphtalin verbrennen. Die Räucherapparate (System Maurer) waren dort aufgestellt, wo erfahrungsgemäß ein Zufließen von Kaltluft zu erwarten war. Demnach waren sie besonders stark zusammengezogen an der „Bunten Kuh“, wo mehrere Hundert der insgesamt 2200 Apparate Aufstellung fanden. 150 Apparate standen im Bachemertal usw. Am Fuß der Weinberge zwischen Station 22 und 23 war eine lange Batterie aufgebaut, der versuchsweise als Gegenstück eine Batterie gegenüberstand, die bei der Station 9 oberhalb der Weinberge angebracht war. Die Apparate bei den Thermometermeßstellen 10 und 11 wurden nicht benutzt, sondern als Reserve betrachtet, um an Gefahrenpunkten eingesetzt zu werden.

In der Nacht vom 8./9. Mai 1930 trat die Frostabwehr nach dem vorgesehenen Plan in Tätigkeit. Die sehr geeignete Nacht brachte an den kältesten Stellen bereits um Mitternacht Temperaturen von Null Grad. Die Thermometer sollten viertelstündlich abgelesen werden, jedoch gelang dies nicht in allen Fällen, da für die voll-

kommende Einhaltung einer Zeit von drei Minuten um den Ablesetermin herum, wie das bei unseren sonstigen Untersuchungen der Fall war, häufig nicht garantiert werden konnte. Der Beobachter mußte jeweils die Zeit vermerken, und manche Beobachtungen fanden in halbstündlichen Zeitabschnitten statt. Einige Meßstellen fielen aus, weil die dafür eingesetzten Leute benötigt wurden, um die Aufsicht über die Räucherapparate an bedrohten Stellen zu übernehmen. Ausgefallen sind die Stationen 10, 11, 12, 13 und 17. Leider mußte auch die sehr wichtige Meßstelle 4 auf der Talsohle des Bachemer Tales gerade in dieser Nacht wegfallen, weil das Gras bereits so hoch war, daß es die Thermometer erreichte. Dies traf ursprünglich auch für je ein Thermometer der Meßstellen 2 und 6 zu, die nach der Talsohle zu standen, aber von Graswuchs in einer Umgebung von einigen Quadratmetern befreit wurden.

Betrachten wir zunächst die Meßstellen an der Haupteinbruchsstelle der Kaltluft des oberen Ahrtales, also die Gruppen 24, 23 und 20 (Abb. 90 a). Im direkten Aufprall des Fallwindes steht die Station 24. Keines dieser

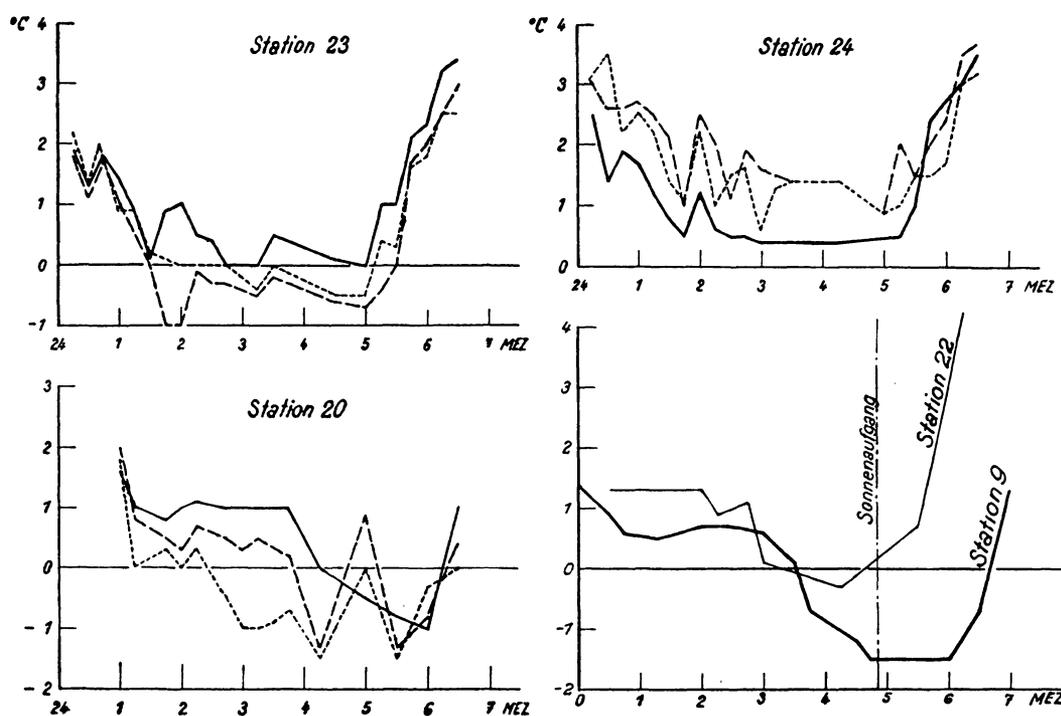


Abb. 90a. Frosträuchern mit Kaltluftabriegelung bei Ahrweiler, 8./9. Mai 1930.

Thermometer kommt unter 0 Grad. Zwar erhalten diese Thermometer gleichzeitig auch besonders viel Rauch, sind aber von vorneherein stets wärmer als die Thermometer der Gruppe 20, welche einige 100 m von der Einbruchsstelle im Talbecken aufgestellt sind. Man sieht dies schon bei der Betrachtung der Eingangswerte unserer Kurven. Auch die Thermometer der Gruppe 23 sind noch angeblasen durch den Fallwind. Das wärmste dieser Thermometer steht unmittelbar an der Ahr. Seine Kurve ähnelt den Kurven der Station 24. Immerhin stehen diese Thermometer nicht mehr im vollen Anprall des Fallwindes, der infolge der Krümmung an der Talmündung gegen die rechte Ahrseite vorstößt. Die Werte dieser Thermometergruppen liegen durchweg um einen Grad niedriger als die der Station 24. Wir können aber auch hier feststellen, daß sie sich nach Einsatz der Räucherapparate gut halten. Kommen wir jedoch weiter von der Einbruchsstelle des starken Fallwindes weg zu der auf der Sohle des Talbeckens aufgestellten Gruppe 20, so sehen wir ein Absinken der Lufttemperatur in viel stärkerem Maß als bei den beiden anderen Thermometergruppen. Der Einfluß des Räucherns und Abriegelns des Fallwindes, der um 01 Uhr stark einsetzt, macht sich durch ein Verzögern des Abfalls der Temperatur bemerkbar. Nach Beendigung des Heizens um 05 Uhr kann ein plötzlicher Temperaturfall von 2 Grad festgestellt werden, der erst aufhört, als die Sonneneinstrahlung wirksam wird.

Die Einbruchsstelle des schwächeren Fallwindes aus dem Bachemertal wurde in besonders umfangreicher Weise vermessen. Wir können die Stationen 1, 2, 3, 5, 6 und 8 vielleicht auch 9 als durch die Kaltluft des Bachemertales beeinflusst betrachten. Die Station 1 liegt auf der Talsohle des Bachemertales, die Stationen 3 und 6 geben die Verhältnisse am Weinbergshang östlich des Bachemertales wieder, während die Stationen 2 und 5 in dem gegenüberliegenden Hang aufgestellt sind. Die Station 8 befindet sich auf der Sohle des Haupttales und

die Station 9 der Mündung des Bachemertales unmittelbar gegenüber auf der anderen Seite des Haupttales (Ahr) (Abb. 90 b).

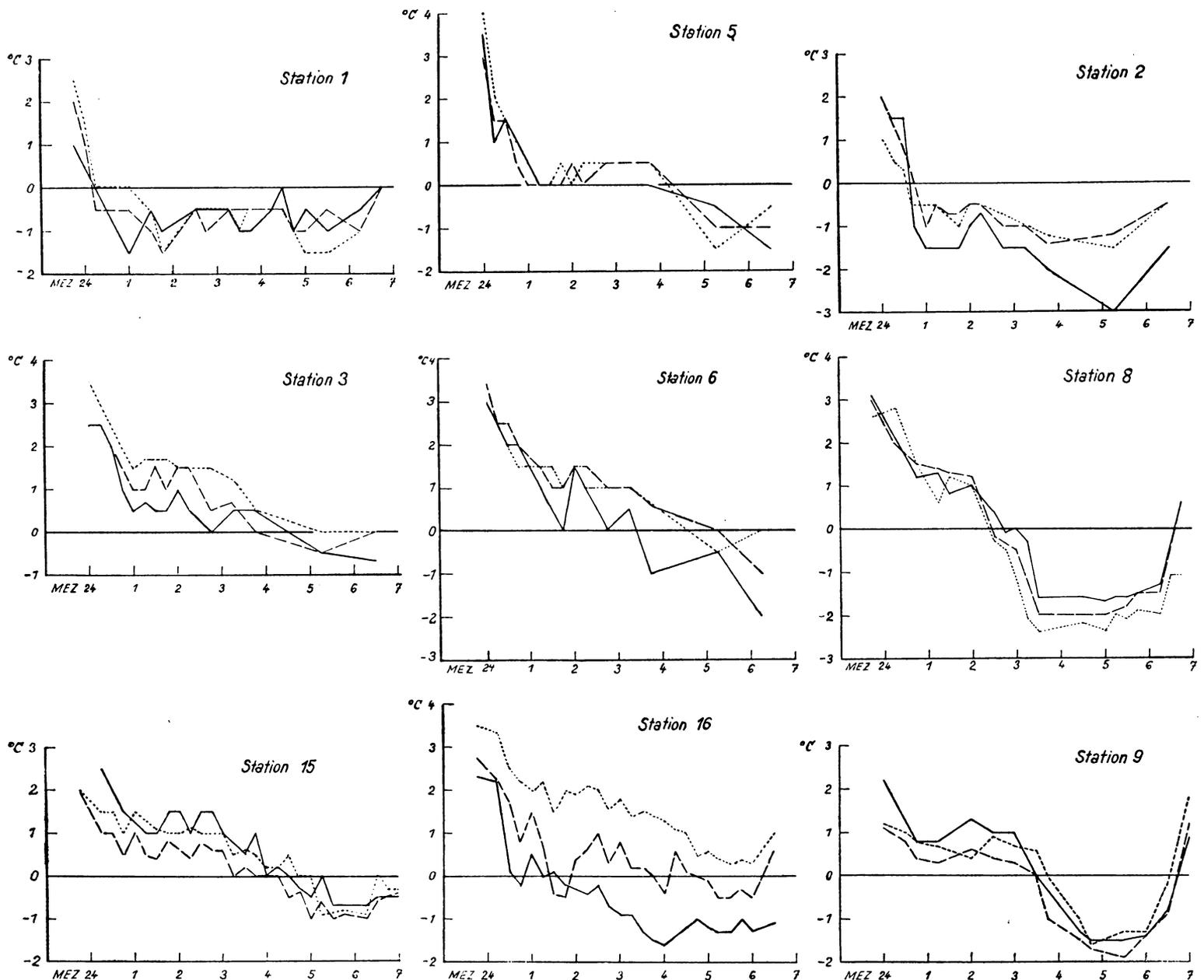


Abb. 90b. Frosträuchern mit Kaltluftabriegelung bei Ahrweiler, 8./9. Mai 1930.

Zu Beginn der Temperaturablesungen um 23 Uhr 45 sind die Temperaturen stark im Fallen. Der Gefrierpunkt wird an der Station 1 kurz nach Mitternacht unterschritten. Von den Meßstellen der Station 1 sind nur drei für die Darstellung ausgewählt, und zwar ist die Kurve des talunterst stehenden Thermometers ausgezogen, die des mittleren gestrichelt und die des taloberst stehenden punktiert gezeichnet (diese Einteilung ist für alle anderen Gruppendarstellungen, bei denen eine Auswahl getroffen werden mußte, gleichfalls gewählt worden).

Das talunterste Thermometer zeigt um 01 Uhr den tiefsten Wert von minus 1,5 Grad. Kurz vor diesem Zeitpunkt, nämlich um 00 Uhr 45, wird die zum Räuchern bestimmte Ofenbatterie in Stärke von 50 Räucheröfen zum Teil angesteckt, wobei die Öfen auf Rauchentwicklung eingestellt sind.

Wie aus dem Lageplan ersichtlich ist, steht diese Batterie quer zur Talachse und durchschneidet die Station 1 unterhalb des mittleren Thermometers. Kurz nach Einsetzen des Räucherns steigt das talunterste Thermometer auf  $-0,5$  bis  $1,0$  Grad. Der Anstieg in dieser Zeit zwischen 01 Uhr und 02 Uhr, der etwa  $0,8$  Grad beträgt, muß als Strahlungsschutzwirkung der Rauchdecke gewertet werden. Da die Thermometer ohne Schutzschirm aufgestellt sind, waren sie gegenüber Luft kälter. Durch die ausstrahlungsvermindernde Wirkung der Rauch-

decke wird diese Abkühlung um den obigen Betrag herabgesetzt. Die oberhalb gelegenen Thermometer, welche nicht vom Rauch betroffen sind, zeigen einen weiteren Rückgang bis auf  $-1,5$  Grad um 01 Uhr 45. Nach 2 Uhr brennt oberhalb der Gruppe 1 eine Kaltluftabriegelungsbatterie von 50 Öfen, welche auf starke Flammenwirkung eingestellt sind. Dazu wird die 60 m über der Talsohle stehende Batterie von 50 Räucherapparaten in Gang gebracht. Daraufhin erfolgt auch bei diesen oberen Thermometern ein Anstieg. Wenn wir die Messungen aus früheren Nächten heranziehen oder den Verlauf auf der Talsohle des Haupttales (Station 8) betrachten, müssen wir als sicher annehmen, daß die Lufttemperatur ohne Abriegelung der Kaltluft in Verbindung mit Räuchern weiter gefallen wäre und zwar auf  $-3,5$  bis  $-4,0$  Grad (siehe auch Verlauf an Station 2 nach Einstellen der Abriegelung).

Für die Zeit nach 02 Uhr hätte für den Fall, daß lediglich ein Strahlungsschutz durch die Rauchdecke vorhanden gewesen war, ein weiterer, wenn auch etwas verzögerter Temperaturrückgang erwartet werden müssen. Außer dem Effekt der Minderung der Erkaltung der Thermometer unter der Rauchdecke kommt also noch ein weiterer Effekt von etwa 2 Grad an der Station 1 hinzu, der auf die Anwärmung des Fallwindes zurückzuführen ist. Die Abriegelungsbatterie sollte ursprünglich unterhalb des letzten Thermometers der Gruppe 1 aufgestellt werden. Die Station 4 sollte die Differenzwerte zur Station 1 liefern. Da aber Station 4 ausfallen mußte und auch aus technischen Gründen die Aufstellung unterhalb der Gruppe 1 Schwierigkeiten machte, mußten wir darauf verzichten.

Infolge der zusätzlichen Heizwirkung der oberen Abriegelungsbatterie kann der Temperaturrückgang aufgehalten werden, so daß die Thermometer der Station 1 in der Folgezeit annähernd konstante Temperatur um  $-0,7$  Grad zeigen, statt  $-3,5$  bis  $-4,0$  Grad, wie zu erwarten wäre. Als kurz nach Sonnenaufgang die Abriegelungsbatterie außer Betrieb gesetzt wird, kann an dem taloberen Thermometer sofort ein Rückgang um 1 Grad festgestellt werden, während die beiden anderen Thermometer, vielleicht unter dem Schutz der Rauchdecke einiger noch in Tätigkeit befindlichen Räucherapparate der unteren Räucherbatterie, noch keine Änderung zeigen. Die Thermometer steigen erst gegen 06 Uhr endgültig an, da die Einstrahlung der Sonne auf dem Grund des engen Tales wirksam wird.

Die Werte der Stationen 3 und 6 am Weinbergshang liegen zu Beginn der Räucherung um 01 Uhr noch über dem Gefrierpunkt. Auch die am mittleren und oberen Hang bis zu 60 m über der Talsohle gelegenen Thermometer zeigen deutlich ein Bremsen des Abfalles. Daß bei der letzten Ablesung eines der Thermometer der Gruppe 6 bereits einen Anstieg zeigt, ist darauf zurückzuführen, daß es von der Sonne getroffen wird, die anderen jedoch noch nicht. Zuunterst nach der Talsohle zu steht das Thermometer, dessen Temperaturverlauf durch eine ausgezogene Linie dargestellt ist. Bei diesem Thermometer (Gruppe 6) sehen wir deutlich, daß der zeitliche Abfall nach Einsetzen der Abriegelungsbatterie aufgehoben ist und ein rapider Temperaturanstieg von  $1\frac{1}{2}$  Grad erfolgt. Danach tritt wieder ein Absinken ein, das sich jedoch in mäßigen Grenzen hält. Die Lufttemperatur bleibt zwischen  $+0,5$  und  $-1,0$  Grad; als aber nach 05 Uhr die Abriegelungsbatterie ihre Tätigkeit einstellt, erfolgt ein rapider Temperatursturz auf  $-2,0$  Grad. Die ganze rechte Hangseite ist übrigens wenig vom Rauch der Batterie bei 1 und der Abriegelungsbatterie oberhalb betroffen, da infolge der Krümmung des Tales der Fallwind sich mehr nach der linken Talseite wendet. Die Station 3 bekommt dichten Rauch von der oberen im Hang stehenden Räucherbatterie, bei der der Rauch in der Richtung nach der Station 5, also in der gleichen Richtung, die der Fallwind auf der Talsohle nimmt, getrieben wird. Eine deutliche Bremsung des Temperaturfalles nach 01 Uhr und eine Wirkung des Räucherns, die auf  $1\frac{1}{2}$ —2 Grad zu veranschlagen ist, kann bei den Meßstellen der Gruppe 3 festgestellt werden.

Auf der linken Seite des Tales liegen die Stationen 2 und 5. Die Station 2 hat ursprünglich den steilsten Temperaturfall von allen, der nach Einsetzen des Räucherns gänzlich abgestoppt wird. Nur das talunterste Thermometer zeigt, nachdem die Abriegelungsbatterie wenige Minuten vor 05 Uhr bei Sonnenaufgang ihre Tätigkeit einstellt, nach Sonnenaufgang einen plötzlichen Abfall von  $-3$  Grad. Der Erfolg des Abriegelns ist hier auf etwa 2 Grad zu beziffern; da jedoch zu dieser Zeit die Rauchentwicklung der einen Räucherbatterie noch anhält, ist der Gesamteffekt Räuchern und Abriegeln noch etwas größer.

Die Station 5, die auch ursprünglich einen sehr steilen Temperaturabfall zeigt, hat am meisten Nutzen von den Frostverhütungsmaßnahmen. Einerseits steht der Fallwind infolge der Krümmung des Tales mehr auf diese Seite gerichtet, andererseits zieht die gesamte Rauchdecke über diese Stationsgruppe hinweg. Der Erfolg, nämlich die Konstanz der Temperatur von  $+0,5$  Grad muß hier mit mehr als 2 Grad abgeschätzt werden. Bemerkenswert ist, daß wie anderweitig nach Einstellen des Abriegelns, als nur noch eine verhältnismäßig schwache Rauchwolke erzeugt wird, auch hier deutlich das von der Sonne noch nicht getroffene unterste Thermometer um 06 Uhr 30 einen Wert von  $-1\frac{1}{2}$  Grad erreicht. Die seit langem im Anrücken befindliche Kaltluft aus dem Ober-

laufe des Tales, die nun nicht mehr durch die Abriegelungsbatterie angeheizt wird, zeigt sich trotz der nunmehr überwiegenden Einstrahlung als bis in den halben Morgen fortbestehender Fallwind an.

Eine unerwartete Beobachtung wurde beim Ingangsetzen der Abriegelungsbatterie gemacht. Während der Fallwind vorher eine Stärke von 1,5 bis 1,8 m/sec aufwies, schwoll er plötzlich auf 4 m/sec an, als die Batterie in Tätigkeit trat. Die Folge der erheblichen Energien, die in dem schmalen Tal umgesetzt wurden, war eine machtvolle Verstärkung der Luftdrainage.

Daß ein Irrtum über die Ursache des Windsprunges nicht vorliegen kann, stellten wir fest, als die Batterie ihre Tätigkeit einstellte; denn sofort nahm der Fallwind wieder seine normale Stärke von etwa  $1\frac{1}{2}$  m/sec an. Dieses in der Folgezeit öfter wiederholte Experiment war so wirkungsvoll, daß wir später bei praktischen Frostberatungen überall eine stärkere Luftdrainage in kaltluffterfüllten Tälern durch kräftige Feuer empfahlen. Der starke Fallwind des oberen Ahrtales, der ursprünglich die doppelte Geschwindigkeit gegenüber dem Fallwind des Bachemertales aufwies, wurde gleichfalls bei Einsetzen der Abriegelungsbatterie in ungeahnter Weise verstärkt. Man hatte fast den Eindruck, als ob die Räucheröfen von ihm ausgeblasen würden. Seine Geschwindigkeit schätzten wir, als die Abriegelungsbatterie in Gang war, bis zu 6 und 8 m/sec (Abb. 193, Taf. 6).

Auf der Sohle des Haupttales befand sich die Station 8, welche von der Kaltluft des Bachemertales überflutet wurde. Die Wirkung der Rauchdecke auf die Thermometer als reiner Strahlungsschutz läßt sich als schwächerer Temperaturrückgang beobachten; dann trat das von uns so häufig beobachtete weitere Absinken bei einfacher Strahlungsschutzverminderung auf. In der Zwischenzeit füllte sich das Talbecken von Ahrweiler immer mehr mit Kaltluft. Vielleicht ist eine gewisse Konstanz auch hier zu bemerken, jedoch ist dies nicht sicher. Wir haben im Gegenteil den Eindruck, als ob gerade die Meßergebnisse der Station 8 den geringen Einfluß des Frosträucherns in einem Kaltluftseegebiet zeigten. Nun lag die Station 8 auf der Talsohle, die für Weinbau nicht in Frage kommt und infolgedessen uns in praktischer Hinsicht nicht besonders interessierte. Der nicht sehr stark geneigte Südhang, an welchem sich die Station 9 befand, ist jedoch mit Reben bestanden, und hier sahen wir nur ein Einwirken der Rauchdecke.

Die Ausstrahlungsverminderung an den Thermometern machte sich zunächst bemerkbar, es ist jedoch kaum eine Minderung des Kaltluftzuflusses vom geneigten Hang oberhalb anzunehmen. Es handelte sich im übrigen nicht um den Rauch der Batterie über Station 9, welcher nämlich bergwärts abzog, sondern um den Rauch, der sich im Haupttal angesammelt hatte. Mit dem Effekt konnte man bis gegen 03 Uhr zufrieden sein. Er mochte 1—1,5 Grad betragen. Dann aber füllte sich allmählich das Talbecken mit Kaltluft; auch der Weinbergshang tauchte in den Kaltluftsee hinein. Erst  $\frac{1}{2}$  Stunde nach Sonnenaufgang war die tiefste Temperatur festzustellen. Der um 06 Uhr 30 beginnende steile Anstieg war auf die Erwärmung der Thermometer durch die Sonneneinstrahlung zurückzuführen.

Zum Schluß sei noch ein Vergleich der Thermometergruppen 22 und 9 gemacht. Die Werte auf der Darstellung wurden aus sämtlichen Thermometern gemittelt; beide Stationen lagen im Weinberg an einem südöstlich geneigten Hang. Der Hang war bei der Gruppe 22 140 m, bei der Gruppe 9 dagegen nur 60 m hoch. Der Sonnenaufgang trat ganz kurz vor 05 Uhr ein. Die Thermometer der Station 22, die am Steilhang und höher über der Talsohle aufgestellt waren, zeigten stets höhere Werte als die der Gruppe 9 und reagierten bald durch Anstieg, während mehr als eine Stunde verging, bis die viel tieferen in den Kaltluftsee eintauchenden Thermometer der Station 9 an der allgemeinen Erwärmung teilnahmen. Die höheren Werte der Station 22 gegen Station 9 waren sicherlich außerdem auf die Beseitigung der Kaltluft am Fuße des Weinbergshanges durch die darunter stehende Gruppe von Räucherapparaten zurückzuführen. — Die Beschreibung der anderen Thermometergruppen würde zu weit führen, da man sie in vielen Fällen nicht einfach typisieren kann. Die Vielfältigkeit der Einflüsse gegeneinander abzuwägen ist schwierig. Bei den beschriebenen Stationsgruppen war dies am ehesten möglich.

Die Aufstellung der Räucherapparate war nicht immer am wirkungsvollsten getroffen; z. B. sollte die Ofenbatterie oberhalb der Station 18 und 9 ein Zufließen der Kaltluft von oben verhindern. Diese Kaltluft fließt jedoch in ganz schwachem seichtem Strom. Das Bekämpfen solcher Fallwinde durch Sperrfeuer ist zwecklos. Nur dort, wo der Fallwind in enge Bahnen zusammengedrückt wird, ist die Errichtung von Abriegelungsbatterien sinnvoll. Der Rauch der Räucherbatterie oberhalb der Gruppe 9 kam dem Ahrtal überhaupt nicht zugute, sondern strömte mit der aus dem Talbecken abgehobenen Warmluft bergabwärts mit. Viel besser hätte man die Räucherbatterie auf Brand gestellt und am unteren Rand der Weinberge zur Bekämpfung des Kaltluftsees benutzt, wie es unterhalb der Station 22, zwischen den Stationen 9 und 11 der Fall war.

Erfroren war in der Versuchsnacht nichts in diesem Teil des Ahrtales, von einigen kleinen Spitzenbeschädigungen in den Weinbergen unterhalb der Thermometergruppe 12 abgesehen. In den Frostlagen des oberen Ahrtales und besonders auch weiter abwärts im Ahrtal unterhalb Bad Neuenahr wurden dagegen beachtliche Frostschäden an den Reben beobachtet.

Der zahlenmäßige Effekt des Frosträucherns in Verbindung mit der Kaltluftabriegelung war schwer abzuschätzen. Er betrug unserer Schätzung nach für die Weinberge (nicht für die Stationen) von Bachem,  $1\frac{1}{2}$ —2 Grad, für die Weinberge bei Gruppe 9 knapp 0,5 Grad und für die übrigen Weinberge 1— $1\frac{1}{2}$  Grad.

Auf Grund der gewonnenen Erfahrungen haben wir inzwischen von einer weiteren Verwendung des Frosträucherns im Ahrtal sowie überhaupt in Tallagen in jedem Fall abgeraten, auch wenn gleichzeitig Kaltluftabriegelung möglich war. Von den 150 ha Weinbergsfläche in dem beschriebenen Gebiet mögen etwa 110 ha in Bebauung sein und von diesen sind rund 30 ha stark frostgefährdet. Wenn statt der im Erfolg so ungenügenden Räucher- und Abriegelungsaktion die fraglichen 30 ha Weinberg mit Geländeheizung versehen sind, kommt man billiger und dabei völlig sicher zum Ziel. Die Umstellung auf Beheizung mit Briketts ist im Ahrtal seit 1935 im Gange.

#### H. Zusammenfassung.

1. Der Gesamtkomplex der Wirkung künstlich erzeugter Lufttrübungen ist in folgende Einzelwirkungen zu zerlegen:

*Wirkung Ia.* Eine Decke aus festen oder flüssigen Lufttrübungen kann die Weiterabkühlung der Blätter gegen Luft aufheben oder mildern;

*Ib,* sie kann die effektive Ausstrahlung der Bodenoberfläche so verlangsamen, daß die im Boden zur Oberfläche nachrückende Wärme die abgestrahlte ersetzen kann, so daß die Bodenoberfläche und bodennahe Luft wärmer bleiben;

und *Ic,* sie kann das Auftauen der gefrorenen Pflanzen verlangsamen.

*Wirkung II.* Die der Luft künstlich beigemengten festen und flüssigen Teilchen ermöglichen die Anlagerung von Wasser, so daß Kondensationswärme frei wird.

*Wirkung III.* Bei den Verfahren wird durch chemische Umsetzungen Wärme frei.

2. Bei den in- und ausländischen Versuchen, die wir nachprüfen konnten, ist es unmöglich gewesen, eine nachträgliche Zerlegung in die Einzeleffekte zu machen, und auch uns ist es nur in unvollkommenem Maße gelungen.

3. Die Wirkungen Ia bis Ic erfüllen alle Lufttrübungsverfahren gleichmäßig gut, vorausgesetzt, daß hinreichende Dichte der künstlichen Wolke erzielt wird. Im Bereich der langwelligen Erdstrahlung absorbieren alle Lufttrübungen praktisch zu 100 %. Sind daher die künstlichen Wolken sehr dicht, so wird die Unterkühlung der Blattoberflächen gegen Luft aufhören, sind sie weniger dicht, wird sie nur entsprechend gemildert. Sie wirken gleichermaßen verlangsamer in Bezug auf das Auftauen der gefrorenen Pflanzen, da sie bei entsprechender Dichte die Einstrahlung vermindern. In den bekannt gewordenen Versuchen und nach unseren eigenen Erfahrungen ist der Nutzen des mehr oder weniger schnellen Auftauens für die meisten Kulturpflanzen reichlich problematisch.

Auch die Wirkung II, nämlich die Möglichkeit der Kondensation an den Oberflächen ihrer Teilchen, ist allen Lufttrübungsverfahren eigen. Hier treten allerdings beachtliche Unterschiede auf, indem offenbar die Schwefelsäurenebel und Phosphortrübung durch ihr Bestreben, den Wasserdampf der Luft an sich zu reißen, wesentlich aktiver sind als die anderen Lufttrübungen und größere Wärmemengen durch Kondensation freimachen.

Auch die Wirkung III ist im Grund bei allen Verfahren vorhanden, nur in verschieden starkem Maße. Sehr beachtlich sind die Wärmemengen, die als molekulare Wärme bei der Bildung der Schwefelsäure und der Bildung von Phosphorpentoxyd entstehen. Um eine Größenordnung geringer sind dagegen diejenigen, welche bei Ammonchloridbildung freiwerden. Während nun bei den ersten Verfahren noch größere Wärmemengen durch Lösungswärme hinzukommen, wenn die konzentrierten Säuren Wasser absorbieren, ist dies bei Ammonchloridnebel nicht der Fall.

Auch die Rauchdecken aus Bergermischung, Räucherpulver und Rauchraketen usw. entstehen unter Wärmeentwicklung, weil hierbei Brandsätze mitwirken.

Beim Frosträuchern werden je nach Material und Räuchervorrichtung mehr oder weniger große Mengen des Materials verbrannt und der Rest als unvollständig verbranntes kohlenstoffhaltiges Material, als Ruß, freigemacht. Bis mehr als 50 % der dem Material eigenen Verbrennungswärme kann auf diese Weise als Wärme frei werden.

Wenn man die umgesetzten Materialmengen überrechnet, spielt eigentlich nur beim Räuchern die in die Wärmebilanz des bodennahen Luftraums von der chemischen Seite her eingebrachte Wärme eine wesentliche Rolle. Beim Vernebeln ist sie noch eben bemerkbar in den den Erzeugungsstellen nahegelegenen Nebelpartien, doch ist sie bereits in einer Entfernung von 8—10 m von den Nebelfässern nicht mehr meßbar.

Während bei den großen Materialumsätzen der Räucherverfahren der Übergang zur Geländeheizung häufig bereits vorhanden ist, ja Heizanteil überwiegen kann, ist in der Gesamtrechnung die chemische Wärme der Nebelverfahren zu vernachlässigen.

4. Die wesentliche Wirkung der Lufttrübungsverfahren ist die Dauerwirkung, die die Rauchdecken über einem Gelände dadurch hervorrufen, daß sie ständig den Betrag der effektiven Ausstrahlung herabsetzen. Wir haben bei den rechnerischen Überlegungen gesehen, daß die effektive Ausstrahlung von  $0,12 \text{ gcal/cm}^2 \cdot \text{sec}$  auf  $0,06$  in der Praxis zurückgehen kann. Da diese Wirkung dauernd anhält; solange die künstliche Wolke über dem Gelände liegt, besteht in diesem Ausstrahlungsschutz die Hauptwirkung der Verfahren.

Hierbei zeigen sich nun folgende Eigentümlichkeiten, die ausschlaggebend für die Beurteilung des praktischen Wertes der Verfahren sind:

- a) Die Ausbreitung und die Dauerhaftigkeit der künstlichen Wolken ist weitgehend von Stärke, Richtung und Art der Luftbewegung abhängig. Einem plötzlichen Richtungswechsel bei schwachem Wind kann allerdings durch bewegliche Geräte etwas begegnet werden.
- b) In ebenem Gelände, in welchem sich, unter Voraussetzung des Fehlens einer horizontalen Luftbewegung, Frostentstehungs- und Frostschadengebiet decken, d. h. also, wo die Kaltluft an Ort und Stelle entsteht und liegen bleibt, wird eine günstige und ausreichende Wirkung bei Spät- und Frühfrösten allen Lufttrübungsverfahren unter Voraussetzung hinreichender Dichte zuzusprechen sein.
- c) Im hängigen Gelände treten einmal Fallwinde auf, die es schwer ermöglichen, eine geschlossene Decke zu halten, und zum zweiten erfassen wir hier, wenn wir ein Frostschadensgebiet im Unterlauf eines Tales mit künstlichen Wolken zudecken, nicht die eigentlichen Frostentstehungsgebiete.

Auf großen Flächen im Oberlauf des Tales entsteht ungehindert weiter Kaltluft, die sich beim Abströmen unter die erzeugte künstliche Wolke schiebt und deren Schutz zum größten Teil illusorisch macht. Es bleibt nur noch der kleine unter Ia aufgeführte Effekt zurück, der im übrigen in kräftigen Fallwinden infolge der Ventilation sowieso gemindert ist.

Alles in allem ist zu sagen, daß, selbst bei Anwendung der Kaltluftabriegelung durch Sperrfeuer, die nur beim Frosträucherverfahren möglich ist, alle Lufttrübungsverfahren im gebirgigen Gelände mehr oder weniger versagen müssen.

## VII. Erhöhung des Wasserdampfgehaltes der Luft als Frostschutz.

Hoher Wasserdampfgehalt der Luft stellt insofern einen Frostschutz dar, als Wasserdampf die infraroten Strahlen, also die von der Erde ausgehende langwellige Strahlung stark absorbiert. Bei einer wasserdampfreicheren Atmosphäre wird daher infolge Absorption der Erdstrahlung die effektive Ausstrahlung schwächer als bei trockener Luft sein, was eine geringere Abkühlung der bodennahen Luftschicht bzw. der Pflanzen mit sich bringt (s. S. 95).

Von jeher wurde beim Frosträuchern, sofern es sich nicht um Verwendung nur rußerzeugender Stoffe handelte, Wert darauf gelegt, daß die Schwelfeuer gleichzeitig auch Wasser verdampften. Hierfür lassen sich aus der landwirtschaftlichen Praxis zahlreiche Beispiele anführen. Reisigfeuer wurden mit nassem Gras, Laub, Unkraut oder Mist bedeckt, und diese Materialien wurden gelegentlich noch mit Wasser benetzt.

Schon Kellermann<sup>177)</sup> schlug infolge der Bedeutung eines hohen Wasserdampfgehalts der Luft vor, diesen künstlich zu erhöhen. In der Praxis sind diese Verfahren außer stellenweise in Nordamerika und in Ungarn weiters nicht angewandt worden. Dieses „Dampfräuchern“ wurde in amerikanischen Obstgärten mit fahrbaren Dampferzeugungsapparaten durchgeführt; in Ungarn (Lüstner-Molz<sup>226)</sup> wurde es derart angewandt, daß man auf Pfahlrosten über Feuergruben nasse Strohbindel ausbreitete, die ständig feucht gehalten wurden. 1932 hat der ungarische Ingenieur Bedö einen Apparat konstruiert, mit dem er Rauch, Wasserdampf und Kohlensäure zur Verhinderung der Ausstrahlung erzeugte. Diese Vorrichtung wurde auch von dem „Kgl. Ungar. Meteorologischen“ und dem „Ampelologischen Institut des Ungar. Ministeriums für Landwirtschaft“ günstig begutachtet, doch hat man von ihrer weiteren Verwendung wenig gehört.

Auch die um die Jahrhundertwende von Lemström<sup>217)</sup> gefertigten Fackeln (siehe Geschichtliches über das Räucherverfahren als Frostschutz) sollten nach beigefügter Gebrauchsanweisung mit feuchtem Torfmoos oder Gras bedeckt werden, „um dieselben zum Hervorbringen von Wasserdampf zu bringen“.

Nach Lüstner und Molz<sup>226)</sup> beruht die günstige Wirkung des Rauches, wie er beim Verbrennen von Stallmist erzeugt wird, vor allem auf der wärmeabsorbierenden Wirkung des sich entwickelnden Ammoniakgases. Auch die Wirkung des Teerrauches ist nach ihrer Meinung teilweise auf den Gehalt an Ammoniak zurückzuführen.

Allerdings absorbiert Ammoniakgas im Bereich der Erdstrahlung ( $\lambda_{\max} = 10 \mu$ ) praktisch restlos, doch können die geringen Mengen freier Ammoniak keinesfalls eine beachtliche Rolle spielen.

W. Schmidt<sup>342</sup>) hat unter Zuhilfenahme von Thermometern versucht, den Grad der Schutzwirkung des durch Reisigfeuer erzeugten Rauches festzustellen. Bei seinen Untersuchungen bediente er sich der von den österreichischen Winzern angewandten Methode, Pferdemist in kleinen Mengen auf das Feuer zu werfen. Die durchgeführten Strahlungsmessungen ergaben für diesen Rauch eine Herabsetzung der effektiven Ausstrahlung um 70, ja zuweilen 80 % der Ausstrahlung gegen den freien Himmel, indes die Verminderung durch den Rauch verbrennenden Teers durchschnittlich nur 30 % betrug. Solche Vergleiche bezüglich der Art des Rauches müssen aber insofern nur als orientierende Messungen beurteilt werden, da ja die erzielte Wirkung außerordentlich stark von der Dichte der Rauchdecke abhängt und hierüber Wertzahlen von Schmidt<sup>342</sup>) nicht angegeben sind.

Auch bei der Geländeheizung finden sich mehrfach Vorschläge, die erzeugte Wärme gleichzeitig zur Verdampfung von Wasser zu verwenden.

Schon 1912 wurden am Wetterbüro zu San Francisco für diese Zwecke zwei Ofentypen gebaut: bei dem einen Modell wurde Wasser auf elektrischem Wege zum Verdampfen gebracht, während das andere Modell aus einem kleinen offenen Ölheizgerätschaft bestand, der in einen größeren Behälter gestellt wurde. Auch dieser war oben offen und zum Teil mit Wasser gefüllt. Durch diesen Wassermantel sollte nicht nur eine Anreicherung der bodennahen Luftschicht mit Wasserdampf, sondern auch eine nicht zu hohe Erwärmung der äußeren Ofenwand bewirkt werden, damit dieselbe nur möglichst langwellige Strahlung aussendet. Wie aber die Entwicklung der Frostbekämpfungsmaßnahmen zeigt, hat diese Methode niemals eine bemerkenswerte Verbreitung erfahren. Denn der Effekt, der infolge Absorption der langwelligen Strahlung durch diese geringen Mengen Wasserdampf erzielt wird, kann, wie auch Young angibt, nur unbedeutend sein.

Löschnig<sup>224</sup>) hat 1914 die Idee wieder aufgegriffen und bei Wien einen Versuch durchgeführt, bei dem er mit Wasser gefüllte Blechpfannen auf Kohlenöfen setzte. Der Ansicht von Löschnig, daß der Effekt durch die Dampfbildung anfangs 1,4 Grad betrug, sich bis auf 2 Grad steigerte und im Durchschnitt bei 1,5 Grad lag, können wir nicht beipflichten, da es bei der gewählten Versuchsanordnung nicht möglich ist, den Heizeffekt von dem Absorptionseffekt zu trennen.

Auch die Öffentliche Wetterdienststelle in Hamburg hat vor einigen Jahren besondere kleine Brikettheizgerätschaften verwendet, deren Deckel als Pfanne ausgebildet und zur Aufnahme von Wasser bestimmt war. Wie C. Bender<sup>50, 51, 52</sup>) mitteilt, wurden bei dieser Beheizungsart Temperatureffekte von noch nicht einem Grad erzielt. Die Versuche fanden allerdings in so kleinem Umfang statt, daß diesem Rückschluß auf die Wirkung keine Allgemeingültigkeit beizumessen ist.

Zitieren wir im folgenden noch die Ausführungen von H. Foß.<sup>108, 109</sup>) Dieser sagt etwa: „Die Rückstrahlung hängt von der gesamten Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre ab. Bei normaler Sommertemperatur kann man damit rechnen, daß die Luft von der Meeresoberfläche bis zu 8000 m Höhe 20—23 kg Wasserdampf über jedem Quadratmeter Fläche enthält. Wenn wir annehmen, daß 1 m<sup>3</sup> Luft in der Nähe der Erde 12 g Wasserdampf enthält, so sehen wir, daß die gesamte Luftsäule über 1 m<sup>2</sup> Oberfläche 2000mal so viel enthält als der niedrigst liegende Kubikmeter. Wenn wir diese Verhältnisse ins Auge fassen, finden wir, daß keine große Möglichkeit besteht, die gesamte Wasserdampfmenge in der Atmosphäre zu vermehren.“

Die bodennahe Luftschicht ist im Augenblick des Eintritts von Frosttemperaturen in Spät- und Frühfrostnächten gänzlich oder nahezu gänzlich mit Wasserdampf gesättigt. Wenn also eine Anreicherung der Luft mit Wasserdampf überhaupt noch möglich ist, so könnte die ausstrahlungshemmende Wirkung tatsächlich nur noch um geringes gesteigert werden, weil ja im allgemeinen nur die untersten, wenig mächtigen Luftschichten beeinflussbar sind.

Daß eine Zunahme der Feuchtigkeit über großen Gebieten sich günstig auswirken kann, hat Hamrick<sup>143, 144</sup>) bei der allgemeinen Einführung der künstlichen Bewässerung um 1911 in der Grand Valley in Colorado festgestellt. Er konnte nachweisen, daß die künstliche Bewässerung von bedeutendem Einfluß auf die lokale Nebel- und Wolkenbildung war, wodurch die Frostgefahr vermindert wurde. Allerdings spielt hier das Freiwerden der Kondensationswärme eine wichtige Rolle.

An Stelle des problematischen Versuchs, durch Anreicherung der untersten Luftschicht mit Wasserdampf eine vermehrte Absorption der langwelligen Erdstrahlung und dadurch einen Frostschutz zu erzielen, kann man daran denken, die bei der Kondensation des Wassers frei werdende Wärme als Frostschutzmittel zu benutzen. Dabei ist zu bemerken, daß der Verdampfung von Wasser durch Schwelfeuer eine viel bessere Wirkung zukommt, als der Verdampfung über Feuern mit starkem Auftrieb. Denn da wasserdampffreie Luft leichter ist als wasserdampferme, wird der schon bei den gewöhnlichen Heizern starke und unerwünschte Aufwind über diesen Heizmodellen eher noch gefördert.

Wenn wir in den untersten Luftschichten den Wassergehalt vermehren, so können wir eine stärkere Taubildung hervorrufen. Nach Homén<sup>159)</sup> wird in klaren Nächten 200 g Tau je m<sup>2</sup> gebildet; ungefähr die Hälfte hiervon stammt von der Erde und den Pflanzen, die andere Hälfte aus der Luft. Die Rechnung, die Foß macht, um die für die Verdampfung des später kondensierenden Wassers nötige Energie festzustellen, führt bei Zugrundelegung der Homénschen Zahlen zu Werten, die eine praktische Lösung als unwahrscheinlich erscheinen lassen.

Thalheim<sup>377)</sup> hat einen anderen Vorschlag zur Anreicherung der bodennahen Luftschicht mit Wasserdampf gemacht, und zwar soll durch Heizrohre Wasserdampf in den Erdboden geleitet werden, der bei seinem Austritt die das Heizrohr überlagernde Erdschicht erwärmt und durchfeuchtet, ihr Leitvermögen erhöht und den Taupunkt der bodennahen Luftschicht heraufsetzt. In der Nähe von Trier wurde 1929 ein Versuch ausgeführt, eine Geländeheizung mit der Anreicherung der Luft mit Wasserdampf zu verbinden, und zwar wurde ein Rohrnetz an den Kessel einer Dampfmaschine angeschlossen. Der Heißdampf trat aus Düsen aus und brachte zweifelsohne eine Erwärmung der bodennahen Luftschicht. Doch dauerte die Vorführung nur einige Minuten, da dann der Dampfverrat der Maschine erschöpft war, obwohl es sich um eine ziemlich große Maschine, die ein ganzes Sägewerk betrieb, handelte.

Auch Hollrung<sup>158)</sup> versuchte Frostschädigungen mit Hilfe von Wasserdampf zu verhüten. Er hat zu diesem Zweck auf der Spitze hoher Masten Zerstäubungsdüsen angebracht, aus welchen in Zeiten der Frostgefahr Wasser in Form feinen Nebels geblasen wurde. Dabei sollen durch Kondensation des Wasserdampfes zu Wassertröpfchen nennenswerte Mengen Wärme frei werden, welche den gefährdeten Pflanzen vor dem Erfrieren Schutz gewähren.

Es ist zu bezweifeln, ob die von Hollrung angegebene Methode tatsächlich eine Kondensation darstellt. Selbst bei Anwendung ungewöhnlich großer Drucke, die in der Praxis wohl kaum in Frage kommen, wird es sich sicher vorwiegend um eine Zerteilung des Wassers in feine Tröpfchen handeln. Demnach gehört die Hollrung'sche Methode zweifelsohne in die Gruppe der Beregnung als Frostschutz.

## VIII. Die Heizung als Frostschutz.

### A. Die Geschichte der Frostheizung.

#### 1. Die Entwicklung in den Vereinigten Staaten von Amerika.

Die Frostbekämpfung durch Heizen hat sich offenbar aus der bereits im geschichtlichen Altertum bekannten Methode des Frosträucherns entwickelt. Wenn auch schon früher an verschiedenen Orten das Heizen in Kombination mit Räuchern angewendet wurde, so hat man sich doch gerade in Kalifornien am eifrigsten um dessen praktische Handhabung bemüht. Es ist kennzeichnend für den vor allem kaufmännisch eingestellten Amerikaner, daß die wissenschaftliche Seite der Frostbekämpfung mit der ungeheuer raschen Entwicklung und Ausbreitung praktischer Maßnahmen in keiner Weise Schritt halten konnte. Dies trifft vor allem für die anfängliche Entwicklung zu.

Wir hatten schon früher bei Besprechung der Bedeckungsmaßnahmen erwähnt, daß die Entwicklung der Frostbekämpfungsmethoden in Nordamerika einen anderen Weg einschlagen mußte als in Deutschland, da dort die Eignung der Frostschutzmaßnahmen für Obstbäume, insbesondere Citrusplantagen, im Vordergrund steht. Dazu kommt, daß sich die Maßnahmen nicht nur gegen die frühjährlichen Kälterückfälle, sondern in viel größerem Umfange gegen die Winterkälte in subtropischen Breiten zu richten haben. Überdies mußten noch besondere wirtschaftliche Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Heizstoffe in Form von Kohle und Öl stehen in den Vereinigten Staaten reichlich und billig zur Verfügung. Was war da näher liegend als eben der Versuch, die gefährdeten Kulturen durch Heizung zu schützen?

Im Winter 1895/96 unternahm der Riverside Horticulture Club in Zusammenarbeit mit dem Wetterbureau die ersten Heizversuche in den Citrusplantagen Kaliforniens; dabei wurden Kohlen in Drahtkörben verbrannt. Ermuntert durch das damalige günstige Ergebnis, traf man unmittelbar nach den großen Frostschäden dieses Winters in weiteren Gebieten Kaliforniens und den angrenzenden Staaten Gegenmaßnahmen. Von einer allgemeinen Frostabwehr kann zur damaligen Zeit natürlich noch nicht gesprochen werden; sie war vielmehr Sache des Unternehmungsgeistes einzelner Plantagenbesitzer.

Neben Kohle kam damals Holz, häufig in Verbindung mit Kohle, als Heizmaterial zur Anwendung. Erst im Winter 1900/01 benutzte man in Kalifornien zum erstenmal Ölheizungen.

Schon wenige Jahre später tauchte die Frage nach den Ursachen der Schutzwirkung durch Heizung auf; es war also zu entscheiden, ob der Heizeffekt oder der Räuchereffekt von ausschlaggebender Bedeutung sei. Fast durchweg geht die Antwort dahin, daß die Frostschutzwirkung vor allem dem Heizeffekt zuzuschreiben sei, daß aber eine Rauchdecke, besonders gegen Sonnenaufgang, zum Schutz der Pflanzen gegen eine allzu rasch

einsetzende starke Sonnenstrahlung sich günstig auswirke (O'Gara<sup>296</sup>). Nur Mc Adie<sup>240</sup>) stand damals der eigentlichen Heizwirkung noch mißtrauisch gegenüber; aber schon 1910 kam auch er zu dem Schlusse, daß die Heizung den Haupteffekt bringe, und zwar vor allem bei Benutzung vieler kleiner Heizer statt weniger großer Feuer.

Vielfach wird jedoch eine scharfe Trennung zwischen Räuchern und Heizen überhaupt nicht gemacht, was damit zusammenhängt, daß sie oft gar nicht durchzuführen ist, wie beispielsweise im Falle der offenen Ölfuerung.

In welchem verhältnismäßig großem Ausmaß, wenigstens auf einzelnen Plantagen, die Frostbekämpfung durch Heizen schon im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts durchgeführt wurde, zeigt ein Artikel, der am 13. Januar 1911 in der Pacific-Rural-Press erschien; danach hatte Teague, Manager der Limoneira-Co., über 91 ha Citrus-haine 12 Nächte hindurch erfolgreich geheizt. Dazu benötigte er insgesamt 21 000 Kohlenöfen und 50 000 Öfen.

Da bei der Heizung, vor allem bei offenen Feuer, im allgemeinen große Wärmemengen verloren gehen, hat Mc Adie auf der Suche nach günstigeren Methoden seine sogenannten Frostkerzen empfohlen.<sup>240</sup>) Diese wurden mittels einer Drahtschlinge in den Bäumen befestigt. Der Hauptnachteil der Kerzen war die kurze Brenndauer (nur etwa zwei Stunden) und die sehr starke Rußentwicklung, wodurch die Früchte unansehnlich wurden.

Schon um 1913 hatte man erkannt, wie wichtig eine gute Organisation ist, und führte daher den fruit-frost-service ein. Über diesen Spezialdienst sowie über die allgemeine Frostprognose, die Beratung im örtlichen Bezirk, die Forstwarnung durch automatische Geräte und die Organisation im Großen berichteten wir an anderer Stelle (S. 36).

Solange die Früchte-Erzeugungs-Industrie und also auch die Ernte noch verhältnismäßig klein waren, blieben auch die alljährlich durch Frostschaden verursachten Verluste innerhalb mäßiger Grenzen. Mit der schnellen Ausbreitung der Fruchtkulturen seit der Jahrhundertwende und vor allem mit der großen Zunahme des Wertes der hervorgebrachten Ernten stiegen die Verluste aber allmählich in die Millionen; denn kaum ein Landstrich der Vereinigten Staaten ist frei von der Gefahr frostschaadenbringender Winter- oder Frühjahrs-temperaturen, selbst wenn er in subtropischen Breiten liegt. Außerdem bewirken scharfe Fröste in diesen Kulturen leicht die Tötung des fruchttragenden Holzes.

Daher ist es verständlich, daß die Verbreitung der Heizmethode Hand in Hand mit der Ausbreitung der Kulturen ging. Die Verfrachtung der hierzu nötigen Öfen und des zugehörigen Brennmaterials nahm schließlich einen derartigen Umfang an, daß sogar die Verwaltungen von Eisenbahn und Schifffahrt ihre Frachtsätze für den Transport von Geländeheizöfen stark senkten; denn sie hatten ja auch den Vorteil vom Transport der geretteten Ernte.

Das rasche Anwachsen der Zahl der Heizkörper seit 1895/96 sei durch einige Angaben aus Kalifornien veranschaulicht; aus den anderen Staaten liegen leider keine zusammenfassenden Statistiken vor. Waren im Jahre 1914 in Kalifornien etwa eine Million Heizkörper in Gebrauch, so wurden allein in der Zeit von 1922 bis 1925 über 900 000 gekauft; von dieser Zahl entfallen 600 000 nur auf die Jahre 1924 und 1925. Wie Young<sup>422</sup>) mitteilt, waren an der Küste des Stillen Ozeans im Jahre 1928 über 21 000 ha Orangen- und Zitronenhaine mit Frostabwehrmaßnahmen ausgerüstet, das sind etwa 24 % der gesamten damaligen Pflanzungen mit einer Ofenzahl von rund 4 000 000. Diese Öfen wurden von den Pflanzern zu etwa 92 % mit Öl, die restlichen 8 % mit festen Brennstoffen geheizt. Spätere Angaben aus Kalifornien und den angrenzenden Staaten lassen vermuten, daß sich die Zahl der in Gebrauch befindlichen Öfen inzwischen verzehnfacht hat.

## 2. Die Einführung und Ausbreitung in Europa.

Die rasche Zunahme der Frostschadenverhütung durch Heizung in Verbindung mit den guten Erfolgen in den Vereinigten Staaten von Amerika lenkte die Aufmerksamkeit der europäischen Länder auf diese neue Frostbekämpfungsmaßnahme.

Während in der umfangreichen Arbeit von Lüstner und Molz,<sup>226</sup>) die 1909 erschien, noch nichts von der Heizung erwähnt ist, ließ sich die „Österreichische Obstbau- und Pomologengesellschaft“, deren Geschäftsleiter damals Löschnig war, im Jahr 1912 Petroleum- und Kohlenöfen nach amerikanischem Muster anfertigen. Bei diesen Versuchen, die in den Obstgärten der Höheren Lehranstalt für Obst- und Gartenbau in Eisgrub durchgeführt wurden, erzielte man Temperaturzunahmen von rund 1 Grad C. Nähere Angaben über die je Flächeneinheit aufgewandte Heizenergie und die Meßmethoden sind leider nicht vorhanden. Es ist dies ein Mangel, den wir bei den Versuchsberichten bis in die heutige Zeit hinein immer wieder antreffen und beanstanden müssen. Die Folge davon ist, daß nur selten wirklich vergleichbare Versuchsergebnisse vorliegen.

1914 wurde dann von dem niederösterreichischen Landesauschuß eine eigene Studienkommission für Fragen der Frostbekämpfung eingesetzt. Die von ihr durchgeführten Heizversuche und deren Ergebnisse wurden

später von Löschnig<sup>223</sup>) veröffentlicht, und wir werden weiter unten auf diese Messungen ausführlicher zu sprechen kommen. Wenn Löschnig auch noch nicht so scharf die an sich nötige Trennung von Heizeffekt und Rauchwirkung durchführte, so erkannte er dennoch schon die Überlegenheit des ersteren Faktors, da er schreibt: „Auch bei uns muß der Heizeffekt in den Vordergrund gestellt werden. Die Rauchentwicklung kommt erst in zweiter Linie unterstützend in Frage.“

In Deutschland hat man 1914 bei Bensheim a. d. Bergstraße die ersten Kohlenheizöfen in Gebrauch genommen (Pfeiffer). — 1929 hat O. Kessler als Versuchsleiter des Reichsausschusses für Frostabwehr im deutschen Weinbau anfangs Öle, besonders diejenigen, welche bei der Verkokung der Braunkohle als Nebenprodukt anfallen, benutzt. Kessler ist aber später aus Gründen der Rohstoffbeschaffung gänzlich von der Ölheizung abgegangen und empfahl von da an mehr die Benutzung von Abfallstoffen der Kohlendestillation, wie Rohnaphtalin und Anthrazenpech, und von festen Brennstoffen, wie Braunkohlebriketts, die teils offen ausgelegt, vornehmlich aber in besonderen Eimeröfen verbrannt werden. Eingehende Versuche sind in dem Abschnitt über die Meßergebnisse beschrieben (Seite 174).

Auch Holland, wo die Nachfröste im Obst- und Frühgemüsebau oft empfindliche Schäden hervorrufen, scheint man immer mehr zu deren Bekämpfung durch Heizen überzugehen. Die dortige Handhabung der Methode hat sich stark an die in Deutschland übliche angelehnt, zumal nach dem Besuche von Dozenten aus Wageningen in Trier bei O. W. Kessler. Allerdings wird in den Niederlanden im Gegensatz zu uns das Heizen mit Öl bevorzugt, da dieses dort ja in reichlicherem Maße und billiger zur Verfügung steht. Der in den Wageningen Versuchen verwendete Ölofen ist eine genaue Kopie des Geländeheizofens von Thielmann (Abb. 196 g, Tafel 7, siehe auch Seite 155).

In England hat die Heizung nur geringe Verbreitung erlangt, da die Obstgärten meist nur kleine Ausdehnung haben oder sehr zerstreut liegen. Es liegt lediglich eine kurze Notiz über einen kombinierten Heiz- und Räucher-versuch vor, bei dem auf einem etwa 300 ar großen Obstgarten in Südengland durch Verbrennung von Kohle in eimerförmigen Öfen Apfel- und Pflaumenbäume geschützt wurden. Zur Unterstützung der in einer Dichte von einem Ofen je 130 m<sup>2</sup> aufgestellten Heizer wurde gleichzeitig durch Verbrennen von Öl geräuchert. Es liegen jedoch keine Angaben über den Verbrauch an Heizmaterial und den Wirkungsgrad vor. Wir konnten auch trotz eifriger Bemühungen keine weiteren Nachrichten über Maßnahmen zur Frostschadenverhütung in England erhalten.

Die skandinavischen Länder haben trotz ihrer weniger frostempfindlichen landwirtschaftlichen Kulturen in ihrer kurzen Vegetationsperiode empfindliche Frostschäden aufzuweisen. Heizmethoden finden jedoch keine Verwendung. In den besonders frostgefährdeten Gebieten handelt es sich meist gerade um die Gegenden, in denen wegen der Kürze des Sommers und der niederen mittleren Jahrestemperatur die Auswahl der Kulturpflanzen sowieso begrenzt ist. Nach Angaben von Foß<sup>108</sup>) kann die Heizung bei den gewöhnlichen landwirtschaftlichen Produkten infolge ihrer Unrentabilität nicht angewendet werden.

In Finnland sind zur Frostschadenverhütung die sogenannten Lemström'schen Fackeln 1880 zur Ausbildung gekommen, deren Heizwirkung die gleichzeitig auftretende Räucherwirkung wohl noch übertrifft (Seite 148). Dies geht bereits aus den Untersuchungen von Homén<sup>159</sup>) hervor.

Von USSR wird erwähnt, daß Heizverfahren im Kaukasusgebiet, wo man Citrusplantagen gegen Frost zu schützen hat, zur Anwendung kommen. Die russischen Arbeiten, die im Literaturverzeichnis aufgeführt sind, bieten indessen nichts Neues.

In Frankreich kennt man fast nur das Räuchern zur Abwehr der Frostschäden. Beachtliche Heizversuche sind uns aus der französischen Literatur nicht bekannt.

Ob in Spanien Frostschadenverhütung betrieben wird, können wir nicht sagen; jedenfalls sind den spanischen Interessenten Beratungen von Trier aus zuteil geworden.

Auch in Ungarn und der Tschechoslowakei findet das Heizverfahren immer weitere Verbreitung, wobei in den bekannt gewordenen Fällen eine Fühlungnahme mit der Dienststelle in Trier vorausging.

### 3. Die Einführung in anderen außereuropäischen Ländern.

Von Nordamerika aus haben die Heizverfahren auch sehr bald Einzug in Australien gefunden. Die Entwicklung wurde durch die Rührigkeit der amerikanischen Öllieferanten sehr beschleunigt.

Versuche über die Wirkungsweise und die Abwandlung der Heizmethoden für die australischen Verhältnisse hat die Shell-Company durchgeführt. Außer zahlreichen Laboratoriumsversuchen wurden Feldversuche in größerem Ausmaß unternommen, von denen Großversuche bei Wanding und Hartcourt in Victoria besonders genannt seien. Dazu kommen Versuche des Frost-Fighting-Comitées in Lights Paß in Südaustralien mit Ölheizern. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden sorgfältig gesammelt, ausgewertet und mit allen zugänglichen Versuchsergebnissen

des In- und Auslandes verglichen. Die endgültigen Erfahrungen sind in einer Druckschrift der Shell-Company<sup>354</sup>) veröffentlicht.

In dieser Veröffentlichung wird die Behauptung aufgestellt, daß die Wirkung der Ölheizter von dem Vorhandensein einer Temperaturinversion wesentlich abhängig sein soll. Wenn eine Temperaturumkehr in einer gewissen Höhe stattfindet, so sollen die aufsteigenden Warmgase nicht nur aufgehalten, sondern sogar zu einem seitlichen Abwärtsströmen veranlaßt werden. Trotz dieser abwegigen Darstellung ist dieses Büchlein: „Prevention of Damage by Frost“ sehr lesenswert, da es viele Winke für den Praktiker bringt.

Im übrigen wurden in den letzten Jahren eine Reihe von Weinbauern Australiens von der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle in Trier beraten. Ferner wurden Beratungen abgegeben nach Brasilien und Paraguay, Palästina und Persien, so daß anzunehmen ist, daß auch dort Frostschadenverhütung getrieben wird.

## B. Die verschiedenen Heizverfahren.

### 1. Allgemeines über Brennstoff und Heizertypen.

Als Quelle der Wärmeenergie für die Freilandheizung kommt bis heute praktisch nur die durch Verbrennung an Ort und Stelle erzeugte Wärme in Betracht. Die Anwendung der Elektrizität ist, obwohl schon gelegentlich versucht, in erster Linie wegen der Kostenfrage bis heute noch nirgends über das reine Versuchsstadium hinausgekommen.

Auch von den Brennmaterialien mußte in der Praxis ein Großteil ausscheiden, obwohl die Wahl des Brennstoffes an sich von untergeordneter Bedeutung ist, sofern er nur die in der Zeiteinheit erforderlichen Kalorien abzugeben vermag. Dies trifft z. B. für den Grudekoks, das Koksprodukt der Destillation unserer ölreichen mitteldeutschen Braunkohle, bis jetzt nicht zu; auch mit besonderen Ofenrichtungen oder durch Beimengung von anderen Brennstoffen läßt er sich nicht schnell genug verbrennen.

Von dieser Forderung abgesehen ist die Anwendung der Geländeheizung letzten Endes eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Niedriger Preis und leichte Bedienung durch einige wenige Hilfskräfte gehören somit zu den ersten Erfordernissen. Aus diesem Grunde haben sich auch nur Öl und Kohle behaupten können, während die Verwendung von Holz heute gänzlich bedeutungslos ist.

Von den beiden erstgenannten Heizstoffen kommt dem Öl die größere Verbreitung zu; Ölheizter verlangen nämlich bei Anwendung der richtigen Ölsorte weniger Aufsicht als Kohlenheizter. In Ländern allerdings, die über keine oder nur geringe Ölvorkommen verfügen, aber eigene Kohlengruben besitzen (Deutschland), wird die Verwendung von Kohle überwiegen.

### 2. Die festen Brennstoffe.

#### a) Stein- und Braunkohle.

Das Anzünden der Kohle erfordert besondere Hilfsmittel. In den Vereinigten Staaten gibt man ölgetränkte Abfälle, Kleinholz und Reisig, auch getrocknete Pflanzkerne zur Kohle; am besten sollen sich Juteballen, die in Paraffin getränkt waren, wegen ihrer Wetterbeständigkeit bewährt haben. In Deutschland verwendet man als Anzündmaterial vorwiegend Holzwolle oder Sägespäne, die mit Rohnaphtalin oder Anthrazenrückständen gemischt werden.

Die so vorbereiteten Feuerstellen lassen sich verhältnismäßig leicht mit Hilfe einer Fackel oder einer besonderen Anzündkanne in Brand setzen.

Die Anzündlampe besteht aus einem Behälter, der 3—5 Liter faßt, und einem Ausflußrohr mit Docht. Sie ist mit Rohöl von hoher Entflammungstemperatur gefüllt. Beim Kippen entzündet sich das herausfließende Öl an dem brennenden Docht. Es ist daher unnötig, die Flamme längere Zeit auf die Anzündmasse einwirken zu lassen, da diese Arbeit von dem brennenden Öl besorgt wird. Mit Hilfe der Anzündkanne kann ein Mann bis zu 200 Feuerstellen in einer halben Stunde anzünden! Als Ersatzverfahren, das allerdings besonderer Vorsicht bedarf, läßt sich das Anzünden mit Petroleum oder Leichtöl verwenden. Ein Mann geht voraus und gibt aus einer Kanne etwas Petroleum auf die Anzündmasse; ihm folgt ein Mann mit brennender Fackel, der diese dann nur einen Augenblick an die Feuerstelle hält, worauf dieselbe sofort anbrennt.

Da die Kohlen nicht so rasch in Glut kommen und genügend Wärme abgeben, darf man mit dem Anzünden nicht bis zum letzten Augenblick warten, oder aber man muß diese Zeitspanne durch größere Mengen geeigneten Anzündmaterials (Rohnaphtalin, Anthrazenrückstände usw.) überbrücken.

Beim Verbrennen der Kohle in Öfen bedürfen die Feuer einer gewissen Wartung. Um sie nicht zu groß werden zu lassen, darf man jeweils nur eine verhältnismäßig kleine Kohlenmenge zugeben. Andererseits darf

man auch das Feuer nicht zu stark herunter brennen lassen, da sich sonst das Zulegen von unter Umständen noch feuchtem Material sehr ungünstig auswirkt und es dann lange dauern kann, bis der Ofen wieder genügend Wärme abgibt. Deshalb ist etwa alle halbe Stunde ein Nachlegen von Brennmaterial erforderlich. Bei einigen ausländischen Ofenmodellen muß auch die Asche von Zeit zu Zeit entfernt werden, da sonst das Feuer leicht ausgeht.

Ungleichheit in der Größe der Kohlenstücke wirkt sich nachteilig aus, da dann die Verbrennungsgeschwindigkeit sehr verschieden ist. Einige Heizer brennen schnell ab, andere sehr langsam. Das war der Hauptgrund, weshalb man in den Vereinigten Staaten von der Anwendung der Kohleheizung völlig abgegangen war; erst mit der Marktbelieferung mit gleichmäßig geformten Briketts ist das Interesse für festes Brennmaterial wieder gestiegen. Dagegen hat man in Deutschland infolge des geringen Ölvorkommens bis heute fast ausschließlich Braunkohlebriketts verwendet. Seit 1936 sind jedoch auch wieder Versuche zur Verwendung von Steinkohle aufgenommen worden; als besonders geeignet erwiesen sich die Saarflammkohle und vor allem die Eiforbriketts aus Steinkohle.

Ein Nachteil der Kohleheizung ist, daß man die Feuerstellen ausbrennen lassen muß, auch wenn die Frostgefahr bereits vorüber ist. Dies bedeutet dann einen Brennstoffverlust, wenn die Frostperiode wesentlich kürzer war als angenommen, was häufig vorkommt. Diesen Verlust an Brennstoff kann man, wenigstens bei Steinkohle, teilweise dadurch vermeiden, daß man die Öfen umkippt, den brennenden Inhalt verteilt und dadurch erreicht, daß infolge des Fehlens der durch den Ofen gesteigerten Luftzufuhr die Verbrennung der Kohle aufhört. Die unverbrannten oder halbverbrannten Stücke sind dann immer noch verwendbar.

Bei der deutschen Kohleheizung ist dieser Nachteil der unvollständigen Ausnutzung durch das Nachlegen jeweils nur kleiner Mengen von Brennmaterialien in bestimmten Zeitabständen fast völlig behoben.

#### a) Die Verbrennung von Kohle in Öfen.

Bei den ersten Versuchen in Nordamerika wurden zur Verbrennung stückförmiger Kohle Kohlenkörbe aus Drahtgeflecht oder Gußeisen benutzt. Sie faßten etwa 25 Pfund. Ein Deckel schützte die Kohle vor Nässe. Solche Kohlenkörbe sind heute nicht mehr in Gebrauch.

In Österreich verwendete man um 1914 trichterförmige Blechgefäße von etwa 40 cm Höhe, die zum Zwecke der Luftzufuhr durchlöchert waren. Auch in Deutschland benutzte man solche Blechtrichter zu dieser Zeit bei Heizversuchen in Obstanlagen an der Bergstraße.

Über einen Koksheizer, der im südlichen Teil des Staates Indiana Verwendung fand, hat 1928 C. Baker<sup>34)</sup> berichtet: ein aufrechter Blechzylinder von 90 cm Höhe und 38 cm Durchmesser, der auf 10 cm hohen Füßen stand, besaß unten Rost und Ölpanne für  $\frac{1}{8}$  Liter Anzündöl; die obere Öffnung konnte durch einen Deckel geschlossen werden. Das Fassungsvermögen betrug rund 15 kg Koks und reichte für eine Brenndauer von 3 Stunden; ein Nachfüllen war jedoch möglich. Seine beste Leistung erreichte der Ofen bei größter Füllhöhe.

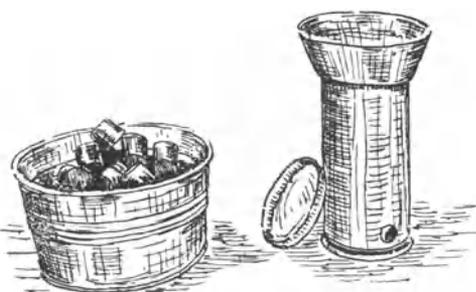


Abb. 91. Amerikanischer Briketofen in Zylinderform mit trichterförmigem Füllaufsatz, Zugloch und Deckel.

Für die Heizung mit Briketts hat sich in Amerika ein Ofentyp von zylindrischer Form herausgebildet, der bei 70—80 cm Höhe einen Durchmesser von 20—30 cm hat. Ursprünglich war der Ofen am unteren Mantelrand mit einem Zugloch versehen, das durch einen Schieber teilweise oder ganz geschlossen werden konnte. Zum Füllen wurde ein trichterförmiger Aufsatz verwendet (Abb. 91), danach wurden die Öfen mit einem übergreifenden Deckel zugedeckt. Auch für die jüngsten Ofentypen wurde in Amerika die zylindrische Form beibehalten. Zur besseren Versteifung erhielt der Mantel einige Querringe (Abb. 194a, Tafel 7). Das obere Ende des Ofens trägt vielfach einen niedrigen, schornsteinartigen Aufsatz. Die oben geschlossenen Öfen besitzen unmittelbar unter dem Deckel einen Löcherkranz im Ofenmantel; zuweilen werden auch noch Löcherreihen in die mittleren Teile des Mantels gestanzt (Abb. 194b, c, Tafel 7). Die

Zuglöcher können häufig durch Schieber reguliert werden. Zahlreiche amerikanische Ofenmodelle eignen sich für das Verbrennen von Stein- und Holzkohlebriketts.

In Deutschland hat die Entwicklung des Briketofens, die hauptsächlich durch den Reichsausschuß für Frostabwehr im deutschen Weinbau gefördert wurde, zu einer von dem amerikanischen Typ abweichenden Form geführt.\*)

Zunächst war auch bei dem deutschen Briketofen nur ein Zugloch über dem Boden vorgesehen, das gleichzeitig zur Aufnahme des Anzünddochtes diente (Abb. 194d, Tafel 7). Auf der Gegenseite war am oberen Ofen-

\*) Insgesamt lagen in Deutschland 56 Ofenmodelle zur Prüfung vor. Die auf hohen Beinen stehenden Öfen (Abb. 194 k, l, m, Taf. 7) dienen zum Schutz von Kulturen, die dem Boden aufliegen, wie Erdbeeren u. a.

rand eine Öffnung zum Abzug der Verbrennungsgase angebracht. In der weiteren Entwicklung wurde nun die Zahl der unteren Zuglöcher vermehrt und über den halben Umfang des Ofenmantels verteilt (Abb. 194 e, Tafel 7). Gleiches gilt für die oberen Abzuglöcher auf der Gegenseite (dem Berg zugewandt), die zum Teil als kreisrunde Öffnungen, zum Teil in Form von Zinnen ausgebildet waren. Bei einigen Modellen war eine Regulierung der Verbrennung durch Drosselung der Luftzufuhr unten und der Abgasführung am oberen Teil des Ofens möglich.

Da in größeren Weingütern oder bei gemeinschaftlicher Beheizung vieler kleiner Bezirke Tausende von Öfen in die Weinberge gebracht werden müssen, ist eine Vorbereitung von länger Dauer nötig. Die Öfen können nicht solange auf Lager bleiben, bis die Frostgefahr unmittelbar bevorsteht. Vielmehr sind die Öfen und das Brennmaterial schon zu Beginn der Vegetationszeit an ihren Bestimmungsort zu bringen und solange dort zu belassen, bis die Frostgefahr endgültig vorüber ist. Daher sollten die Öfen so eingerichtet sein, daß sie gleich zum Transport des Brennmaterials verwendet werden können, und daß die Briketts in ihnen bis zum Eintritt von Frost vor Feuchtigkeit geschützt sind.

Aus diesem Grund hat sich in Deutschland fast durchweg der konische Eimer mit Henkel durchgesetzt. Bei dieser Formgebung lassen sich nämlich die Öfen bequem ineinander stecken und dadurch in verhältnismäßig kleinen Räumen aufbewahren. Mit Hilfe des Henkels können sie, zweckmäßig zu zweien, mit einem Joch an Ort und Stelle gebracht werden.

Im folgenden seien die wichtigsten Formen der deutschen Brikettöfen kurz besprochen. Die ältesten derartigen Öfen sind die von der Firma Thielmann, Diez, hergestellten Blecheimer von 60 cm Höhe und einem Fassungsvermögen von 24 Briketts. Sie gestatten eine Regulierung der Abgasführung vermittels des aufliegenden Deckels.

Die Öfen der Burger-Eisenwerke (Abb. 194 f, Tafel 7) bestanden im wesentlichen aus einem konischen Blechgefäß von etwa der gleichen Größe. Am oberen Rand war ein halber Kranz von 12 Löchern angebracht. Diese lagen auf der dem unteren Ausschnitt entgegengesetzten Seite. Der rechteckige Deckel war nach einem Vorschlag des Rheinischen Braunkohlensyndikats auf der einen Seite nach oben, auf der anderen nach unten gebogen, damit die Abgase und die Heißluft möglichst nahe am Boden gehalten werden sollten; das erwies sich jedoch als nicht möglich.

Bei den Öfen der Domäne Avelsbach (Abb. 194 i, Tafel 7) sind die unmittelbar über dem Boden angebrachten Löcher wie auch die oberen Abzuglöcher gleichmäßig über den ganzen Umfang verteilt. Wesentlich für diesen Ofentyp ist ein weiterer Löcherkranz in halber Höhe.

Die Öfen der Firma Monos-Trier haben bei einer Höhe von 57 cm einen oberen Durchmesser von 32 und einen unteren von 21 cm. Die unteren sechs Zuglöcher sind auf den ganzen Umfang verteilt und nicht regulierbar. Sie haben einen Durchmesser von 5 cm, so daß auch Bruchstücke der normalen Briketts noch nicht herausfallen können. Eines dieser Zuglöcher wird als Anzündloch verwendet. Die oberen sechs Abzuglöcher sind zwischen Deckel und einem zur Versteifung dienenden Wulstring angebracht. In der besseren Ausführungsform ist der Ofen leicht verzinkt (Abb. 194 g, Tafel 7). Zur Erhöhung des Faktors Strahlung im Gesamtwärmeumsatz des Ofens hat das Modell Monos einen im Inneren eingebauten kleinen Kegel, der die brennenden Briketts gegen die Wand drückt und dadurch höhere Manteltemperaturen des brennenden Ofens hervorruft.

Die von der Mauser-Maschinenbau G. m. b. H., Köln, hergestellten Öfen unterscheiden sich von den gewöhnlichen Heizern ohne Kegeleinsatz im wesentlichen nur dadurch, daß der obere Löcherkranz durch einen Ring geschlossen werden kann; dadurch soll eine Regulierung der Heizleistung möglich sein.

Alle diese Ofentypen fassen etwa 24—25 Stück Braunkohlebriketts. Dieser Vorrat reicht für 8 Stunden Brenndauer, unter der Voraussetzung, daß bei größeren Flächen je 50 m<sup>2</sup> ein Ofen mit einer Leistung von 10 000 Kalorien je Stunde zu stehen kommt. Dies ist der Normfall, der sich aus vielen Heizversuchen mit Braunkohlebriketts unter den mannigfaltigsten äußeren Umständen entwickelt hat.

Die Öfen werden in der Weise vorbereitet, daß zunächst durch eines der unteren Zuglöcher ein wenig Holz- wolle gesteckt, darauf eine Kohlschaufel Anzündmasse aus Rohnaphtalin (rund 1/2 kg) gegeben und schließlich der übrige Raum mit Briketts gefüllt wird. Mit einem Wagen werden die Öfen dann an den Rand des Weinbergs gefahren und von dort hineingetragen. Bei aufgelegtem Deckel können sie mit ihrem Inhalt auch bei Regen wochenlang im Weinberg stehen, ohne daß sich später beim Anzünden Schwierigkeiten ergeben.

Wenn eine Frostwarnung erfolgt ist, werden noch vor dem Anzünden, da bis dahin häufig noch Stunden vergehen, alle Briketts bis auf sechs oder acht herausgenommen und neben den Ofen gelegt. Die im Ofen belassenen Briketts sollen in Verbindung mit dem brennenden Rohnaphtalin die erste Stunde ausreichen. Je nach der Stärke des Frostes werden dann jede ganze oder halbe Stunde zwei Briketts nachgelegt.

Die Blechöfen selbst erfordern eine gewisse Pflege, damit sie nicht schon nach kurzer Zeit durchgerostet

sind. Am besten reibt man sie vor der Aufstellung im Weinberg mit Öl ein oder taucht sie in einen großen Behälter mit Abfallöl und läßt sie dann abtropfen.

Neuerdings (1937) wurden auch verschiedene Steingutöfen für Freilandheizung hergestellt. Die ersten Modelle (Abb. 194 p, Tafel 7) haben sich nicht bewährt, da sie beim starken Anheizen platzten. Das neue Modell besteht aus zwei Röhrenhälften aus Schamotte, die in ihrem unteren Teil Löcher besitzen und durch einen darüber gestülpten Deckel mit einem großen zentralen Loch zusammengehalten werden.

### β) Offen ausgelegte Briketts.

Man kann auch eine wirksame Frostschadenverhütung durch Freilandheizung mit offen ausgelegten Briketts erzielen. In diesem Fall werden die Briketts in zahlreichen Einzelbrennstellen über das zu schützende Gelände verteilt. In Deutschland werden in der Regel zwei der langgestreckten Briketts mit einem Abstand von zwei Fingerbreiten nebeneinander gelegt, während entweder ein drittes über dem schmalen Zwischenraum längsseitig liegt oder zwei weitere Briketts quer darüber angeordnet werden. Der Zwischenraum wird vor Auflage der oberen Briketts mit der üblichen Anzündmasse ausgefüllt.

Das Rohnaphtalin brennt sofort unter guter Wärmeentwicklung ab, wobei der entstehende Rauch noch zusätzlich als schwacher Strahlungsschutz wirkt; die Briketts selbst kommen nur langsam in Brand und glühen dann 12 bis 16 Stunden und länger (Abb. 195, Tafel 7).

Bei dem Verfahren der Heizung mit offen ausgelegten Briketts werden die Kosten für die Öfen gespart. In kleinen Betrieben hat sich das Verfahren als Behelfsmaßnahme bei fehlenden Öfen und bei niederen Kulturen wiederholt bewährt. Andererseits entstehen aber hohe Kosten durch das mühsame Auslegen der zahlreichen Brennstellen. Während nämlich normalerweise ein Ofen für 50 m<sup>2</sup> ausreicht, ist auf je 2 m<sup>2</sup> ein Brikethäufchen vorzusehen. Als weiterer Nachteil kommt hinzu, daß man die Wärmeabgabe nicht regulieren kann. Wohl läßt sich zunächst jedes dritte oder jedes zweite Häufchen in Brand setzen; sind die Brennstellen aber einmal in Betrieb, so können sie nicht wieder gelöscht werden. Zudem zerfallen die Briketts, wenn sie wochenlang im Freien liegen müssen.

Die Kostenaufwendungen für die beiden Verfahren betragen:

Voraussetzung: Fläche  $\frac{1}{4}$  ha = 2500 m<sup>2</sup>. Heizdauer drei Nächte je 3 Stunden.

#### 1. Offen ausgelegte Briketts

1. Nacht			
a) 1250 × 3 Briketts = 3750 Briketts . . . . .	37.50	RM	
b) Arbeitslohn . . . . .	20.—	„	
c) Anzündmaterial . . . . .	10.—	„	67.50 RM
2. Nacht . . . . .			67.50 „
3. Nacht . . . . .			67.50 „
			<u>202.50 RM</u>

Gegebenenfalls ist nach der dritten Nacht zur Vorsicht die Fläche noch einmal neu zu belegen. Da offen ausgelegte Briketts durch Verwitterung zerfallen, ist mit einer Wiederverwendung der nicht verbrauchten Briketts nicht zu rechnen. Daher erhöhen sich die Unkosten (Arbeitslöhne für Anzünden abgezogen) um 60.— RM auf rund 262.— RM.

#### 2. Heizung mit Öfen

1. Nacht			
Amortisation der Öfen (50 Öfen je 1.80 RM = 90.— RM) in 10 Jahren . . . . .	9.—	RM	
Arbeitslohn, Füllen und Anzünden . . . . .	3.—	„	
Anzündmaterial . . . . .	2.—	„	
Briketts, erste Stunde 6, jede weitere Stunde 4 = 14 Briketts je Ofen × 50 Öfen = 700 Stück . . . . .	7.—	„	21.— RM
2. Nacht			
Arbeitslöhne für Füllen und Anzünden . . . . .	3.—	RM	
Anzündmaterial . . . . .	2.—	„	
Briketts . . . . .	7.—	„	12.— RM
3. Nacht = 2. Nacht . . . . .			12.— „
			<u>45.— RM</u>

Gesamtkosten für drei Nächte zu je drei Stunden 45.— RM. Das Füllen für die 4. Nacht kostet 10.— RM. Alle Unkosten also 55.— RM. Die nicht verbrauchten Briketts sind im Haushalt und Gewerbe verwendbar, da sie nicht zerfallen sind.

Die Zahlen sind nur Anhaltspunkte für die Berechnung. Bei kleinen Flächen wird die Ofenheizung deswegen teurer, weil die Öfen dichter gestellt werden müssen.

*b) Holz, Holzkohle und sonstige feste Brennstoffe.*

Die anfängliche Verwendung von Holz für Beheizung großer Flächen ist infolge der vielen Nachteile gegenüber dem Heizen mit Öl oder Kohlebriketts aufgegeben worden.

Das in den Plantagen aufgestapelte Holz nimmt, vor allem als Reisig, viel Platz weg und hindert bei der Feldarbeit. Bevorzugt war in Amerika das sogenannte Klaftherholz, wobei die Scheite fast 1 m lang waren. Drei bis vier von diesen Scheiten bildeten einen Scheiterhaufen, im allgemeinen rechnete man ein bis zwei solcher Haufen auf 100 m<sup>2</sup>. Damit sich das Holz rasch entzündete, gab man Papiersäcke, die in Öl getränkte Hobelspäne enthielten, als Zündmasse hinzu, oder man begoß die einzelnen Holzscheite mit Öl. Jedenfalls aber verlangte schon das Zurechtschneiden des Klaftherholzes, die Aufstapelung und das Trockenhalten im Freien und viel mehr noch die Bedienung während der Frostnächte so viel Arbeitskräfte, daß man später nur noch in kleinen gärtnerischen Betrieben zu diesem Brennmaterial griff.

Sämtliche Weinbau- und Obstbauzeitschriften berichten von gelegentlich angewendeten Verfahren mit Reisig- und Schnittholzverbrennung, wobei allerdings mehr auf Rauchentwicklung Wert gelegt ist.

Holzkohlebriketts, zum Teil als Fagonitbriketts bekannt geworden, haben vielfach im Gartenbau, stellenweise auch im Weinbau bei der Frostschadenverhütung Anwendung gefunden. Sie werden teils unpräpariert ausgelegt und nach Übergießen mit Öl entzündet, teils werden sie mit Brandsätzen versehen. Bei den Fagonitholz-kohlebriketts werden die Briketts in besonderen Tragkästen transportiert und tauchen dabei in Leichtöl oder Spiritus ein, mit dem sie sich vollsaugen. Sie werden erst im Augenblick der eingetretenen Frostgefahr an Ort und Stelle gebracht und mit Lötlampen oder Fackeln entzündet. Das Institut für Klimaforschung in Trier hat mit diesen Holzkohlebriketts mehrfach Versuche angestellt (Seite 185). Da letzten Endes der Preis der Heizwerteinheit entscheidend ist, schneidet das Holzkohlebrikett gegenüber dem Braunkohlebrikett ungünstig ab, da gleiche Heizwert-einheiten im Preisverhältnis 1:9 stehen und das Braunkohlebrikett dadurch um ein Vielfaches wirtschaftlicher ist. Dazu kommt, daß letzteres zu allen Zeiten und an jedem Ort Deutschlands in beliebigen Mengen bezogen werden kann und daß ferner die Anwendung bei weitem nicht so kompliziert ist.

Neuerdings werden auch Öfen zum Verbrennen von Holzkohle hergestellt. Der von Wouters-Bonn auf den Markt gebrachte Ofen besteht im wesentlichen aus einem kegelförmigen Blechgefäß, dessen Mantel mit kleinen Löchern versehen ist, und das 2½ kg Holzkohle aufnehmen kann. Der Ofen ist dem von Löschnig 1914 verwendeten nachgebildet. An der Seite des Gefäßes befinden sich zwei Löcher, in welche die Niete eines zur Aufstellung im Gelände dienenden Eisenstabes passen. Nach dem Anbrennen der Holzkohle mit etwas Spiritus wird dem Ofen ein Deckel aufgesetzt (Abb. 194o, Tafel 7).

Das chemische Werk „Voma“ in Alfeld-Leine hat auf Grund seiner Erfahrungen bei der Verdampfung von Schädlingsbekämpfungsmitteln ein Verfahren herausgebracht, das darin besteht, Sägespäne langsam verglimmen zu lassen. Zur Anwendung dieses Verfahrens zieht man um das zu schützende Feld einen Graben von etwa 30 cm Tiefe und 20 cm Breite, füllt diesen mit Sägespänen und verteilt hierauf mittels eines großen Siebes den Vomalyt-Glühzünder etwa 2 mm hoch. Dieser ist stets mit Brennspiritus anzufeuchten. Der Graben muß wegen der starken Wärmeentwicklung wenigstens ½ m von den Kulturen entfernt sein. Wenn man dafür sorgt, daß das Gemisch ohne Flamme brennt, soll die Brenndauer 6—8 Stunden betragen. Statt Gräben können auch Löcher von 40 × 40 cm Größe in Abständen von 2 m ausgeworfen werden. Bei überraschend auftretenden Frösten können auch größere Blechgefäße oder Eimer gebraucht werden. Es handelt sich hierbei um ein Verfahren, das selbstverständlich nur im Kleingartenbau Verwendung finden könnte.

Gelegentlich wurden auch Anthrazenrückstände und Rohnaphtalin zur Geländeheizung verwendet. Meist werden diese Stoffe in flachen Pfannen oder in einfachen Öfen verbrannt; notfalls läßt sich sogar eine Verbrennung von Rohnaphtalinhäufchen auf dem Boden durchführen. Kessler empfahl die Verwendung dieser Stoffe in Enkirch, Saarstein usw., als bei den Betrieben, die mit Ölöfen ausgerüstet waren, die Beschaffung von Rohöl Schwierigkeit machte. Es stellte sich dabei heraus, daß diese Stoffe zwar etwas sehr schnell abbrennen, ihre Verwendung aber in solchen Öfen, deren Abgasführung durch einen Deckel gebremst wird (Thielmannöfen), keine Schwierigkeit macht. Die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens ist gut, da in den letzten Jahren 100 kg zum Preise von 4.50 RM. bei einem Heizwert von annähernd 10000 Kalorien je Kilogramm angeboten waren. (Braunkohlebriketts 1.70 RM. je 100 Kilogramm bei einem Heizwert von 4500 Kalorien je Kilogramm.)

### 3. Die flüssigen Brennstoffe.

Wie aus der geschichtlichen Darstellung hervorgeht, ist Öl in Amerika und Australien das beliebteste Heizmaterial, da es dort billig und leicht zu erhalten ist. Dazu kommt, daß es bei richtigem spezifischem Gewicht und hinreichender Reinheit den geringsten Aufwand an Arbeitskraft erfordert. Dem gegenüber stehen allerdings

auch erschwerende Umstände, wie die Anschaffung großer Tanks und Tankwagen für die Lagerung und Verteilung des Öles.

Bei der Ölheizung ist vor allem die Möglichkeit des raschen Entzündens und des sofortigen Auslöschens gegeben. Da ferner die Ölöfen unmittelbar nach dem Anstecken intensiv Wärme abgeben und damit eine schnelle Temperaturerhöhung hervorrufen, kann bei Ölheizung mit dem Anzünden bis zum letzten Augenblick gewartet werden. Dies alles bedingt einen sparsamen Verbrauch an Heizmaterial.

In den U.S.A. empfiehlt man möglichst reines Öl von etwa 28° Beaumé (= 1,25 spez. Gewicht); vor allem ist darauf zu achten, daß es Wasser und Asphalt höchstens in ganz geringen Mengen enthält. Bei einem größeren Gehalt an Wasser kommt es häufig zum Überkochen, unter Umständen sogar zu Explosionen.

Die schweren Öle hinterlassen beim Verbrennen in destillierenden Öfen dicke Rückstände, die die Wirksamkeit der Öfen beeinträchtigen und zur häufigen Entfernung des Rückstandes nötigen. Das nach dem Auslöschens in den Öfen verbleibende Öl ist dann schwer entzündbar und erst nach starkem Zusatz von Leichtöl wieder richtig verwendbar. Das gilt besonders für die Eimertypen, in zweiter Linie auch für die destillierenden Heizer mit Schornstein.

Außerdem erzeugen die schweren Öle viel Rauch. Dieser ist erwünscht bei Frühjahrsfrösten, da er einen zusätzlichen Strahlungsschutz darstellt, aber unerwünscht bei Herbstfrösten oder Winterfrösten in subtropischen Gegenden wegen der Verschmutzung der Früchte kurz vor der Ernte.

Als die Geländeheizung in Nordamerika noch in ihrem Anfangsstadium war, kam es wiederholt vor, daß zwar mehrere Nächte mit Erfolg geheizt wurde, in letzter Minute aber dennoch die ganze Ernte der Kälte zum Opfer fiel, weil der Vorrat an Brennmaterial erschöpft war. Man hat daher frühzeitig Einkauf und Lagerung des Brennstoffes gemeinschaftlich organisiert. Um das nötige Heizöl in der erforderlichen Menge und Qualität stets zur Hand zu haben, bauten sich die Obstzüchter Kaliforniens als erste größere Tanks (Abb. 199, Tafel 7). In verschiedenen Distrikten dieses Staates wurden sogar die Kosten des Tankbaues auf alle Pflanzler gleichmäßig verteilt, ohne Rücksicht darauf, ob sie nun ihre Plantagen heizten oder nicht. Außer diesen großen gemeinschaftlichen Tanks, die möglichst in die Nähe eines Verkehrsstranges gelegt wurden, bauten sich die einzelnen Obstzüchter selbst noch kleinere Tanks in unmittelbarer Nähe ihrer Pflanzung. Das hat den Vorteil, daß die Öfen rasch wieder gefüllt werden können.

Die Herstellung von Tanks aus Beton hat sich anscheinend nicht bewährt, da sie nicht genügend dicht gebaut werden können. In letzter Zeit benutzt man meist galvanisiertes Wellblech. Die Tanks werden in der Regel über einer erhöhten Stelle errichtet, damit das Abfüllen schneller erfolgen kann. Es hat sich nämlich gezeigt, daß das Abfüllen des Öles durch Pumpen aus dem Tank viel zu langsam vor sich geht.

Aus diesen festen Tanks werden nunmehr kleinere Tankwagen gefüllt, mit denen die Heizer im Gelände versorgt werden (Abb. 200, Tafel 7). Die gebräuchlichsten Tankwagen fassen etwa 2000 Liter Öl. Ihre Größe hängt natürlich sehr von der Bodenbeschaffenheit der jeweiligen Plantage ab. Kleine Tankwagen werden durch einen Mann geschoben, während die größeren durch Pferde oder Traktoren fortbewegt werden. Am Ölbehälter der Wagen sind zwei Schläuche mit Hähnen angebracht, mittels deren die Heizer rechts und links der Fahrbahn unmittelbar gefüllt werden können. Da bei dieser Schlauchfüllung jede Doppelreihe von Öfen abgefahren werden muß, was sich bei feuchtem oder aufgeweichtem Boden recht schwierig gestaltet, benutzen die Farmer in solchen Fällen Fülleimer. Nach amerikanischen Angaben sollen bei guter Organisation 4 Mann an einem Tag etwa 18000 Liter Öl verteilen können.

Zum Entzünden der Ölheizter gießt man etwas Leichtöl auf das Heizöl und zündet mittels einer Fackel oder Anzündlampe an. Dabei wird meist so verfahren, daß ein Mann die Heizöfen mit der Lampe in Brand setzt und ein zweiter etwas später folgt; dieser prüft, ob alle Öfen richtig brennen, und regelt die Luftzufuhr. Dann kann man die Ölöfen im Gegensatz zu den Brikettheizern mit geringer Aufsicht brennen lassen. Es gehen aber auch hier gelegentlich Heizer aus, so daß man ganz ohne Aufsicht nicht auskommt. Da man außerdem bei schnell eintretender Wetterbesserung oder beim Temperaturanstieg nach Sonnenaufgang die Heizer löschen muß, ist die Anwendung der Ölheizung mit einer wesentlichen Ersparnis an Arbeitskräften nicht verbunden.

Aus zahlreichen amerikanischen Angaben darf man schließen, daß ein Mann in der Stunde mindestens 150 Öfen ansteckt, wenn diese über eine Fläche von ungefähr 1 ha verteilt sind. Größere Abstände der Öfen untereinander setzen die Leistung natürlich etwas herab. Bei unseren Versuchen konnte in hinreichend ebenem Gelände ein Mann leicht die doppelte Anzahl bewältigen (bei 200 Öfen je Hektar).

Nach Beendigung der Heizsaison werden die Öfen eingesammelt und entleert. Bei der in Amerika meist üblichen Brennölversorgung können die Mitglieder das nichtverbrauchte Öl zurückgeben; selbst leicht verschmutztes Öl wird angenommen, wenn auch nicht zu vollem Preis. Die Ölöfen werden nach ihrer Entleerung von den Rückständen, die sich an den Wänden abgesetzt haben, befreit. In trockenen Gebieten lagert man dann die Heizer unter Bäumen, während in regenreichen Gegenden die Aufbewahrung unter Dach notwendig ist. Bei ordnungsgemäßem

Aufbewahren werden für die Haltbarkeit der Öfen 10 Jahre angesetzt. Verschiedentlich sollen sie aber sogar 14 und 16 Jahre benutzt worden sein.

Der Hauptwert wird heute bei allen Öfen darauf gelegt, daß ihre Behälter groß genug sind, um die ganze Frostdauer hindurch ohne Nachfüllen brennen zu können, da das Nachfüllen von Öl in der Nacht mit großen Unannehmlichkeiten verbunden ist. Während das Fassungsvermögen anfangs nur  $4\frac{1}{2}$  Liter betrug, baut man daher heute Behälter bis zu 45 Liter. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Heizdauer bei Winterfrösten in den subtropischen Gebieten Nordamerikas eine andere ist als bei den Spät- und Frühfrösten in Deutschland, wo sie nur zwei bis höchstens sechs Stunden beträgt; dort muß unter Umständen mehrere Tage hintereinander, also nicht nur während einiger Nachtstunden, geheizt werden.

Die vielen Ofentypen, die bisher auf dem amerikanischen Markt erschienen sind, lassen sich in zwei Gruppen einteilen, nämlich in destillierende Heizer und nichtdestillierende Heizer.

#### a) Die destillierenden Heizer.

##### α) Offene Öfen.

Der Hauptvertreter dieses Ofentyps ist der sogenannte „Schmalzeimer-Heizer“ (lard pail heater, Abb. 196a Tafel 7). Dieser ist ein einfacher Eimer; häufig werden sogar Abfalleimer benutzt.\*) Bevorzugt sind die Größen mit 5, 10 und 15 Liter Fassungsvermögen. Der Einfachheit und Billigkeit dieses Ofentyps stehen allerdings einige schwerwiegende Nachteile gegenüber. Die offenen Heizer geben die größten Wärmemengen ab, kurz nachdem sie angezündet worden sind. In der Folgezeit wird die Wärmeabgabe dauernd geringer. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß aus dem Ölgemisch zunächst die leicht destillierbaren Bestandteile entweichen und verbrennen, während die schwer oder nicht destillierbaren zurückbleiben. Dazu kann noch eine Zersetzung des Öles und Abscheidung von asphaltischen Bestandteilen während des Brennens kommen. Dabei ist aber die Temperatur der Luft gerade zu Beginn der Heizung noch nicht sehr tief, denn die niedrigste Temperatur wird ja im allgemeinen erst später eintreten.

Um diesem Nachteil der offenen Öfen zu begegnen, hat man eine dichtere Aufstellung empfohlen; bei Eintritt der gefahrbringenden Temperatur wird dann zuerst nur ein Teil der Öfen entzündet, und erst später werden auch die restlichen in Brand gesetzt. Die kleinen offenen Öfen sind so erheblich billiger als die großen Heizertypen, daß sich die Kosten bei der Anschaffung von vielen kleinen Eimerheizern gegenüber denen bei Ankauf von wenigen großen Heizern aus der Gruppe der destillierenden oder nichtdestillierenden doch noch niedriger stellen. Außerdem ist aber eine große Anzahl von kleinen Feuern in der Wirkung günstiger als eine kleine Anzahl stärkerer Feuerstellen.

Ein weiterer Nachteil der Schmalzeimer-Öfen besteht darin, daß sie im allgemeinen nicht die ganze Nacht hindurch ohne Nachfüllung brennen. Man hat aber neuerdings besondere Feuerungseinsätze gebaut, die die normale Brenndauer von etwa  $3\frac{1}{2}$  Stunden auf fast 9 Stunden verlängern, natürlich bei gleichzeitiger Verminderung der Heizleistung. Dieser Feuerungseinsatz, in Amerika „Spinne“ genannt, besteht aus einer Blechscheibe von etwas kleinerem Durchmesser als der Eimer und wird mittels Klammern am Rande des offenen Ofens angebracht (Abb. 196a, Tafel 7). Allerdings kann bei Verwendung von schweren Ölen, die mehr als etwa 3% Asphalt enthalten, diese Spinne nicht benutzt werden, da beim Verbrennen solcher Öle so viel Ruß entsteht, daß durch den Ansatz desselben an der Spinne das Feuer erstickt wird. Bei guten Ölen haben sich aber die Spinnen bewährt. Man benutzt daher häufig die größeren Eimermodelle mit Spinne; wenn es dann gegen Morgen nötig wird, eine größere Heizwirkung zu erzielen, entfernt man rasch die Spinnen und erhält dann eine bedeutend größere Leistung.

Der größte Nachteil, den die Schmalzeimer-Öfen besitzen, ist aber die außerordentlich starke Rußentwicklung. Wenn man daher auch mit diesem einfachen Ofentyp recht gute Ergebnisse in Bezug auf die Temperaturerhöhung erzielt hat, so mußte man sich dennoch von seiner Anwendung beim Beheizen von Citrusplantagen wieder abwenden. Die Frostnächte fallen nämlich gerade in die Zeit, zu der die Früchte bereits vor der Ernte stehen. Der starke Rußansatz an den Früchten vermindert aber ihre Marktfähigkeit oder erfordert zusätzliche Unkosten für die Reinigung. Denn bei der langen Dauer der durch die Winterfröste der Subtropen bedingten Heizperiode ist die Verschmutzungsgefahr hier besonders groß. Dagegen verwendet man die offenen Öfen in größerem Umfang in Gärten mit Obstbäumen, die in Frühjahrsnächten geheizt werden müssen und deren Blüten der Ruß keinen Schaden zufügt.

\*) Nach Adamson kamen im Winter 1909/10 auch schwere Papierdüten als Behälter für das Öl in Anwendung; sie erwiesen sich jedoch als nicht völlig dicht.

Von diesen Eimeröfen rechnet man bis zu 3 Stück auf 100 m<sup>2</sup>. Häufig stellt man abwechselnd einen kleinen und einen großen Ofen auf, so daß man die Wärmeabgabe innerhalb weiter Grenzen regulieren kann. Das Öl, das nach Gebrauch in offenen Öfen zurückbleibt, ist infolge der eingetretenen Zersetzung nicht mehr so leicht zu entzünden wie frisches. Man hilft sich dann dadurch, daß man die Öfen jedesmal mit frischem Öl wieder auffüllt.

β) Öfen mit Schornsteinen.

Die destillierenden Heizer mit Schornsteinen sind in Citrusplantagen vorherrschend, da sie einerseits verhältnismäßig wenig Ruß erzeugen (im Gegensatz zu den Eimeröfen), andererseits aber auch kein besonders reines Öl zur Füllung benötigen (wie die nicht-destillierenden Heizer). Nur allzu hoher Asphaltgehalt mindert die Brennfähigkeit. Das Fassungsvermögen des Ölbehälters beträgt bis zu 30 und 45 Liter. Die destillierenden Öfen mit Schornstein sind bei den amerikanischen Pflanzern sehr beliebt, da sie recht zuverlässig arbeiten, leicht zu bedienen und billiger als die nicht-destillierenden Öfen sind.

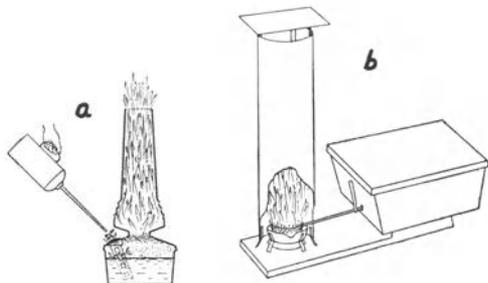


Abb. 92. a) Schnitt durch einen destillierenden Ölheizter während des Brennens. — b) Schematische Darstellung eines nicht-destillierenden Ölheizters.

Bei diesem Heizertyp wird Luft auf die Oberfläche des im Behälter befindlichen Öls geleitet. Infolge der Verbrennung der Ölgase werden weitere Teile des Öles in Gase verwandelt. Diese heißen Gase verbrennen dann im Schornstein (Abb. 92 a), der in seinem unteren Teil kleine Öffnungen für den Zutritt der Luft aufweist. Bei der Erhitzung des Öles verflüchtigen sich natürlich die leichter siedenden Teile zuerst. Daher weist dieses nach einigen Stunden eine andere Beschaffenheit auf als zuvor.

Häufig zeigt sich eine unangenehme Störung durch Ansammlung von schweren, asphaltähnlichen Rückständen im Ölbehälter, die mehr oder weniger unverbrennbar sind. Es scheint, daß diese Rückstände nicht allein in dem ursprünglichen Öl enthalten sind, sondern wahrscheinlich auch bei der Erhitzung des Öles erzeugt werden. Durch den Vorgang des sogenannten „Krackens“ kann nämlich eine Kohlenwasserstoffverbindung in andere umgewandelt werden, von denen ein Teil leicht flüchtig ist und daher sofort verbrennt, während der schwere Bestandteil zurückbleibt.

Die Typen der destillierenden Heizer werden mit verschieden hohen Schornsteinen gebaut (Abb. 196 b, c, d, Tafel 7). Bei niedrigem Schornstein ist die Rauchentwicklung sehr groß und wird in gleicher Weise wie bei dem Schmalzeimer-Ofen beanstandet. Es ist sogar vorgekommen, daß das Feuer durch den Ruß im Schornstein erstickt wurde, so daß während der Heizung eine Reinigung erforderlich war. Bei einigen Modellen mit kurzem Abzug wird die Luft vorgewärmt. Fast durchweg haben die Pflanzler, die im Besitze der Modelle mit niedrigem Schornstein waren, diese in solche mit mittelhohem Schornstein umgebaut. Bei mittelhohem Schornstein ist nämlich die Rauchentwicklung wesentlich geringer; aber infolge der lebhafteren Verbrennung besitzt die Luft einen stärkeren Auftrieb. Der Brennstoffverbrauch ist etwas höher und die Abnutzung des Heizers durch seine höhere Temperatur größer. Die destillierenden Heizer mit hohem Schornstein sind infolge des zu starken Auftriebes unbeliebt geworden. Die Farmer, die sich solche Öfen gekauft hatten, haben später sämtlich den Schornstein verkürzt.

Die deutschen Ölöfen weichen nur unbedeutend von dem amerikanischen Typ des destillierenden Ofens mit Schornstein ab. Eimeröfen und nicht-destillierende Heizer fanden in Deutschland keine Anwendung. Grundsätzlich sind die Ölgefäße kleiner, sie liegen zwischen 4 und 10 Liter Inhalt. Im allgemeinen reichen nämlich diese Brennstoffmengen für die hiesigen Frostverhältnisse aus; nur die 4 Liter-Typen erweisen sich manchmal als zu klein.

Von den Öfen (Abb. 196 h, f, Tafel 7) ist der Ofen f, der zerlegt werden kann, bei weitem praktischer. Dieser von Maurer in Oppenheim hergestellte Ölheizter besteht im wesentlichen aus einem 10 Liter fassenden Behälter, dem ein 15 cm weites Rohr von 50 cm Länge aufgesetzt ist. In diesem mit Löchern versehenen Rohr kommen die sich entwickelnden Ölgase zur Verbrennung.

Bei dem Ofen Thielmann (Abb. 196 g, Tafel 7) ist das Dach, welches die allzu lebhaft abgeführte Abgase aus dem Schornstein verhindert, als vorteilhaft ausprobiert.

Bei einem Vergleich der Kosten rechnen wir nach den örtlichen Verhältnissen in Trier 1934 zwei Braunkohlebriketts = 1 kg = 2 Pf. mit einem Heizwert von 4600 WE je Kilogramm, Braunkohlenteeröl zu 5 Pf. je Kilogramm mit rund 9000 WE je Kilogramm, sowie Koks zu 3,6 Pf. je Kilogramm bei 6800 WE je Kilogramm. Danach kosteten je

1000 WE bei Braunkohlebriketts	. 0,44 Pf.,
„ „ „ Teeröl . . . . .	0,53 Pf.,
„ „ „ Koks . . . . .	0,55 Pf.

b) Die nicht-destillierenden Heizer.

Bei diesem Ofentyp sind Ölbehälter und Brenner voneinander getrennt (Abb. 196 e, Tafel 7). Das Öl wird mittels einer kleinen Röhre aus dem Behälter zum Brenner geleitet, welcher sich am Grunde des Schornsteins befindet (Abb. 92 b). Da somit das Öl im Behälter keiner Destillation unterworfen wird, ist das zur Verbrennung kommende Öl stets von der gleichen Beschaffenheit. Die Regelung der zufließenden Ölmenge wird auf verschiedene Weise bewirkt. Die Anwendung einer Schwimmernadel oder eines Ventils verlangt ständiges Regulieren, da die Zähflüssigkeit der Öle fast durchweg stark temperaturabhängig ist und deshalb die Menge des zugeführten Öles sich nach seinem Wärmegrad richtet. Das System mit Ölpumpe ist schwierig zu füllen, wird aber in seiner Brennleistung gut beurteilt, sofern das Öl frei von Wasser und Asphalt ist. Die Ausscheidung von Asphalt verstopft die Zulaufrohre. Beim Zufluß des Öles zum Brenner durch seine eigene Schwere muß der Nachteil mit in Kauf genommen werden, daß viel weniger Öl durch die Leitung fließt, wenn der Behälter bald leer ist. Daher sinkt die Wärmeabgabe gerade morgens, wenn stärkste Wärmeabgabe verlangt wird.

Im allgemeinen hat der Typ der nicht-destillierenden Heizer keine besonders große Verbreitung erlangt. Er ist teuer in der Anschaffung, ziemlich kompliziert im Bau und erfordert besonders hochwertiges Öl.

4. Die elektrische Heizung.

Der Gedanke, Weinberge mittels des elektrischen Stromes gegen Frostschäden zu schützen, ist erstmalig 1935 in Bingen durch Schönhals unter Mitwirkung der Forschungsstelle Trier in die Tat umgesetzt worden. Dabei wurde der Strom in Drähte geschickt, die in unmittelbarer Nähe der frostgefährdeten Pflanzenteile lagen. Wirkungsweise und Rentabilität sind in dem Versuchsbericht auf Seite 197 behandelt. Nach dem heutigen Stand ist das Verfahren durchaus anwendbar, unter Voraussetzung entsprechend geringerer Kosten für Stromverbrauch und Zuleitung.

C. Die Wirkungsweise der Heizung.

Die beim restlosen Verbrennen freiwerdenden Wärmemengen in kcal je Kilogramm Heizstoff sind in folgender Übersicht zusammengestellt:

Tabelle 31. Heizwerte verschiedener Stoffe

Material	abgerundeter Heizwert
Reiner Kohlenstoff (C) . . . . .	8 000 WE = kcal je kg
Reiner Wasserstoff (H <sub>2</sub> ) . . . . .	34 000
Braunkohlebriketts . . . . .	5 000
Holzkohlebriketts . . . . .	6 500
Steinkohlebriketts . . . . .	8 000
Naphtalin (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> ) . . . . .	9 500
Heizöl . . . . .	10 000

Im Falle der Heizung mit Braunkohlebriketts gewinnen wir somit bei der restlosen Verbrennung jedes Kilogramms, das sind annähernd 2 Stück, 5000 kcal.

Es wurde aber schon weiter oben (S. 155) darauf hingewiesen, daß für die Brauchbarkeit eines Brennstoffes der Betrag der Wärmeabgabe in der Zeiteinheit (Heizintensität) von entscheidender Bedeutung ist. Die Versuche der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle in Trier haben immer wieder gezeigt, daß bei einer mittleren Ofenverteilung von einer Brennstelle auf je 50 m<sup>2</sup> jeder Ofen bei stärkeren Frösten rund 10 000 kcal in einer Stunde hergeben muß, wenn Frostschäden wirksam bekämpft werden sollen.

Im folgenden sind die Ergebnisse einiger Prüfungen zusammengestellt, durch welche die Wärmeabgabe verschiedener Öfen mit verschiedenartigem Füllmaterial ermittelt wurde.

Die Versuchsanordnung, mit deren Hilfe die Bestimmung des Wärmeumsatzes ausgeführt wurde, bestand im wesentlichen aus einer kräftigen Federwaage, die so hoch angebracht war, daß sich der eingehängte, gefüllte Ofen mit seinem Boden 1—2 cm über der Erdoberfläche befand.

Zuerst wurde ein Monos-Ofen mit Braunkohlebrikettfüllung untersucht. Nach einer Nullpunktsprüfung der Waage wurde zunächst der leere Ofen mit Deckel eingehängt und sein Gewicht zu 2,9 kg bestimmt (siehe die Tabelle 32). Hierauf wurde der Ofen vorschriftsmäßig mit etwas Holzwolle, dann mit 0,5 kg Rohnaphtalin und schließlich mit sechs Unionbriketts gefüllt, von denen jedes ungefähr 0,5 kg wog. Der gefüllte Ofen wog 6,9 kg. Nunmehr wurde der Ofen angezündet. Die Beobachtungen erfolgten während einer kalten, fast windstillen Nacht.

Tabelle 32. Wärmeabgabe eines Monos-Ofens mit Braunkohlebriketts

MEZ	Zeit-diff. in Std.	Brennstoff	Gewicht in kg	Differenz in kg	Wärme- abgabe in 1000 kcal	Gesamt- abgabe in 1000 kcal	Intensität in 1000 kcal/Std.	Bemerkungen
21 <sup>50</sup>	—	—	0,0	—	—	—	—	Nullpunktprüfung der Waage
21 <sup>55</sup>	—	—	2,9	—	—	—	—	Ofen mit Deckel allein
22 <sup>00</sup>	0	Holzwohle, 1/2 kg Naphtalin und 6 Union-Briketts	6,9	—	—	—	—	Erste Füllung
22 <sup>30</sup>	1/2	—	6,0	0,9	(6,3)	6,3	12,6	rund 0,4 kg Naphtalin, 0,5 kg Briketts; 22 <sup>50</sup> Naphtalin verbrannt!
(23 <sup>00</sup> 23 <sup>00</sup> )	1 —	— 2 Briketts nachgelegt	4,5 5,7	1,5 —	(8,0) —	14,3 —	16,0 —	rund 0,1 kg Naphtalin, 1,4 kg Briketts; Beim Nachlegen fallen kleine Glutteile heraus
(23 <sup>30</sup> 23 <sup>30</sup> )	1 1/2 —	— 2 Briketts nachgelegt	4,8 5,6	0,9 —	4,5 —	18,8 —	9,0 —	Fast windstill
(24 <sup>00</sup> 24 <sup>00</sup> )	2 —	— 2 Briketts nachgelegt	4,75 5,7	0,85 —	4,25 —	23,05 —	8,5 —	
(00 <sup>30</sup> 00 <sup>30</sup> )	2 1/2 —	— 2 Briketts nachgelegt	4,9 5,95	0,8 —	4,0 —	27,05 —	8,0 —	
(01 <sup>00</sup> 01 <sup>00</sup> )	3 —	— 2 Briketts nachgelegt	5,1 6,05	0,85 —	4,25 —	31,3 —	8,5 —	Letztes Nachlegen
01 <sup>30</sup>	3 1/2	—	5,5	0,55	2,75	34,05	5,5	
02 <sup>00</sup>	4	—	4,9	0,6	3,0	37,05	6,0	
02 <sup>30</sup>	4 1/2	—	4,6	0,3	1,5	38,55	3,0	
03 <sup>00</sup>	5	—	4,5	0,1	0,5	39,05	1,0	
03 <sup>05</sup>	—	—	2,9	(1,6)	—	—	—	Ofen mit Deckel, 1,6 kg Asche und Glutteile
03 <sup>10</sup>	—	—	0,0	—	—	—	—	Nullpunkt der Waage

Nach der ersten halben Stunde war das Gewicht von 6,9 auf 6,0 kg zurückgegangen. Während dieser Zeit war im wesentlichen Naphtalin, aber auch schon etwas von den Braunkohlebriketts verbrannt. Schätzungsweise waren 0,4 kg Naphtalin und 0,5 kg Briketts verbraucht. Da 1 kg Naphtalin einen Heizwert von rund 9500 kcal und 1 kg Braunkohlebriketts rund 5000 kcal Heizwert besitzen, so hat der Ofen in der ersten halben Stunde  $3800 + 2500 = 6300$  kcal freigegeben. Im Laufe der zweiten halben Stunde wurde das Naphtalin gänzlich aufgebraucht. Nach Ablauf der ersten Stunde betrug die Gewichtsverminderung 2,4 kg, der Materialverbrauch in der zweiten halben Stunde also 1,5 kg. Schätzt man den Verbrauch an Naphtalin mit 0,1 kg ab, so bleiben noch 1,4 kg an Braunkohlebriketts. Für die zweite halbe Stunde ergibt sich demnach eine Wärmeabgabe von  $950 + 7000 = 7950$  kcal.

Zu Beginn der zweiten Stunde wurden nach Ablesung an der Waage zwei weitere Briketts aufgelegt, wonach die Einstellung der Waage wieder notiert wurde. Dieser Vorgang wiederholte sich jede halbe Stunde bis zu Beginn der vierten Stunde. Aus der Differenz zwischen der Ablesung unmittelbar nach dem Nachlegen und der Ablesung vor dem eine halbe Stunde später erfolgenden nächsten Nachlegen ergibt sich der in dieser halben Stunde verbrauchte Brennstoff in Kilogramm und damit die während der gleichen Zeit abgegebene Wärmemenge in kcal.

Das Ergebnis der Ablesungen ist in der Abbildung 93b graphisch dargestellt. Die Kurve I veranschaulicht die vom Augenblick des Anzündens an freigewordene Gesamtwärme. Nach anfänglich raschem Anstieg, der auf das Abbrennen des energiereicheren Naphtalins zurückzuführen ist, nimmt die Kurve eine gleichmäßig mittlere Steigung an, um nach Ablauf von 3 Stunden mit dem Aufhören des Nachlegens allmählich langsamer anzusteigen und schließlich nach 5 Stunden in eine Parallele zur Stundenachse überzugehen; nach 5 1/2 Stunden ist der Ofen praktisch ausgebrannt.

Kurve II stellt den Verlauf der Heizintensität während der Brenndauer dar. Unter Heizintensität wollen wir hier die auf eine Stunde bezogene Wärmemenge in kcal verstehen, die der Ofen zwischen zwei Beobachtungsterminen abgab, unter der Annahme, daß er in der Zwischenzeit gleichmäßig brannte. Gibt also der Ofen in einer halben Stunde 5000 kcal ab, so beträgt die Heizintensität  $2 \times 5000 = 10000$  kcal. Die Kurve II steigt zunächst sehr rasch an, um nach etwa einer halben Stunde den Höchstwert von über 16000 kcal/std zu erreichen. Nach diesem Maximum klingt die Kurve schnell wieder ab, da jetzt das Naphtalin verbrannt ist, und verläuft nunmehr

während der zweiten und dritten Stunde mit nur geringen Schwankungen in der Höhe zwischen 8000 und 9000 Einheiten. Nach dem letzten Nachlegen der Briketts nehmen die Werte bei zunächst starker Schwankung, die auf das zeitweilige Zusammensacken der glühenden Briketts zurückzuführen ist, langsam wieder ab, um nach etwa 5 1/2 Stunden Gesamtbrenndauer die Nulllinie zu erreichen.

Wenn wir von der beigegebenen Menge Holz- wolle (einige Gramm) absehen, die für den Wärme- umsatz bedeutungslos ist, so stehen mit den 0,5 kg Naphtalin fast 5000 und mit den 16 Briketts (etwa 8 1/2 kg) rund 43000, insgesamt also 48000 kcal an Wärmeverrat zur Verfügung. Aus der Summierung des zu jeder halben Stunde bestimmten Gewichts- verlustes ergibt sich aber, daß nur etwas über 39000 kcal insgesamt abgegeben wurden. Der Ver- lust von fast 9000 kcal erklärt sich auch zum Teil noch daraus, daß beim Ausleeren des Ofens nach 5 1/2 Stunden noch glühende Briketteile vorhanden waren. Im vorliegenden Fall betrug der Verlust also 19 % der aufgewandten Energie.

In der Praxis wird sich der Verlust wohl noch etwas höher stellen, da ja ein Teil des Heizmaterials unverbrannt als Rauch und Ruß entweicht. Eine Be- stimmung der von Öfen erzeugten Rauchmengen hat Hoffmann<sup>157)</sup> ausgeführt. Dabei wurde von jedem einzelnen Ofen das gleiche Volumen an Gasen, die der Flammenspitze entstammten, durch eine kreis- förmige Blende von 7,5 cm Durchmesser auf ein Stück weißen Filz geleitet. Je mehr ein Ofen rauchte, um so dunkler erschien nachher der Filz. Außer dieser visuellen Bestimmung hat Hoffmann den auf den Filz niedergeschlagenen Ruß auch noch quantitativ ermittelt. Er fand, daß die destillierenden Ölheiz- er außerordentlich viel Ruß liefern; die nicht-destillierenden Öl- öfen und die Briketheizer brennen dagegen mit verhältnis- mäßig wenig Rußentwicklung.

Um das Verhalten des gleichen Brennstoffs (Braun- kohlebrikett) in einem anderen Ofentyp zu untersuchen, wurde ein Vergleich zwischen dem MONOS-Ofen und einem Ofen von Steinheuer (Oberremmel/Saar) angestellt. Die beiden Öfen wurden an je einer Federwaage neben- einander aufgehängt. Der MONOS-Ofen wurde wie in dem zuerst beschriebenen Versuch beschickt, jedoch erhielt er nach Ablauf von 3 Stunden nur ein Brikett statt zwei. Der Steinheuer-Ofen wurde nach Vorschrift (dreieckig gehäuft) mit 15 Briketts gefüllt. Die Witterungsverhält- nisse waren denen, die während des ersten Versuchs herrschten, sehr ähnlich.

Abbildung 94 zeigt das Ergebnis der Untersuchung am Steinheuer-Ofen. Der zum Vergleich herange- zogene Verlauf der Heizintensität des MONOS-Ofens ist hier nicht wiedergegeben, da er nur unwesentlich von der aus der ersten Messung gewonnenen Kurve abweicht. Durch viertelstündliche Ablesungen an der Waage während der ersten Stunde konnte allerdings nachgewiesen werden, daß das Naphtalin im Monos-Ofen anfänglich schneller und heftiger verbrennt, als es nach dem ersten Versuch mit halbstündlicher Ablesung den Anschein hatte. Die Intensität betrug nämlich in der ersten Viertelstunde maximal

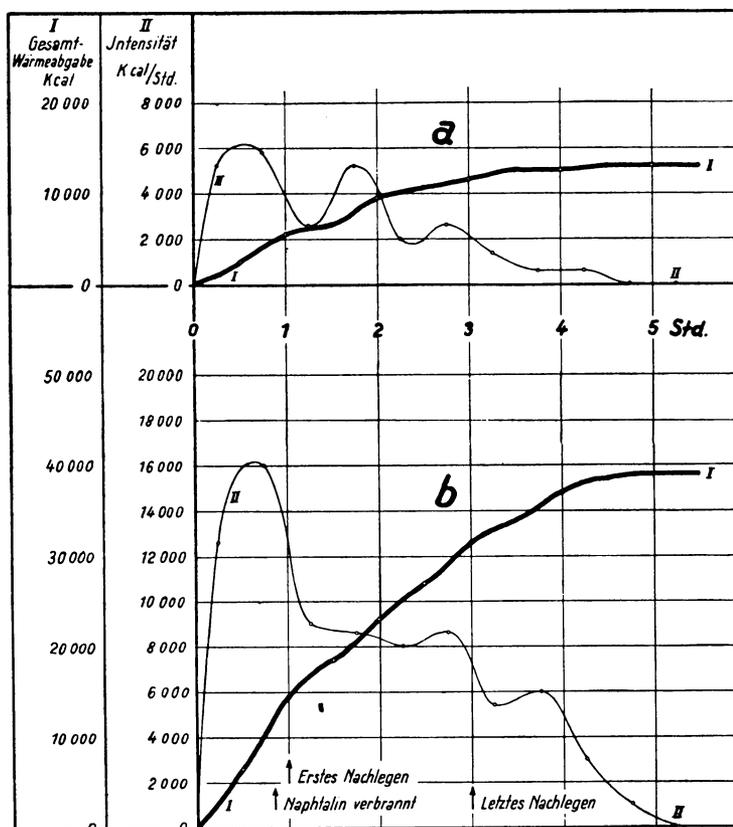


Abb. 93. Vergleich zwischen der Wärmeabgabe eines „Monos“-Ofens (b) mit Braunkohlebriketts und eines „Wouters“-Ofens mit Holzkohle.

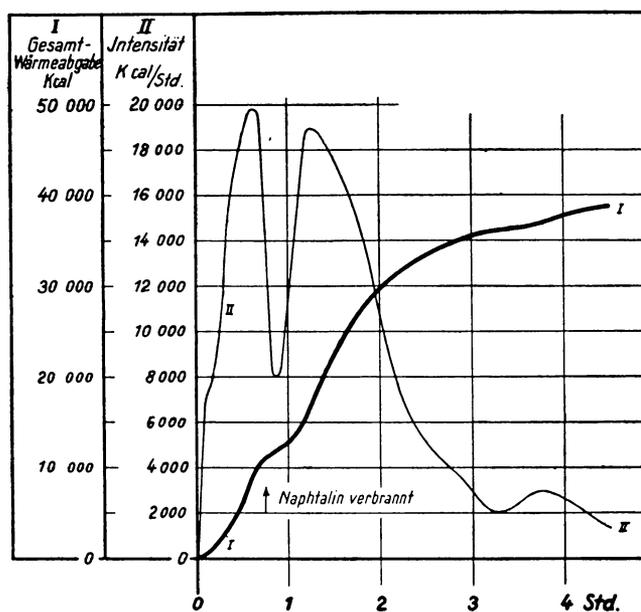


Abb. 94. Wärmeabgabe eines „Steinheuer“-Ofens mit Braunkohlebriketts.

27 000 kcal/std. Nach dem Verbrennen des Naphtalins machte sich ein vorübergehender Rückgang der Intensität bemerkbar, da die Briketts zu dieser Zeit noch nicht durchgebrannt waren; nach Ablauf einer Stunde blieb jedoch die Wärmeabgabe bis zum letzten Nachlegen zwischen 9000 und 10 000 kcal/std, um dann allmählich abzuklingen.

Demgegenüber zeigt die Heizintensität des Steinheuer-Ofens, die durch Kurve II dargestellt wird, einen gänzlich anderen Verlauf. Zunächst erfolgt auch hier ein rascher Anstieg, der auf die heftige Verbrennung des Naphtalins zurückzuführen ist. Dann läßt sich, wie beim Monos-Ofen, in der vierten Viertelstunde ein Rückgang beobachten, dessen Minimum bei 8000 liegt. Hierauf folgt aber, wohl durch die Schlotwirkung verursacht, erneut ein rascher Anstieg bis nahezu 20 000. Danach fällt die Kurve jedoch wieder ziemlich schnell ab und unterschreitet nach Ablauf von 2 Stunden den Wert 10 000; nach 2 1/2 Stunden Brenndauer beträgt die Intensität 5000, nach 3 Stunden nur noch 3000, während sie sich zu dieser Zeit beim Monos-Ofen unter der Voraussetzung gleicher Gesamtfüllung immer noch zwischen 9000 und 10 000 kcal hält.

Es bleibt noch nachzutragen, daß der Steinheuer-Ofen einen Deckel mit einer zentralen Kreisöffnung von etwa 10 cm Durchmesser besitzt, die ihrerseits wieder durch eine besondere Klappe verschlossen werden kann. Beim Anzünden des Ofens war die Klappe ganz geöffnet. Nach Ablauf von 3/4 Stunden, als das Naphtalin verbrannt war, wurde sie der Bedienungsvorschrift entsprechend geschlossen und verblieb in dieser Stellung bis zum Ende der Messung. Wäre die Klappe nach einer Stunde ganz geschlossen worden, so hätte vielleicht eine weniger heftige Verbrennung stattgefunden, obwohl eine solche Reguliervorrichtung in Anbetracht des seitlichen Löcherkranzes ziemlich illusorisch erscheint.

In einem weiteren Versuch wurde die Wärmeabgabe eines Heizofens mit Holzkohle nach Wouters-Bonn geprüft. Der Ofen ist auf Seite 157 beschrieben. Die Auswertung der Ablesungen an der Waage während der Heizdauer des Ofens ist in Abb. 93a dargestellt. Die Kurve I zeigt deutlich, daß die Holzkohle durch die starke Hitzeentwicklung des zum Anzünden benutzten Spiritus zwar rasch in Glut kommt, im ganzen aber bedeutend weniger Wärme hergibt und früher ausbrennt als die Braunkohlebriketts in dem Monos-Ofen (Abb. 93b).

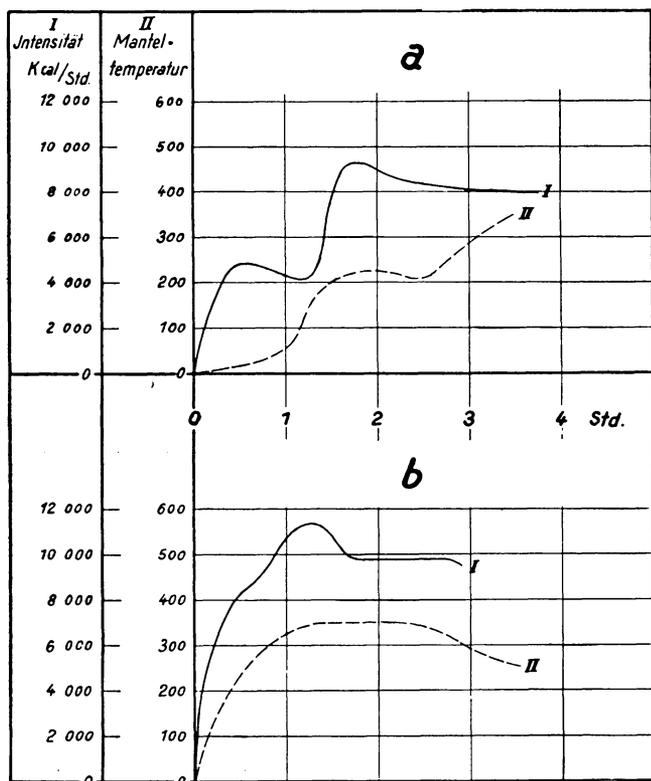


Abb. 95. Wärmeabgabe eines „Monos“-Ofens mit 50 g-Steinkohlebriketts, a) ohne, b) mit Rost.

einmaliges Nachfüllen der halben Ausgangsmasse (etwa 1 kg) nach Ablauf von 2 Stunden vornehmen.

Gleichen Preis und gleiche Haltbarkeit der Öfen vorausgesetzt, käme das so angewandte Heizverfahren mindestens viermal so teuer wie das Verfahren mit den Normalöfen.

Inzwischen wurden auch von dem Rheinisch-Westfälischen Kohlensyndikat in Essen entsprechende Messungen über die Wärmeabgabe von Steinkohlebriketts in normalen Monos-Öfen ohne Kegeleinsatz durchgeführt.\*)

\*) Nach brieflicher Mitteilung des Rheinisch-Westfälischen Kohlensyndikats, Essen.

Kurve II verrät den unruhigen Verlauf der Wärmeentwicklung. Beträgt die Intensität in der ersten Halbstunde 5200, in der zweiten 5800 kcal/std, so sinkt sie schon in der dritten Halbstunde auf die Hälfte des Ausgangswertes, nämlich auf 2600 herab. In der vierten Halbstunde wird der Wert von 5200 noch einmal erreicht, während nach Ablauf von 3 Stunden die Intensität zunächst auf etwa 1000 und später auf 700 und weniger kcal/std zurückgeht. Nach 3 1/2 Stunden ist die Wärmeentwicklung praktisch bedeutungslos, wenn auch noch nach 5 Stunden glühende Teile beobachtet werden konnten.

Insgesamt hat der Ofen 13 000 kcal hergegeben. Hineingesteckt wurden 2,1 kg Holzkohle, was bei einem durchschnittlichen Heizwert von 6500 kcal je Kilogramm Holzkohle einem Wärmehalt von 13 600 kcal entspricht. Der Verlust durch unvollständige Verbrennung betrug demnach weniger als 5 %.

Die gesamte Wärmeabgabe belief sich also bei der Holzkohle auf nur 33 % der des Monos-Ofens mit Braunkohlebriketts, die Leistung während der Hauptbrenndauer auf 40—50 %. Man müßte daher, um gleiche Wirkungen wie mit den Monos-Öfen, von denen ja ein Ofen im Durchschnitt auf 50 m<sup>2</sup> Bodenfläche gestellt wird, zu erzielen, von den Holzkohleöfen mindestens je einen auf 25 m<sup>2</sup> (Abstand 5 m) stellen, und außerdem zur Verlängerung der Heizwirkung mindestens

Abbildung 95 stellt die Ergebnisse von zwei Vorversuchen dar. Die obere Kurve wurde durch Verbrennen von 50 g-Eierbriketts in Monos-Öfen erhalten, wobei die Beschickung unter Umrechnung auf gleiche Wärmeeinheiten in derselben Weise erfolgte wie bei den Braunkohlebriketts. Man sieht, daß die Verbrennung ziemlich ungleichmäßig vor sich geht und die Leistung zeitweise stark absinkt. Einen günstigeren Verlauf zeigt die untere Intensitätskurve. Diese wurde dadurch erzielt, daß man den Monos-Ofen mit einem Rost versah.

Unter den beiden Intensitätskurven ist jedesmal der Verlauf der Manteltemperatur des Ofens dargestellt. Diese Werte wurden durch Anlegen zweier Oberflächenthermoelemente in halber Ofenhöhe gewonnen. Bei dem Ofen mit Rost steigen die Manteltemperaturen nach einer Stunde bereits auf über 300 Grad an. Demgegenüber erreicht die Manteloberfläche der mit Braunkohlebriketts geheizten Öfen nur etwa 200—250 Grad. Die höhere Manteltemperatur bei Heizung mit Steinkohlebriketts ist naturgemäß mit einer stärkeren Abstrahlung nach der Seite hin verbunden.

Die Oberflächentemperaturen der Öfen sind jedoch, wie Hoffman<sup>157)</sup> feststellen mußte, sehr unterschiedlich und stark von der Verteilung des Feuers im Innenraum des Ofens abhängig. Besonders große Unregelmäßigkeiten wurden bei Brikettöfen wahrgenommen; bei den Ölheizern waren sie wesentlich kleiner.

Abbildung 96 läßt den Verlauf der Intensität bei achtstündiger Heizung mit Anthrazit-Eierbriketts erkennen; der Rost ist hier durch eine Ascheneinlage ersetzt. Man sieht deutlich, daß die Intensität sich während der ganzen Versuchsdauer in verhältnismäßig engen Grenzen, zwischen 8000 und 12000 kcal/std, hält, wenn man entsprechend nachlegt. Auch die Manteltemperatur ist verhältnismäßig konstant und schwankt um 300 Grad.

Eine gewisse Unbequemlichkeit bei Anwendung von Eierbriketts aus Steinkohle besteht in der umständlicheren Lagerung und Füllung gegenüber den Braunkohlebriketts. Vorteilhaft ist jedoch der Umstand, daß nach Beendigung des Frostes die Eimer entleert und die restlichen Briketts wieder verwendet werden können, da dieselben kurz nach der Entleerung verlöschen.

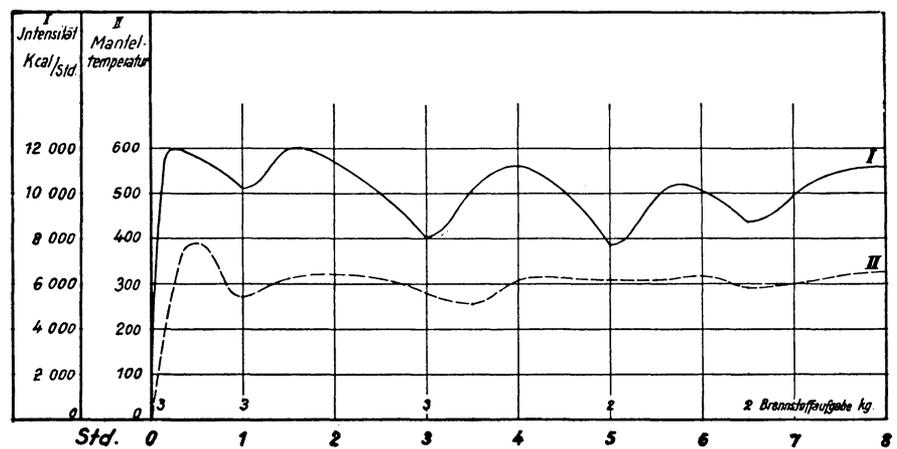


Abb. 96. Wärmeabgabe eines „Monos“-Ofens mit Anthrazit-Eierbriketts. (Ofen mit Ascheneinlage.)

Wir haben schon oben betont, daß eine wirksame Frostbekämpfung nach praktischen Erfahrungen für 50 m<sup>2</sup> eine Wärmemenge von rund 10000 kcal/std verlangt, für 1 m<sup>2</sup> also durchschnittlich 200 kcal/std. Diesen Betrag erhält man, wenn man auf je 50 m<sup>2</sup> Bodenfläche einen Ofen mit einem Verbrauch von vier Braunkohlebriketts pro Stunde rechnet. Bei Ölheizern kommen wir auf den gleichen Wert, wenn dieselben so gebaut werden, daß sie 1 kg Heizöl in der Stunde verbrauchen. Beim Verbrennen offen ausgelegter Briketts muß man die Dichte und gewichtsmäßige Stärke der Feuerstellen so wählen, daß die verlangte Heizintensität erzielt wird. Bei unseren Versuchen kam allerdings meist eine Verteilung in Anwendung, bei der die Heizintensität über dem geforderten Maß von 200 kcal/m<sup>2</sup>/std lag. Wenn wir annehmen, daß die Briketts in diesem Falle 9 Stunden brannten (siehe Versuch Veldenz, Seite 185), und auf je 1,7 m<sup>2</sup> zwei Briketts (= 1 kg) entfallen, so stehen in jeder Stunde etwa 320 kcal pro Quadratmeter Bodenfläche zur Verfügung, die allerdings nicht gleichmäßig frei werden.

Wie Messungen der effektiven Ausstrahlung ergeben haben, verliert in einer klaren Nacht 1 cm<sup>2</sup> der Erdoberfläche in einer Minute durch Ausstrahlung etwa 0,15 gcal oder 1 m<sup>2</sup> in einer Stunde 90 kcal. Diesem Verlust von rund 100 kcal steht ein Gewinn von 200—300 kcal durch das Verbrennen der Heizmaterialien gegenüber. Mithin dienen höchstens 50 % der aufgewendeten Energie als Ersatz für durch Ausstrahlung verlorengehende Wärme.

Berechnen wir die Temperatur, die ein über einem Quadratmeter Bodenfläche liegender Kubikmeter Luft erreichte, wenn er die zur Verfügung stehende Verbrennungswärme restlos aufnähme, so kommen wir zu folgendem Ergebnis: Der Monos-Ofen lieferte bei Beschickung mit Braunkohlebriketts in etwa 5 Stunden 39000 kcal; bei einer Ofendichte von einem Heizkörper auf 50 m<sup>2</sup> sind das im Mittel 780 kcal/m<sup>2</sup>. Durch Ausstrahlung gehen in dieser Zeit von 5 Stunden etwa 450 kcal verloren. Die somit verbleibenden 330 kcal wären in der Lage, die Temperatur eines auf dem Boden liegenden Kubikmeters Luft um rund 1000 Grad zu erhöhen.

In Wirklichkeit sind aber bei den Versuchen im zentralen Teil der Heizfläche nur Anstiege der Temperatur um 5 Grad gemessen worden. Freilich steigt die Temperaturerhöhung mit Annäherung an die

Heizstelle zu größeren Werten an. Ein Mittelwert von 10 Grad wird aber schon hoch gerechnet sein. Diese Temperaturerhöhung der Luft um 10 Grad entspricht einer Wärmeaufnahme von rund 3 kcal. Wie man sieht, beträgt diese Wärmemenge nicht ein Hundertstel der insgesamt zur Verfügung stehenden. Der größte Teil der durch die Geländeheizung entwickelten Wärme geht auf dem Wege des Austausches verloren, und zwar durch den Austausch sowohl in der Horizontalen wie auch in der Vertikalen. Praktisch stellt sich allerdings heraus, daß dies kein restloser Verlust ist, sondern daß die Verstärkung der Austauschvorgänge gleichfalls einen Frostschutz bedeutet.

Hoffman<sup>157)</sup> hat 1927 die Schnelligkeit der von den heißen Öfen aufsteigenden Gase mit einem eigens gebauten Anemometer gemessen. Dieses befand sich direkt am oberen Rande des Schornsteins und reichte zum Teil noch in denselben hinein; dadurch sollten Störungen durch Wind ausgeschaltet werden. Bei Öfen mit niedrigem oder nur mittelhohem Schornstein war die Geschwindigkeit im allgemeinen kleiner als bei solchen mit hohem; sie überstieg meist 4 m/sec. Bei Brikettöfen lag sie bei etwa 0,75 bis 1,5 m/sec. Das Anbringen von sogenannten Spinnen (Seite 159) soll das rasche Aufsteigen des Heißluftstromes abbremsen und ein mehr horizontales Ausbreiten desselben bewirken; damit wird gleichzeitig eine bessere Vermischung mit der kalten Luft angestrebt. Tatsächlich konnte nach Hoffman bei zwei Ofentypen auf diese Weise die Vertikalgeschwindigkeit von etwa 2 m/sec auf unter 0,75 m/sec herabgesetzt werden.

Auf Grund der Strahlungsgesetze läßt sich unter vereinfachenden Annahmen berechnen, ein wie großer Teil der beim Verbrennen insgesamt freiwerdenden Wärmemenge in Strahlung der Ofenwand umgesetzt wird.

Der am meisten benutzte Normalofen (Monos) besitzt bei einem mittleren Durchmesser von 26,5 cm und einer Höhe von 57 cm im Längsschnitt eine Flächenausdehnung von rund 1500 cm<sup>2</sup>, die wir an Stelle des halben Mantels als strahlende Fläche annehmen wollen. Als Temperatur der Ofenoberfläche haben Messungen mit Anlegethermoelementen 200—300 Grad C ergeben. Für unsere Rechnung wollen wir eine mittlere Oberflächentemperatur von 250 Grad C oder 523 Grad abs. wählen.\*)

Nach dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz strahlt eine vertikale Fläche  $f$  bei der absoluten Temperatur  $T$  in die seitliche Halbkugel

$$E = f \cdot \sigma_0 \cdot T^4.$$

Diese Beziehung gilt aber nur unter der Voraussetzung, daß der Strahler einem Raum mit der Temperatur des absoluten Nullpunktes entgegengestellt wird. In Wirklichkeit werden sich aber die Luft und die Gegenstände der Umgebung in einer Temperatur befinden, die in der Nähe des Gefrierpunktes liegt. Es ist also die schon in Abschnitt VI gebrachte Gegenstrahlungs-Gleichung mit der Ofentemperatur  $T_0$  und Umgebungstemperatur  $T_U$  zu verwenden. Dabei ergibt sich für die effektive Ausstrahlung des Ofens

$$E_{\text{eff}} = f \cdot \sigma_0 (T_0^4 - T_U^4); \quad T_0 = 523^{\circ} \text{ abs.}, \quad T_U = 273^{\circ} \text{ abs.}$$

$$E_{\text{eff}} = 1500 \cdot 8.20 \cdot 10^{-11} \cdot (523^4 - 273^4)$$

$$E_{\text{eff}} = 8500 \text{ gcal/min}$$

Demnach werden nach beiden Seiten des Ofens zusammen rund 17000 gcal/min oder 1000 kcal/std ausgestrahlt. Nehmen wir an, daß bei normalem Zug je Stunde vier Braunkohlebriketts (= 2 kg) vollständig verbrennen, deren Heizwert 10000 kcal beträgt, so werden 10 % der entwickelten Wärme in Strahlung der Ofenwand umgesetzt.

Führen wir dieselbe Rechnung durch unter Annahme einer Ofenmanteltemperatur von 400 Grad C, wie das wohl für die großen Ölheizter zutreffen dürfte, so würde der Umsatz in Strahlung bei doppelter Heizintensität 15 % betragen.

Es ist interessant, diesem durch Rechnung gefundenen Wert einen praktisch gemessenen gegenüberzustellen. Hoffman<sup>157)</sup> hat 1927 die Ausstrahlung eines Ölheizers experimentell festgestellt und ist dabei folgendermaßen vorgegangen.

Zur Bestimmung der Ausstrahlung des heißen Ofens wurde ein zentraler Ausstrahlungspunkt angenommen. Die Ausstrahlung in die obere Halbkugel wurde mit Hilfe eines Radiometers gemessen, indem dieses in 3 m Abstand auf einem vertikalen Viertelkreis in sieben verschiedene, um 15 Grad voneinander entfernte Stellungen gebracht wurde. Schließlich wurde dann offenbar durch Integration über die ganze Halbkugel die Gesamtstrahlung aus den Einzelmessungen errechnet. Hierbei hat sich ergeben, daß nur 5 % der gesamten Wärmeerzeugung in Form strahlender Energie aufgefangen wird.

\*) Die Flammentemperaturen selbst sind natürlich wesentlich höher. Hoffmann hat diese mittels eines elektrischen Pyrometers gemessen, das er gerade an den Rand des Schornsteins hielt. Leuchtende Flammen von Ölheizern zeigten in einzelnen Fällen bis 760 Grad C.

In der Abbildung 97 ist die Verteilung der Ausstrahlungsintensitäten in einem Vertikalschnitt der Halbkugel nach den Messungen von Hoffman wiedergegeben. Dabei fällt das Maximum in der 45 Grad-Richtung besonders auf. Die gestrichelte Kurve gibt die Verteilung für einen Ölofen mit aufgesetztem Deflektor, einer in geringem Abstand über dem Schornstein angebrachten Blechscheibe. Da diese wegen der großen Berührungsfläche mit der Luft keine so hohen Temperaturen annimmt wie die Verbrennungsgase, so wird durch ihre Anbringung die Ausstrahlung nach oben wesentlich vermindert. Wird dadurch auch die Ausnutzung der Verbrennungswärme für die unmittelbare Umgebung um einige wenige Prozente rationeller gestaltet, so nimmt wegen Verminderung des Zuges die Geschwindigkeit der Verbrennung und damit die Wärmeabgabe in der Zeiteinheit doch erheblich stärker ab. Man wird deshalb von der günstigen Wirkung des Deflektors nur dann Gebrauch machen können, wenn lediglich geringere Heizleistungen gefordert werden.

Die Mantelstrahlung der verschiedenen Ofentypen ist je nach Bauart und Temperatur verschieden und kann durch gewisse Maßnahmen gesteigert werden. So bewirkt der kegelförmige Einsatz auf dem Boden der Monos-Öfen, daß die glühenden Briketteile gegen die Wand gedrängt werden, wodurch sich diese stärker erhitzt und intensiver strahlen kann.

Mit Hilfe des Ferneffektiv-Aktinometers nach Dubois<sup>93)</sup> wurde die Ausstrahlung eines solchen Monos-Ofens im Vergleich zu einem gleichartigen Ofen ohne Kegeleinsatz gemessen. Um von zufälligen Änderungen der Manteltemperatur auf den verschiedenen Seiten des Ofens unabhängig zu sein, wurde ein drehbares, an einem langen Stahldraht aufgehängtes und mit einer Führung am Boden versehenes Gestell angefertigt, in das der zu untersuchende Ofen hineingestellt werden konnte (Abb. 98). Vor Beginn der Messung wurde der Draht 10—20 mal tordiert, dann wurde das Gestell mit dem Ofen losgelassen und die Blende des Aktinometers geöffnet, so daß die von dem Ofen ausgehende Strahlung die Blende des 10 m von dem Ofen entfernt aufgestellten Aktinometers senkrecht passieren mußte. Dabei stand das Aktinometer auf der Luvseite des Ofens, um Störungen durch Windversetzungen zu vermeiden.

Das photographisch registrierende Strahlungsgerät erhielt auf diese Weise mehrmals hintereinander die Strahlung des Ofenmantels von dessen ganzem Umfang zugestrahlt. Wie die Registrierkurven zeigen (Abb. 99 a), wurden bei diesen Messungen meist drei Umkehrpunkte erfaßt.

Der Vergleich zwischen den beiden Ofenmodellen (Abb. 99b) ergab, daß der Monos-Ofen über das doppelte von dem ausstrahlte, was der Ofen ohne Kegeleinsatz bei gleicher Beschickung und Brenndauer an Strahlung hergab. Durch kleine Kunstgriffe kann also die seitlich auftretende Strahlung erhöht und somit die zur Verfügung stehende Heizwärme für die nächste Umgebung besser nutzbar gemacht werden.

Zur Bestimmung der Temperaturerhöhung, die durch die

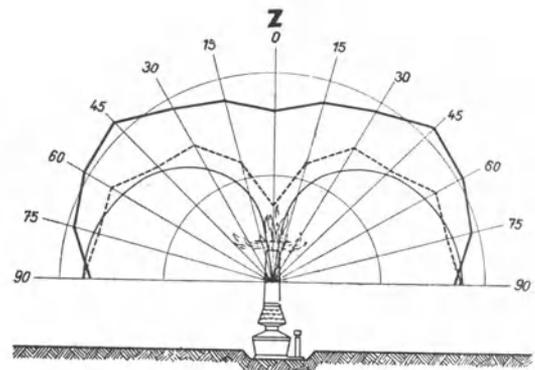


Abb. 97. Meridionale Verteilung der Ausstrahlungsintensität eines Ölheizofens nach Hoffman.  
 — Ofen normal brennend,  
 - - - Ofen mit aufgesetztem Deflektor,  
 — Theoretische Kurve prop.  $V \sin z$ .

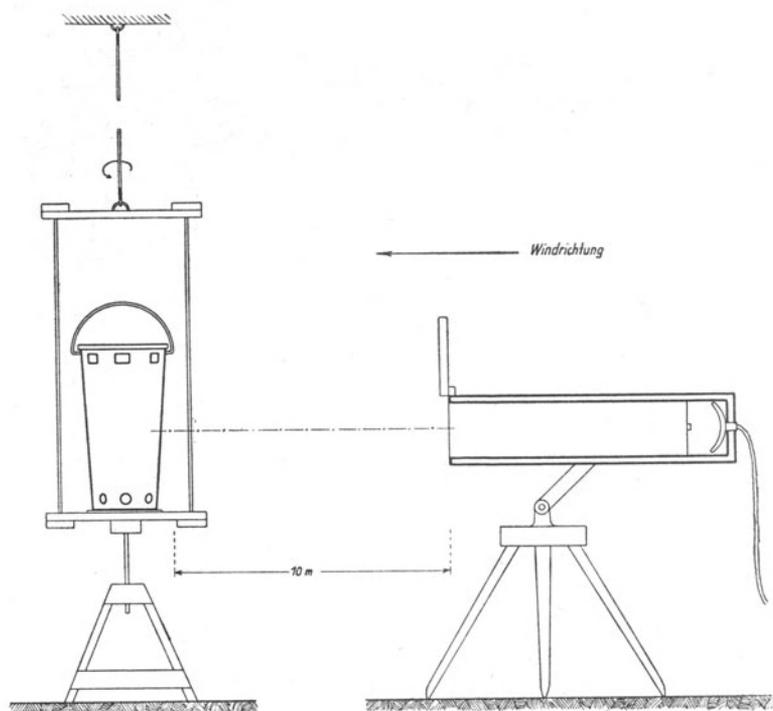


Abb. 98. Meßanordnung zur Bestimmung der Ausstrahlung des Mantels eines brennenden Brikettoffens. (Links: Ofen in Drehvorrichtung, rechts: Effektivaktinometer.)

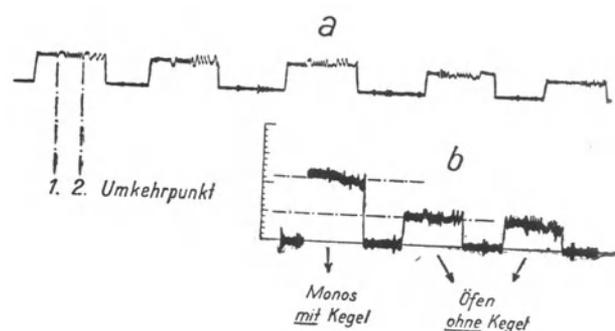


Abb. 99. Ausschnitte aus den Registrierungen zur Bestimmung der Ausstrahlung eines Brikettheizofens. a) Fünf Meßkurven mit jeweils zwei Umkehrpunkten. b) Eine Meßkurve für Ofen mit Kegeleinsatz und zwei Meßkurven für Ofen ohne Kegeleinsatz.

von einem Geländeheizofen ausgehende Strahlung etwa zu erwarten ist, wurde anlässlich eines Heizversuches in Avelsbach (Seite 195) folgender Versuch durchgeführt.

Inmitten des mit Mauser-Öfen bestellten Feldes waren mehrere Thermometer, teils geschwärzt, teils blank und verschiedentlich auch mit Budig-Schirmen versehen, längs einer Diagonale eines Ofenquadrates angeordnet. Die Höhe über dem Boden war die normale von 50 cm, die Entfernung von einem Ofen aus betrug 1,6, 3,3 und 5,0 m, so daß sich das letztere Thermometer im Schnittpunkt der beiden Diagonalen zwischen vier Öfen befand. Die Tabelle 33 enthält die entsprechenden Werte, die durch Mittelbildung der Ablesungen vor und nach dem Entzünden der Öfen erhalten wurden.

Tabelle 33  
Außenzone

	Lufttemperatur (Mittel)	blankes Th.	geschwärztes Th.
21 <sup>00</sup> —21 <sup>45</sup> Uhr	—0,7 <sup>0</sup>	—1,2 <sup>0</sup>	—1,2 <sup>0</sup>
22 <sup>00</sup> —01 <sup>00</sup> Uhr	—1,1	—1,7	—1,8
Differenz	—0,4	—0,5	—0,6

Heizfeld

	Luft- temperatur (Mittel)	blankes Th.	geschwärztes Thermometer in			
			5,0 m	5,0 m und BUDIG	3,3 m	1,6 m
21 <sup>00</sup> —21 <sup>45</sup> Uhr	—0,7 <sup>0</sup>	—1,2 <sup>0</sup>	—1,4 <sup>0</sup>	—0,8 <sup>0</sup>	—1,8 <sup>0</sup>	—1,6 <sup>0</sup>
22 <sup>00</sup> —01 <sup>00</sup> Uhr	—0,7	—1,3	—1,6	—0,8	—1,8	—1,1
Differenz	0,0	—0,1	—0,2	—0,0	—0,0	+0,5

Während die Lufttemperatur (gemessen mit Alkoholminimumthermometer mit Budig-Schirm) in der Außenzone um 0,4 Grad abfiel, nahm gleichzeitig die Ausstrahlung zu; denn die Temperatur des ungeschützten blanken Thermometers sank zur gleichen Zeit um 0,5 Grad, die des geschwärzten um 0,6 Grad.

Im Innern des beheizten Feldes blieb die Lufttemperatur während des Versuches im Mittel konstant. Das ungeschützte blanke und das schwarze Thermometer im größtmöglichen Abstand von den Öfen (5 m) zeigen in gleicher Weise wie die entsprechenden Thermometer in der Außenzone eine Zunahme der Unterkaltung von 0,1 bzw. 0,2 Grad. In diesem Abstand von 5 m bewirkt die vom Ofen ausgehende Strahlung noch keinerlei Temperaturerhöhung, wie es das geschwärzte und gleichzeitig durch einen Budig-Schirm gegen Ausstrahlung geschützte Thermometer erkennen läßt. Die Temperaturdifferenzen der in 1,6 und 3,3 m vom Ofen entfernten geschwärzten Thermometer betragen 0,5 bzw. 0,0 Grad. Bei diesen Werten ist der Betrag der Abkühlung, die wir oben im Fall der geschwärzten Thermometer zu 0,2 Grad festgestellt haben, noch zu berücksichtigen. Die durch Strahlung des Ofens bewirkte Temperaturerhöhung beträgt somit bei maximaler Absorption in 1,6 m Abstand vom Ofen 0,7 Grad C, in 3,3 m Abstand 0,2 Grad und in 5 m Abstand 0,0 Grad.

#### D. Meßergebnisse bei den verschiedenen Heizverfahren.

##### 1. Versuche in den Vereinigten Staaten von Amerika.\*)

Erst aus der Frühjahrsfrostperiode des Jahres 1910 liegt eine größere Reihe von Versuchsberichten vor. Damals führte R. H. Sullivan<sup>376)</sup> zwei Heizversuche durch. Bei dem ersten wurde zum Schutze eines Obstgartens je ein Ofen für eine Fläche von etwa 50 m<sup>2</sup> eingesetzt; die Früchte blieben unversehrt. In einem weiteren Versuch wurden insgesamt 500 Öfen über ein etwa 4 ha großes Gelände verteilt; es kam also auf etwa 80 m<sup>2</sup> 1 Ofen. Das zu schützende Gelände war mit Apfelbäumen bepflanzt. Dieser zweite Versuch mußte zwar aus Mangel an Brennstoff vorzeitig abgebrochen werden, immerhin war aber der Schaden geringer als auf den benachbarten Feldern. Auf Grund von, allerdings nicht mitgeteilten, Temperaturmessungen hält es Sullivan für möglich, mit einem Ofen auf 70—100 m<sup>2</sup> die Ernte zu retten, auch wenn die Temperatur bis auf —3,9 Grad oder gar —5,5 Grad sinkt.

Recht ausführlich berichtet W. Walton<sup>394)</sup> über die Ergebnisse beim Heizen seiner Plantage in Indiana. Er hebt besonders hervor, daß das Mittel der Lufttemperatur des März 1910 den höchsten Wert annahm, der je

\*) Alle Temperaturangaben sind von uns auf Celsiusgrade umgerechnet.

in dieser Gegend erreicht worden war; daher war die gesamte Vegetation anfangs April um 14 Tage voraus im Vergleich mit anderen Jahren. Hingegen brachte die zweite Hälfte des April den Rekord der Minimumtemperatur. Am 31. März wurden die gefüllten Heizer in 6,4 m Abstand voneinander im Gelände aufgestellt (1 Ofen also auf je 41 m<sup>2</sup>).

In der ersten Frostnacht vom 6./7. April wurden im unbeheizten Gebiet — 2,7 Grad gemessen, in der beheizten Zone sank die Temperatur an keiner Stelle unter Null. Die Heizdauer betrug in dieser Nacht etwa 11 Stunden. In der folgenden Nacht wurde wiederum geheizt; während bei Sonnenaufgang in der Umgebung alles stark bereift war, an einigen Stellen sich sogar 0,5 cm dicke Eisschichten gebildet hatten, war im beheizten Gelände keine Spur von Reif zu sehen. Desgleichen konnte auch in der Nacht vom 12./13. April mit Erfolg geheizt werden.

„Am 22. April blies ein starker NW-Wind bei einer Temperatur von 0 Grad. Infolgedessen gelang es nur sehr schwer, das Aufsteigen der Wärme bis zu den Zweigen der Bäume zu erreichen. Trotzdem erhielten wir einen gewissen Schutz. Um 10 Uhr wurde bei den gleichen Windverhältnissen — 3,9 Grad abgelesen. Die Öfen wurden zwar stets brennend gehalten, aber bald sahen die Blätter wie von Wachs aus. Wir setzten die Heizung bis zum Eintreffen der Wetternachrichten fort; diese stellten starken Wind und niedere Temperaturen in Aussicht. Um 11 Uhr vormittags war im unbeheizten Gelände bereits alles erfroren. Wir hatten schon 14850 Liter Öl verbraucht. Die tiefen Temperaturen hielten Tag und Nacht an bis zum 26., an welchem Tag starker Schneefall einsetzte. Wir ernteten natürlich keine Johannisbeeren, keine Himbeeren, auch keine Kirschen, Pflaumen oder Pfirsiche und nur sehr wenige Äpfel.“

„Nachdem wir alle Baum- und Strauchfrüchte verloren hatten, lenkten wir unsere besondere Aufmerksamkeit auf die etwa 0,73 ha große Erdbeerplantage.“ „Es wurden 180 Heizer aufgestellt, die drei Nächte hindurch brannten, da die Temperatur auf — 3,9 Grad gesunken war. In der Nacht zum 13. Mai wurden die Feuer um 20 Uhr 30 entzündet und erst um 07 Uhr morgens wieder ausgelöscht.“

„Es war sehr schwierig, die Reifbildung auf den Ranken zu verhindern, da noch sehr wenig Blätter vorhanden waren, die die Wärme aufzuhalten vermochten.“

„... Die Ernte war in diesem Jahr außergewöhnlich gut und reich. Sie war sogar besser und größer als in den Jahren mit günstigeren Witterungsverhältnissen. Den guten Erfolg darf man wohl mit voller Berechtigung der Heizung während der Frostperiode zuschreiben.“

In der Nacht vom 13./14. April 1910 wurde auch von O'Gara<sup>296</sup>) in einem etwas über 12 ha großen Obstgarten ein Heizversuch mit Rohöl durchgeführt. Die Bäume, die in einem Alter von 22 Jahren standen, waren von ansehnlicher Größe und besaßen ausgebreitete Kronen. Innerhalb des Obstgartens hingen 30 Thermometer in etwa 1 m Höhe über dem Boden an den Zweigen der Bäume. Auch außerhalb des Obstgartens waren Thermometer aufgestellt worden. Von den Öfen (vermutlich Schmalzeimeröfen) kam je einer auf eine Fläche von rund 65 m<sup>2</sup> zu stehen. Als in der erwähnten Nacht gegen 01 Uhr die Temperatur im Obstgarten auf — 0,5 Grad gefallen war, wurden die Öfen entzündet; schon kurz danach betrug die Temperatur 0,6 Grad. Während der Zeit zwischen 02 und 05 Uhr blieb sie innerhalb des geschützten Gebietes auf 2,2 Grad, während sie außerhalb um — 3,3 Grad schwankte. Die erzielte Temperaturerhöhung betrug also etwa 5,5 Grad; nur an der Südseite, die nicht so gut mit Öfen besetzt war, blieb der Effekt um 2 Grad zurück.

Auch der Manager der Garret Mercantile Company in Meridian, A. W. Garret, teilte seine bei der Frostbekämpfung im Frühjahr 1910 gemachten Beobachtungen mit.

Schon am Mittag des 14. Aprils schwankte die Temperatur zwischen — 0,5 und — 3,3 Grad. Die Windgeschwindigkeit war ziemlich groß, ging jedoch in der nun folgenden Nacht mehr und mehr zurück. Um 02 Uhr 30 wurde mit dem Anzünden der Öfen begonnen. Die Temperatur blieb vorerst noch ziemlich konstant auf — 3,3 Grad, fiel aber um 04 Uhr plötzlich auf — 5 Grad. Nun wurden alle Öfen in Betrieb genommen und auf höchste Wärmeabgabe eingestellt. Um 05 Uhr wurde außerhalb der beheizten Zone eine Temperatur von — 5,5 Grad abgelesen, im beheizten Obstgarten selbst lag sie zwischen — 1,6 und — 3,3 Grad. Auf der Seite des einfallenden Windes war die Temperatur ungefähr gleich der außerhalb des geschützten Geländes, während sie auf der anderen Seite bedeutend höher lag. Die Messungen in verschiedenen Höhen ergaben bemerkenswerte Unterschiede: so waren die Temperaturen in Bodennähe im Obstgarten selbst fast gleich denen außerhalb, in 1 m Höhe lagen sie dagegen 3—4 Grad höher; und während die Temperatur außen bis auf — 6,6 Grad absank, konnte zwischen den Zweigen der Bäume bis zu 1,1 Grad gemessen werden.

Die Minima in dieser Frostnacht betragen außerhalb des Obstgartens — 7,2 Grad, zwischen den Zweigen — 3,9 Grad; dieses verhältnismäßig tiefe Minimum innerhalb der Plantage selbst ist darauf zurückzuführen, daß die Öfen zu spät angezündet worden waren und nur langsam in Gang kamen. Später sank die Temperatur in Höhe der Blüten nicht unter — 2,2 Grad.

In der folgenden Nacht wurde, allerdings auf einem kleineren Feld, ein weiterer Versuch durchgeführt. Die erhaltenen Werte waren nach Aussage von Garret nicht zufriedenstellend, da die Thermometer eine verschiedene Empfindlichkeit hatten und auch das Gelände zu klein war. Dennoch glaubt Garret eine Erhöhung der Temperatur um 4 Grad mit Bestimmtheit annehmen zu können.

Wie C. C. Teague, Manager der Limonaria Company, mitteilt, gelang es ihm, in der Nacht vom 24./25. Dezember 1911 die Temperatur von  $-5,0$  Grad auf  $1,1$  Grad zu erhöhen. Diesen Effekt von rund 6 Grad erzielte er durch Benützung von je einem Ofen auf  $40 \text{ m}^2$ .

Aus dem Jahre 1911 liegt noch ein weiterer kurzer Versuchsbericht von Bonnet<sup>59)</sup> vor, der besonders deswegen angeführt werden soll, weil er sich nicht auf Obstplantagen, sondern auf Weinberge bezieht.

Von einer fast  $53 \text{ ha}$  großen Weinberganlage wurde eine Fläche von  $1,2 \text{ ha}$  beheizt. Auf je  $125 \text{ m}^2$  brannte ein Ofen. Das Brennmaterial bestand aus Rohöl, dem noch Sägespäne zugesetzt waren. Für die Temperaturablesungen wurden insgesamt nur drei Thermometer benutzt, die  $1 \text{ m}$  über dem Boden angebracht waren; zwei davon befanden sich innerhalb des beheizten Gebietes, das dritte war etwa  $200 \text{ m}$  von der beheizten Fläche entfernt. Wie Bonnet mitteilt, schwankte die Temperatur um 05 Uhr morgens im Weinberg zwischen  $-1,6$  Grad und  $-0,5$  Grad, indessen das äußere Thermometer  $-2,7$  Grad zeigte. Bonnet glaubt, daß das äußere Thermometer durch den Luftzug aus dem beheizten Gebiet etwas beeinflußt war. Den an sich geringen thermischen Effekt führt er vor allem darauf zurück, daß bei der Rebe eben die gut entwickelte Baumkrone, die die Wärme aufzuhalten im Stande sei, fehle. Er kommt aber zu dem Schluß, daß auch die Weinberge mit Erfolg gegen Fröste geschützt werden könnten, es jedoch notwendig sei, meist eine größere Anzahl von Öfen als in dem vorliegenden Falle zu benutzen.

Nach C. Hallenbeck<sup>141)</sup> konnten im Jahre 1920 zwei Farmer ihre Apfelplantage gegen Temperaturen von  $-9,3$  Grad und  $-8,8$  Grad erfolgreich schützen.

Im Jahre 1922 hat Young<sup>416)</sup> einen Versuch durchgeführt, bei dem auf einem  $0,405 \text{ ha}$  großen Stück eines Obstgartens 50 Heizer (1 Ofen auf  $80 \text{ m}^2$ ), von denen jeder etwa 30 Liter Öl faßte, aufgestellt waren. Ein gleichartiger Obstgarten blieb zum Vergleich ungeschützt. Bevor die Öfen brannten, war die Temperatur in beiden Gärten fast die gleiche. Die am anderen Tag abgelesenen Minimumtemperaturen wichen um  $5,6$  Grad voneinander ab.

Young und Cate<sup>423)</sup> haben die Ergebnisse von zahlreichen Heizversuchen im Rogue-Rivertal zusammengefaßt. Daraus geht hervor, daß das Heizen nicht immer gleich wirksam sein kann, der Erfolg vielmehr zunächst von den meteorologischen Bedingungen abhängt. Eigentümlichkeiten des Geländes und der Bodenbeschaffenheit werden als wichtige Faktoren angesehen; die Art der Heizung, bzw. die Zahl der Öfen kann daher nicht rezeptmäßig angegeben werden. Andererseits kann aber der wirkliche Erfolg der Geländeheizung unter der Annahme einer richtigen und sinngemäßen Anwendung nicht geleugnet werden. „Nur bei ganz extrem auftretenden meteorologischen Bedingungen, z. B. überstarker Windgeschwindigkeit, wird man nicht Herr der Lage werden können. Zum Glück kommen aber diese außergewöhnlichen Fälle nur selten vor.“ Jedenfalls wurde auf Grund zahlreicher Versuche festgestellt, daß bei richtiger Anwendung ein Frostschaden noch bei einer Temperatur von  $-7,7$  Grad erfolgreich verhütet werden kann.

Im Auftrag des Wetterbureaus führten E. L. Wells und P. Parker<sup>401)</sup> zwei Heizversuche in Preiselbeerfeldern durch. Als Ofentyp wurde der 10 Liter-Schmalzeimer mit Spinne gewählt. Hiervon wurden 40 Stück über ein Gelände von  $0,2 \text{ ha}$  verteilt (1 Ofen auf  $50 \text{ m}^2$ ). In seinem Mittelpunkt wurde eine Thermometerhütte so aufgestellt, daß ihr Abstand von den Öfen etwa  $4,6 \text{ m}$  betrug; die Höhe über dem Boden ist nicht angegeben. Eine zweite Hütte stand in dem etwa  $90 \text{ m}$  entfernten Vergleichsfeld. Außerdem waren noch ungeschützte Thermometer an verschiedenen Stellen angebracht.

Das erste Mal standen die Heizer auf Dreifüßen, so daß das obere Ende der Heizer  $75 \text{ cm}$  über die Pflanzen ragte. Die Heizleistung der Öfen war durch die Spinnen auf zwei Drittel ihrer maximalen herabgesetzt. Ehe die Heizer entzündet waren, betrug der Unterschied zwischen den strahlungsgeschützten und ungeschützten Thermometern im Heizfeld  $2,8$  Grad; dieser Unterschied ging nach Inbetriebnahme der Öfen auf  $0,8$  Grad zurück, d. h. die Anstrahlung und die gleichzeitig durch den Rauch bedingte Verringerung der Ausstrahlung bewirkte einen Effekt von  $2,0$  Grad. Die Erhöhung der Lufttemperatur über dem Heizfeld, als Differenz der beiden Hüttenwerte bestimmt, ergab  $1,7$  Grad. Nach Ansicht der Versuchsansteller darf man somit den Gesamteffekt der Heizung, zusammengesetzt aus Erhöhung der Lufttemperatur und Verminderung der Ausstrahlung, zu  $3,7$  Grad ansetzen.

In der zweiten Versuchsnacht standen die Öfen in gleicher Höhe mit den Pflanzen. Die Spinnen waren zurückgeschoben. Durch diese maximale Heizleistung wurden aber die Spitzen der Pflanzen versengt.

Im Frühjahr 1927 wurden von Cook<sup>77)</sup> mehrere Versuche durchgeführt, um die Auswirkung des Heizens auf niedrige Gewächse festzustellen. Die Größe des Versuchsfeldes betrug etwas weniger als  $0,4 \text{ ha}$ ; es fiel sanft

gegen Nordosten ab und war mit Erdbeeren bepflanzt, die im vierten Jahre standen. In einem Abstand von je 6 m wurden Ölheizter mit einem Fassungsvermögen von etwa 12 Liter und hohem Schornstein aufgestellt. Die äußerste Reihe der Heizter befand sich etwa  $1\frac{1}{2}$  m innerhalb des äußeren Randes des Versuchsfeldes; es wurde also keine einfassende Heizterreihe aufgestellt. Die Heizter standen auf Dreifüßen, das obere Ende der Öfen überragte die Oberfläche der Pflanzen bei dem ersten Versuch um 55, bei den beiden anderen um 75 cm. Insgesamt waren 96 Öfen aufgestellt (1 Ofen auf etwa  $40\text{ m}^2$ ). Für die Temperaturbestimmung wurden zwei Meßstationen errichtet, die eine im Mittelpunkt der Anlage, die andere etwa 90 m südlich davon außerhalb der beheizten Zone. Jede Station war mit einem geschützten Thermographen und einem geschützten Minimumthermometer ausgerüstet; die Thermometerkörper befanden sich 25 cm über dem Boden. Außerdem waren genau in Höhe der Pflanzen Minimumthermometer ohne Strahlungsschutz angebracht, um den Effekt der Ausstrahlung zu bestimmen. Der Abstand der Thermometer vom nächsten Ofen betrug 4 m.

In der Nacht vom 12./13. April ragten, wie schon gesagt, die oberen Enden der Öfen um 55 cm über die Oberfläche der Vegetation; die Öfen waren nicht auf maximale Wärmeabgabe eingestellt. Der Unterschied in der Lufttemperatur zwischen Heizfeld und Vergleichsfeld betrug 1,9 Grad im Mittel (gebildet aus den Ablesungen zwischen der ersten Ablesung nach dem Anzünden und der letzten vor dem Auslösen), maximal 3,4 Grad. Die entsprechenden Unterschiede an den strahlungsungeschützten Thermometern (Pflanzentemperatur) waren 2,6 bzw. 4,3 Grad. Beim Vergleich der geschützten Thermometer mit den ungeschützten, beide im Heizfeld, erhielt man vor Inbetriebnahme der Heizter einen Unterschied von 2,2 Grad. Während des Heizens ging die Differenz infolge der Absorption von Strahlen auf 2,1 Grad zurück. Den größten tatsächlich beobachteten Temperaturanstieg auf der „Pflanzenoberfläche“, beurteilt nach den Ablesungen an strahlungsungeschützten Thermometern, gibt Cook mit 4,6 Grad an.

Während des Versuches vom 19./20. überragten die Öfen die Pflanzen um 75 cm; von etwa 01 Uhr 45 ab brannten sie mit Höchstleistung; es herrschte zeitweise Wind von 2—3 m/sec. Der Unterschied zwischen den Lufttemperaturen betrug dieses Mal im Mittel 2,8 Grad, maximal 5,0 Grad, der Unterschied zwischen den Pflanzentemperaturen 4,6 bzw. 6,7 Grad.

In der folgenden Nacht brannten die Öfen mäßig, der Wind hatte sich noch nicht gelegt. Die Differenz der Lufttemperaturen betrug 1,7 Grad bzw. 2,8 Grad, die der Pflanzentemperaturen 3,0 bzw. 4,5 Grad.

Im selben Jahr führte auch die Laurel Orchard Company of Franklin County einen Heizversuch auf einem Obstgarten im südlichen Oregon durch. Die Plantage war über 80 ha groß und zum Teil auf sehr welligem Gelände gelegen. In der betreffenden Frostnacht wurde jedoch nicht das ganze Gebiet beheizt, da die Anzahl der Heizter hierfür noch nicht ausreichte und es sich ja auch nur um einen Versuch handelte. Als Ofentyp kam der auf Seite 154 beschriebene Koksofen zur Verwendung. In dem kältesten Teil des Geländes kam jeweils ein Ofen auf  $58\text{ m}^2$  zu stehen, in den höher gelegenen Teilen war die Dichte nur halb so groß, in den mittleren Teilen entfiel auf  $78\text{ m}^2$  ein Ofen. Die Bäume standen etwa 11 m weit auseinander.

Als die Öfen um 21 Uhr 30 teilweise angezündet wurden, war die Temperatur auf  $-1,1$  Grad gefallen. Um 01 Uhr betrug sie im beheizten Teil noch  $-1,1$  Grad, außerhalb desselben  $-2,7$  Grad. Nun wurden die übrigen Heizter entzündet, und die Temperatur stieg rasch auf 0 Grad, wo sie lange blieb. Erst bei Sonnenaufgang sank sie in dem Gebiet, in dem die Öfen am dichtesten gestellt waren, langsam auf  $-0,8$  Grad, auf dem ungeschützten Feld betrug sie zur gleichen Zeit  $-6,1$  Grad. In dem mittleren Teil der Plantage, in dem ein Ofen auf  $78\text{ m}^2$  kam, fiel die Temperatur im beheizten Gebiet auf  $-1,6$  Grad, außerhalb auf  $-5,0$  Grad. In den höchstgelegenen Teilen sank schließlich die Temperatur bis auf  $-1,9$  Grad im beheizten, auf  $-4,4$  Grad im unbeheizten Gebiet. Diesen Temperaturen entsprechen somit Effekte von 5,5 Grad, 3,4 Grad bzw. 2,5 Grad; allerdings kann zu diesen Werten weiter keine Stellung genommen werden, da weder die Aufstellungshöhe der Thermometer und der Abstand von den Öfen angegeben ist, noch sich eine Bemerkung darüber findet, ob dieselben strahlungsgeschützt waren oder nicht.

Ein weiterer Versuch zum Schutz niedriger Gewächse kam im westlichen Washington zur Durchführung, wo über ein etwa  $0,2$  ha großes Preiselbeerfeld 40 Zehnliter-Schmalzeimeröfen verteilt wurden (1 Ofen auf  $50\text{ m}^2$ ). Um zu vermeiden, daß das Gesträuch Feuer fing, wurden die Öfen auf eiserne Dreifüße gestellt; auf diese Weise kamen die Heizter etwa 75 cm über dem Erdboden zu stehen. Die Temperaturerhöhung auf der Pflanzenoberfläche betrug in Vegetationshöhe durchschnittlich 2,8 Grad, im Maximum 3,7 Grad. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Öfen mit der Spinne gebraucht wurden, daß sie also nur einen Teil der Wärme abgaben, die sie für gewöhnlich liefern.

Bei den amerikanischen Versuchen wurde von Anfang an mehr Wert auf die praktische Anwendung und Zuverlässigkeit der Methoden gelegt als auf die wissenschaftliche Untersuchung der kleinklimatischen Verhält-

nisse. So fehlen häufig Angaben über Beschaffenheit des Geländes und die verschiedene Frostgefährdung der einzelnen Lagen. Damit ist eine gewisse Unsicherheit bei der Beziehung der über dem Heizfeld gewonnenen Werte zu denen über dem unbeeinflussten Vergleichsfeld verbunden. Auch läßt sich zu den mitgeteilten Effekten oft nicht Stellung nehmen, da Mitteilungen über Aufstellungshöhe und etwaigen Strahlungsschutz nur spärlich vorhanden sind.

## 2. Österreichische und deutsche Versuche (ohne Trier).

J. Löschnig<sup>223</sup>) hat schon im Frühjahr 1914 nach amerikanischem Vorbild ein Feld im Ausmaß von 50×50 m mit Ölöfen geheizt. Das Versuchsfeld lag eben zwischen anderen Weinbergen. Die Anordnung der Feuerstellen, Thermometer usw. wurde schon weiter oben eingehend besprochen (siehe Röchern, Ventilieren). Die Öfen, 50 an der Zahl, standen jeweils 8 m auseinander. Jeder Ofen enthielt 5 Liter Rohöl. Die Thermometer trugen vermutlich keinen Strahlungsschutz, wenigstens macht Löschnig darüber keine Aussagen. Mit dem Heizen wurde genau um Mitternacht begonnen, die gesamte Heizdauer betrug 140 Minuten.

Zur Beurteilung des Effektes seien einige Mittelwerte, die aus den Angaben von Löschnig berechnet wurden, hier wiedergegeben.

Tabelle 34. Mitteltemperaturen über dem Versuchsfeld

	Zeit	Im Heizfeld			Außerhalb 50 cm	Differenz innen/außen 50 cm
		50 cm	150 cm	Differenz		
vor der Heizung	23 <sup>00</sup>	3,2	4,9	1,7	4,0	— 0,8
	23 <sup>30</sup>	3,0	3,4	0,4	3,2	— 0,2
während der Heizung	01 <sup>00</sup>	4,2	5,4	1,2	2,0	2,2
	01 <sup>45</sup>	2,1	3,5	1,4	1,5	0,6

Nach diesen Werten betrug die Temperaturdifferenz zwischen beheiztem Feld und außen in 50 cm Höhe bis zu 2,2 Grad. Da die Thermometer in gleicher Weise wie bei unseren Versuchen an den von den Öfen entferntesten Stellen angebracht waren, so bedeuten diese Angaben den Durchschnitt der geringsten Erwärmung des Feldes. Des weiteren ist den oben angeführten Zahlen zu entnehmen, daß die Temperatur über dem Versuchsfeld in 1,5 m Höhe im Mittel 1,1 Grad über der in 50 cm Höhe lag.

Daneben wurde noch ein weiterer Versuch durchgeführt, bei dem insgesamt 16 Thermometer nach vier Richtungen je 1 m voneinander entfernt, um einen Ölofen aufgestellt waren. Die Höhe der Thermometer über dem Boden betrug gleichfalls 50 cm. Die Temperaturerhöhung erreichte nach Löschnig  $\frac{3}{4}$  Grad. Er bemerkt dabei ganz richtig, daß die Ergebnisse einer solchen Einzelfeuerung kein vollständiges Bild der Wirkung geben, „weil die Feuerungsstelle von den kalten Luftmassen außerhalb derselben stark beeinflusst wird. Ferner können schwache Luftströmungen, die zwischen den Thermometerständen hindurchfließen, die Ablesungen der Thermometer zum Nachteile der Feuerung beeinflussen“.

Von der Öffentlichen Wetterdienststelle in Hamburg<sup>294</sup>) liegen nur allgemeine Zusammenfassungen von Versuchsergebnissen vor. Beim Verbrennen von Briketts in Haufen von je 4 Stück bei einem Abstand von 2 m konnten die Temperaturen bis zu 3 Grad höher als außerhalb der beheizten Fläche gehalten werden. Die Verwendung von Brikettöfen steigerte den Effekt, so daß das beheizte Feld bis zu 5 Grad wärmer war als das unbeheizte. Auch hierbei war ein Ofenabstand von gleichfalls 2 m gewählt worden; allerdings waren die verwendeten Öfen bedeutend kleiner als die gewöhnlichen.

Im Frühjahr 1934 wurde ein quadratisches Feld von 10 m Seitenlänge, das schon Anfang März mit Frühkartoffeln bepflanzt war, mit gutem Erfolg beheizt. Dieser Versuch sollte zeigen, ob es möglich wäre, auch im freien Land schon verhältnismäßig früh erntereife Frühkartoffeln zu erhalten. Zwischen je drei Kartoffelreihen wie auch an den beiden parallelen Außenseiten wurden je 6 Öfen gesetzt, von denen jeder vier Briketts enthielt. Temperaturangaben sind in dem Bericht jedoch nicht angeführt.

Das zusammenfassende Urteil der Öffentlichen Wetterdienststelle in Hamburg über die Heizmethode geht dahin, daß die Brikettheizung in all den Fällen zu empfehlen ist, in denen es darauf ankommt, besonders wertvolle, nicht zu ausgedehnte Kulturen sicher zu schützen.

Anfang Juni 1932 haben H. Landsberg und H. Müller<sup>213</sup>) im Auftrag des Versuchsringes Rheingauer Weinbaubetriebe in der Gemarkung Geisenheim einen Versuch mit Heizöfen durchgeführt, die das Institut für Klimaforschung in Trier zur Verfügung stellte. Das untere Drittel des nach Süden exponierten Versuchs-

geländes war nur wenig geneigt, die oberen beiden Drittel fielen dagegen sehr steil ab. In der klaren Versuchsnacht kamen die durch die Strahlung bedingten örtlichen Eigentümlichkeiten zur vollen Auswirkung.

Zur Temperaturmessung wurden 46 Extremthermometer nach Six mit Strahlungsschutz benutzt; sie gaben also annähernd Lufttemperatur an. Ihre Höhe über der Bodenoberfläche betrug 30 cm. Ferner waren 1 Thermograph und 3 kleine Windfahnen im Gelände aufgestellt; die letzteren befanden sich in 1,2 m Höhe. Außerdem wurden noch Nebelpatronen zur Beobachtung der Luftströmungen herangezogen. Der Versuch dauerte 3 Stunden, von 20 Uhr 30 bis 23 Uhr 30; während dieser Zeit wurden die Thermometer jede halbe Stunde abgelesen.

Nur der untere Teil des Versuchsfeldes, der der Kaltluft am stärksten ausgesetzt war, wurde beheizt. Die Größe der Heizfläche betrug etwa 0,3 ha. Zur Heizung wurden Union-Briketts verwendet, die teils in Öfen (50 Stück des Systems Thielmann) (Seite 155), teils offen ausgelegt verbrannt wurden. Der Abstand der einzelnen Öfen voneinander betrug an der Westseite, von wo der stärkste Zufluß der Kaltluft zu erwarten war, jeweils 4 m, nach Osten zu erweiterte er sich stetig bis zu 7 m. Die offenen Brennstellen waren durchweg 3 m voneinander entfernt, die Anordnung der Briketts war die gleiche wie bei unserem Versuch in Veldenz (Seite 185). An Brennmaterial wurden insgesamt 10 Zentner Briketts und 60 kg Rohnaphtalin verbraucht.

Auf Grund der Minimumablesungen von drei Strahlungsnächten im Mai und Juni desselben Jahres, in denen die Weinberge nicht beheizt worden waren, wurde für das Versuchsfeld der mittlere Isothermenverlauf in windstillen Strahlungsnächten festgelegt. Mit diesen „Normalisothermen“ wurden dann die Isothermen, wie sie beim Heizen des Gebietes erhalten wurden, verglichen und so der Effekt beurteilt.

„Ohne Berücksichtigung der Strahlungsbedingungen im Versuchsgelände ergab sich, daß die beheizten Weinberge ziemlich unabhängig von der Höhenlage eine Übertemperatur von 1,3 Grad gegenüber gleichartigen, unbeheizten aufwiesen“. Den geringen Effekt erklärt Landsberg damit, daß nach einer gewissen Zeit alle Lagen in ihrer Ausstrahlung durch die Rauchentwicklung beeinflusst waren, so daß keine der Stationen für eine sichere Reduktion der Werte auf einen normalen Wert zur Verfügung stand. Diese Erklärung von Landsberg ist aus dem Grunde nicht zugänglich, da er ja bei dem Versuch strahlungsgeschützte Thermometer benutzte; selbst eine dichte Rauchdecke hätte also bei dem vorhandenen Strahlungsschutz keine Änderung des Thermometerstandes bewirken können.

Im Gegensatz zu dem eben besprochenen Versuch sollte im Mai 1933 versucht werden, die heranströmende Kaltluft abzuriegeln. Als Versuchsfeld wurde ein als frostgefährdet bekanntes Gelände mit einer kleinen Mulde ausgewählt. Die Feuerstellen standen dicht zusammengedrängt in drei parallelen Reihen; um möglichst jegliches Eindringen der Kaltluft zu verhindern und eine gute Durchmischung der Kaltluft mit der Warmluft zu erzwingen, waren die Heizstellen alternierend angeordnet. Der Abstand der Öfen (System Thielmann) betrug 2 m. Dazwischen war aber noch jeweils eine Heizstelle ohne Öfen aufgebaut. Das Heizmaterial bestand wiederum aus Unionbriketts.

Das Versuchsfeld enthielt 43 strahlungsgeschützte Sixthermometer in 30 cm Höhe; sie wurden alle halbe Stunden abgelesen. Außerhalb stand noch oberhalb und unterhalb des Feuerriegels je 1 Thermograph. Zur Windmessung dienten 3 Windfahnen in 1,2 m Höhe und 1 Anemotachometer.

Auf Grund der nach der oben besprochenen Methode gezeichneten Isanomalienkarte war zu erkennen, daß sich der Erfolg des Heizens noch ein beträchtliches Stück hangabwärts in Richtung des Kaltluftflusses bemerkbar machte. Über die Größe des Effektes machen jedoch Landsberg und Müller keine Aussagen.

Ihrem Versuch, Anhaltspunkte über Blattertemperaturen in Frostnächten zu gewinnen, indem Laub direkt auf ein Widerstandsthermometer gelegt wurde, kann keine besondere Bedeutung beigemessen werden.

Im Mai 1935 haben Leutner, Schöber und Hacklaender<sup>218)</sup> ein 0,8 ha großes Stück der Städtischen Rebanlagen Wiener Neustadt mit 99 Heizdosen der Österreichischen Pflanzenschutz A.G. beheizt. An den Rändern des 80×100 m großen Versuchsfeldes wurden die Dosen im Abstand von je 6—7 m aufgestellt, während der Abstand im Inneren des Heizfeldes jeweils etwa 10—12 m betrug. Die Thermometer, vier Stück im Heizfeld und vier außerhalb, waren ungeschützt und etwa 10 cm über dem Boden angebracht. Außerdem war noch in der Mitte des Feldes ein Mast aufgestellt, an dem ein Maximumthermometer bis 8 m hochgezogen werden konnte. Die Heizdosen waren zylinderförmig; ihr Fassungsvermögen betrug 10 Liter. Verbrannt wurde Shell-Industrial-Heizöl.

In beiden Versuchsnächten herrschte ständig Ostwind, was für den Effekt der Geländeheizung sehr ungünstig war. In der zweiten Versuchsnacht wurde ab 03 Uhr die Heizung wegen des zunehmenden Windes durch Abbrennen von Rebenabfällen an der Luvseite unterstützt.

Die Differenz zwischen geschütztem und ungeschütztem Gebiet betrug in 10 cm Höhe in beiden Nächten im Mittel 1,1 Grad (siehe Tabelle 35). Trotz dieses an sich verhältnismäßig kleinen Effektes war der Erfolg praktisch sehr zufriedenstellend, da innerhalb des Versuchsfeldes nicht der geringste Schaden festgestellt werden konnte, während dicht daneben etwa 25 % Frostschaden und in der Umgebung bis zu 60 % eingetreten waren.

Tabelle 35. Heizversuch Wiener Neustadt

Zeit	Temperaturen		Differenz	
	geschützt	ungeschützt		
13./14. Mai 1935				
00 <sup>00</sup>	4,9	5,0	— 0,1	Heizung noch nicht i. Betrieb
01 <sup>00</sup>	4,9	5,0	— 0,1	
02 <sup>00</sup>	3,6	3,6	0,0	
03 <sup>00</sup>	3,9	2,8	1,1	Heizung in Betrieb
03 <sup>30</sup>	3,4	2,2	1,2	
04 <sup>15</sup>	3,2	1,7	1,5	
04 <sup>30</sup>	1,3	0,8	0,5	
04 <sup>40</sup>	2,4	1,1	1,3	
14./15. Mai 1935				
00 <sup>40</sup>	0,3	— 0,2	0,5	Heizung noch nicht i. Betrieb
01 <sup>15</sup>	— 0,4	— 1,5	1,1	Heizung in Betrieb
02 <sup>00</sup>	— 0,4	— 1,5	1,1	
03 <sup>00</sup>	— 0,4	— 1,1	0,7	
04 <sup>00</sup>	— 1,0	— 2,5	1,5	

Besonders in den letzten Jahren haben sich in Deutschland die Frostbekämpfungsversuche durch Heizen gehäuft, was wohl zweifelsohne auf die durch die Agrarmeteorologische Forschungsstelle in Trier gegebene Anregung zurückzuführen ist.

So hat im Mai 1935 die Württembergische Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau in Weinsberg zwei Versuche durchgeführt. In der Nacht vom 1./2. Mai wurden 100 Brikettöfen in einem Abstand von 6—7 m in einem Weinberg in Betrieb genommen. Es zeigte sich zwar später, daß die gewählte Ofendichte zu gering war; dennoch hatten die noch in der Wolle befindlichen Augen der Reben im beheizten Feld erheblich weniger gelitten als die des unbeheizten Gebietes gleicher Lage.

Ferner wurden in der Nacht vom 13./14. Mai in demselben Weinberg 0,3 ha mit 100 Öfen, 0,34 ha mit 130 Brikettöfen und 0,18 ha mit frei ausgelegten Briketts, in einem anderen Weinberg eine Fläche von 0,5 ha mit 170 Brikettöfen beheizt. Zur Temperaturmessung dienten insgesamt 38 Thermometer, die mittels Schnüren an Pfählen aufgehängt waren. Obwohl die Temperatur in den nicht-beheizten Teilen auf — 2,5, bzw. — 2,0 Grad sank, entstand jedoch auch hier so gut wie kein Schaden.

Jahn<sup>174)</sup> berichtet über einen erfolgreichen Heizversuch mit Brikettöfen in der Nacht vom 12./13. Mai 1935 in Altenkirchen. Nach den üblichen, von der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle in Trier empfohlenen Vorbereitungen wurden die Öfen abends in Windrichtung unmittelbar unter die Bäume gestellt. Gegen 23 Uhr sank das Thermometer unter 0 Grad, worauf die Öfen angesteckt wurden. Um 03 Uhr 30 zeigte das Außenthermometer bei schwacher Luftbewegung — 4 Grad. Die Apfelblüten wurden durch die Maßnahme zum größten Teil gerettet, während in Nachbarkulturen starke Schäden beobachtet werden konnten.

Im Frühjahr 1936, kamen unter Zahn (nach brieflicher Mitteilung) auch in Franken einige Versuche zur Durchführung. In der Gemeinde Thüngersheim, die besonders stark unter Frost zu leiden hat, wurden etwa 2 ha geschützt; außerdem 0,16 ha der Weinberge der Hofkellerei in Randersacker. Daneben liefen noch Versuche, die vom Juliuspital-Weingut, vom Bürgerspital-Weingut und von der Staatlichen Lehranstalt in Veitshöchheim durchgeführt wurden. Vergleichbare Resultate ergaben auch diese Versuche wegen fehlender oder ungenügender Vermessung nicht.

### 3. Die Heizversuche des Reichsausschusses für Frostabwehr und der Forschungsstelle Trier.

#### a) Zur Versuchsmethodik.

Die Inangriffnahme der Frostschadenverhütungsversuche mit Heizung erforderte in erster Linie die sorgfältige Auswahl eines geeigneten Versuchsgeländes. Zuerst kamen aus Gründen der Ersparnis, aus Mangel an geeigneten Geräten und geschultem Personal und wegen des Fehlens jeglicher Erfahrung nur kleine Flächen in Frage. So wurden die ersten Versuche auf ebenen Flächen von 100—200 m<sup>2</sup> Größe durchgeführt.

Es zeigte sich jedoch bald, daß solche Kleinversuche höchstens zur Beantwortung gewisser technischer Einzelfragen wie zum Vergleich verschiedener Ofentypen herangezogen werden können. Zur Beurteilung der Heizmethode im ganzen sind sie aber völlig unzureichend. Durch die dichte Verteilung von Heizkörpern auf kleiner Fläche wird nämlich eine heftige Aufwärtsbewegung der erzeugten Heißluft hervorgerufen, die besonders in den Randzonen des Heizfeldes ein fortwährendes Ansaugen von Kaltluft aus dem benachbarten Gelände hervorruft

und damit den Nutzeffekt schmälert. So gingen wir denn sehr bald zu Großversuchen über, die ja auch für die Praxis von entscheidender Bedeutung sind.

Bei der Verlegung der Versuche aus der Ebene in hängiges Gelände trat eine Reihe neuer Gesichtspunkte auf, auf deren Berücksichtigung wir später noch wiederholt zu sprechen kommen.

Zur Einrichtung eines Großversuches gehört zunächst die genaue Vermessung des Versuchsgeländes. Hierzu wird nach erfolgter Begehung des Geländes eine bestimmte Fläche auf dem Meßtischblatt umrahmt und auf Grund dieser Festlegung das eigentliche Heizfeld auf dem Boden abgesteckt. Nachdem dann die Aufstellung der Meßgeräte gemäß den örtlichen Gegebenheiten und der Eigentümlichkeit der zu prüfenden Methode bestimmt ist, werden die Aufstellungspunkte der Meßgeräte und der Heizkörper eingemessen und kartenmäßig festgelegt. Bei hängigem Gelände muß mit Hilfe eines mehr oder weniger dichten Netzes von Meßpflocken eine stufenweise Höhenbestimmung vorgenommen werden, auf Grund deren sich dann Höhenlinien (Isohypsen) zeichnen lassen. Besonders mühsam ist die Bestimmung und kartenmäßige Eintragung von kleinen Einsenkungen und Erhöhungen auf sonst ebenem Gelände. Diese ist aber wichtig, da die kleinen Höhenunterschiede bei Temperaturmessungen in Bodennähe von ausschlaggebender Bedeutung sein können.

Die Vermessung darf sich nicht nur auf das eigentliche Heizfeld erstrecken, sondern muß auch die Umgebung weitgehend erfassen. Jedenfalls muß das einbezogene Gebiet ohne Heizkörper so groß sein, daß sich einerseits die mikroklimatischen Besonderheiten der Umgebung, andererseits die Wärmewirkungen des Heizfeldes auf die Außenzone deutlich erkennen lassen.

Bei der Verteilung der Heizkörper im Gelände ist der Eigentümlichkeit der zu untersuchenden Methode Rechnung zu tragen. Im Anfang wurde bei kleinen Flächen eine verhältnismäßig enge Aufstellung gewählt, die jedoch mehr über die Handhabung der Verfahren als über ihre Bewährung in der Praxis der Frostschadenverhütung Aufschluß gab. Wegen der bereits erwähnten Mängel dieser Aufstellungsart gingen wir bald mit der Vergrößerung der Versuchsfläche zur Auflockerung der Aufstellung über. Auf Grund der amerikanischen Erfahrungen, die uns auch bei der Dimensionierung der Öfen Anhaltspunkte gaben, wählten wir meist Entfernungen von 5—7 m zwischen den einzelnen Heizstellen. Dies entspricht einer Fläche von 25 bis 49 m<sup>2</sup> je Ofen. Nach zahlreichen Versuchen ergab sich schließlich, daß im Normalfall mit einer Beschickung in 7 m Abstand eine genügend starke Heizwirkung erzielt werden kann. Da die von uns ausgebildeten Brikettöfen rund 10 000 kcal/std hergeben, entfällt bei dieser Aufstellungsdichte auf den Quadratmeter eine Wärmeintensität von nahezu 200 kcal/std.

Das Errichten der Feuerstellen erfolgte teils reihenweise, teils schachbrettartig gestaffelt. Es hat sich aber weder in ebenem noch in hängigem Gelände ein wesentlicher Unterschied in der Wirkung gezeigt.

Zur genauen Erfassung der Heizwirkung bei den verschiedenen Verfahren wurden horizontal ausgelegte Minimumthermometer aus Glas mit Alkoholfüllung verwendet. Dabei gelangten ungeschützte, geschützte und geschwärzte Thermometer zur Anwendung. Die geschwärzten Thermometer, deren gabelförmiges Gefäß mit einer Schwärze aus Rebschwarz und Bernsteinlack nach einem Rezept von Albrecht<sup>8)</sup>, welche sich als recht witterungsbeständig erwies, überzogen war, gaben infolge ihrer starken Ausstrahlung während der Nacht die niedrigsten Temperaturwerte an, die wohl kaum von einem Pflanzenteil erreicht werden dürften. Die normalen ungeschützten Thermometer, die ebenfalls infolge der Ausstrahlung Temperaturen unterhalb der Lufttemperatur anzeigten, werden in ihrem Verhalten wohl eher mit den Pflanzenorganen zu vergleichen sein. Die geschützten Thermometer, deren Strahlungsschutz in einem vernickelten und polierten Metallschirm über dem Alkoholgefäß bestand, der von der Außenwand des Gefäßes etwa 1 cm entfernt angebracht war, dienten schließlich zur Messung der Lufttemperatur. Sollte die Lufttemperatur in der Nähe einer Heizstelle gemessen werden, so wurde der kreisförmige Schirm nach der Seite der Heizstelle hin umgebogen, oder aber er wurde durch eine vernickelte Röhre ersetzt, die weit genug und mit Löchern versehen war, um der Luft genügend Bewegungsfreiheit bis zum Thermometerkörper zu gestatten.

Bei den anfänglichen Kleinversuchen wurden an jeder Meßstelle mehrere Thermometer in verschiedenen Höhen angebracht. Als immer wiederkehrende Höhenstufen wurden Abstände von 5, 10, 20, 50, 100 und 200 cm vom Boden gewählt. Diese vertikal gestaffelten Thermometeraufstellungen gestatteten einen Einblick in die Luftversetzungen über dem Versuchsfeld. Vor allem konnte die Höhenerstreckung der Wärmewirkung und die Intensität der Ansaugung von Kaltluft aus dem Nachbargelände mit Hilfe dieser Meßanordnung bis zu einem gewissen Grade erfaßt werden. Bei den späteren Großversuchen mußten wir uns auf einige wenige Meßstellen mit gestaffelter Anordnung beschränken, deren Standorte nach Maßgabe der vorherigen Erfahrungen vorteilhaft ausgewählt wurden. Für die große Zahl der übrigen Meßstellen legten wir jedoch eine einheitliche Höhe für die Anbringung der Thermometer fest. Je nach Art der zu schützenden Kulturen wurde beispielsweise für den Weinbau eine Normalhöhe von 50 cm, für den Obstbau eine solche von 2 m und für niedrige Kulturen wie Erdbeeren ein Abstand von 5 cm über dem Boden gewählt.

Bei der Verteilung der Thermometer im Versuchsgelände mußten nicht nur für die eigentliche Heizfläche Meßstellen vorgesehen werden, sondern auch in weitgehendem Maße für die unbeheizte Zone.

In der Heizfläche selbst wurden die Thermometer stets so angeordnet, daß sie nur an solchen Stellen Aufstellung fanden, an denen die geringste Wärmewirkung zu erwarten war. Solche Stellen sind aber die Punkte, die innerhalb des Ofensystems am weitesten von den Heizstellen entfernt liegen. Sie werden bestimmt durch den jeweiligen Schnitt der beiden Diagonalen in einem durch vier Öfen gebildeten Quadrat. Eine solch genaue Angabe bezüglich der Temperaturmeßstellen wird von den meisten Versuchsanstaltern nicht gemacht, weshalb Vergleiche der Effekte oft nicht möglich sind. Im zentralen Teil des Heizfeldes genügen wenige Thermometer, während in den Randzonen eine dichtere Aufstellung geboten ist, um den gegensätzlichen Einfluß von Heizwirkung und Abkühlung von außen her genügend genau untersuchen zu können.

Die Aufstellung der Thermometer in der Außenzone richtet sich nach den orographischen Verhältnissen. In einer großen Ebene genügt im allgemeinen die Anbringung von 1—2 Thermometern auf jeder Seite des Heizfeldes, die vom Rande der Heizzone 10—20 m entfernt sind. Auf der Luv- und der Leeseite werden zweckmäßig noch einige Thermometer in größeren Abständen aufgestellt, damit man den Wärmeverlust der Heizfläche und den Wärmegewinn der Außenzone durch die Einwirkung des Windes beurteilen kann.

In hängigem Gelände muß die Aufstellung der Thermometer in der Außenzone mit besonderer Sorgfalt durchgeführt werden. In einem Tal ist die Aufstellung in den unteren Hanglagen dichter vorzusehen als in den oberen. Auf der Talsohle und dem gegenüberliegenden Hang sind längere Thermometerreihen aufzustellen. Besonders aber sind an den Stellen, wo Kälteeinbrüche zu erwarten sind, möglichst Thermometerstaffeln zu errichten. Auf diese Weise wird nicht nur der mikroklimatische Einfluß der näheren und weiteren Umgebung des Versuchsfeldes erfaßt, sondern es wird auch die Grundlage zur Beurteilung der Heizwirkung gegeben. Wenn nicht durch Windeinfluß starke Verlagerungen eintreten, läßt sich in vielen Fällen die Heizwirkung auf eine Temperaturerhöhung in der Weise zurückführen, daß die außerhalb der eigentlichen Heizzone in gleicher Weise gewonnenen Temperaturwerte gleich 0 gesetzt werden.

Wesentlich für exakte Temperaturvergleiche ist auch eine genaue Einhaltung bestimmter Zeitintervalle sowie die Gleichzeitigkeit der Ablesungen. Um diese Forderung zu erfüllen, geschah die Ablesung jedesmal auf ein verabredetes Zeichen durch Signalpfeife oder Schuß. Den einzelnen Ablesern wurden nur soviel Thermometer zugeteilt, als sie innerhalb 2—3 Minuten ablesen und protokollieren konnten.

Die Temperaturen an verschiedenen Stellen des Versuchsgeländes wurden nicht nur durch Augenbeobachtungen bestimmt, sondern gelegentlich auch durch Registriergeräte aufgezeichnet. Der Trierer Forschungsstelle stehen zu diesem Zweck zahlreiche Thermohygrographen zur Verfügung, deren Registriertrommel für die Versuchsnächte auf einen Umlauf von 24 Stunden umgestellt werden kann. Auch die Luftfeuchte wurde von diesen Geräten aufgezeichnet. Sie wurde aber stets durch Messungen mit Aßmann'schen Aspirationspsychrometern kontrolliert.

Neben der Lufttemperatur wurde gelegentlich auch die Wassertemperatur des in dem Versuchstale fließenden Baches oder Stromes messend verfolgt. Vor allem aber waren fast immer die Bestimmung von Windrichtung und -geschwindigkeit an verschiedenen Geländestellen sowie Ausstrahlungsmessungen im Versuchsprogramm vorgesehen. Für die Strahlungsmessung fanden Geräte Anwendung, die einerseits Momentanwerte der Ausstrahlung zu ermitteln gestatten, andererseits aber Summenwerte über längere Zeiten geben. Momentanwerte wurden mit dem Pyrgeometer nach Ångström gemessen, das auf einer elektrischen Kompensationsmethode beruht. Im allgemeinen genügte aber die Bestimmung von Summenwerten, die mit Hilfe des Tulipans von Ångström, einem auf Kondensation bei Abkühlung durch Ausstrahlung beruhenden Meßgerät, gewonnen wurden. Bei starker Taubildung sind die Werte des Tulipans allerdings nicht mehr einwandfrei.

Bei stärkerem Wind konnten Schalenkreuzanemometer Anwendung finden. In schwacher Luftbewegung mußten wir uns aber mit anderen Methoden zur Bestimmung von Windrichtung und -geschwindigkeit helfen. Am einfachsten gestalteten sich derartige Bestimmungen mit Luftrübungsverfahren. Dabei wurde mit Hilfe verschiedener Präparate entweder eine kleine Wolke erzeugt, die vom Winde mitgenommen wurde, oder man entwickelte eine ständige Rauchfahne, in der die Bewegung markanter Teile verfolgt werden konnte. Die Bestimmung der Windgeschwindigkeit geschah dann auf die Weise, daß ein Mann am Rauchspender eine Stoppuhr in Gang setzte und mit dieser, ein Rauchteilchen verfolgend, in gewisser Entfernung vom Rauch parallel zur Fahne bis zu einer Marke in 5 oder 10 m Abstand schritt und dort die Uhr stoppte. Aus der festen Entfernung zwischen Rauchspender und Marke und der abgelesenen Zeit ließ sich dann die Windgeschwindigkeit berechnen.

Die Ablesungen an den Thermometern wie an den anderen Meßgeräten erforderten eine große Sorgfalt und äußerste Genauigkeit, da unter Umständen schon aus kleinen Änderungen und Abweichungen gegenüber benachbarten Meßstellen wichtige Schlüsse gezogen werden konnten. Infolgedessen mußte die Auswahl der Beob-

achter mit Sorgfalt getroffen werden. Im allgemeinen standen uns Schüler der Weinbaulehranstalten zur Verfügung. Diese reichten aber nicht aus, so daß wir auf Hilfskräfte aus den Reihen der Winzer, der SA, des RLB, der Feuerwehr u. a. zurückgreifen mußten. Diese Beobachter und Helfer wurden jeweils schon vor dem Versuche über ihre Funktionen, besonders über die Art der Bedienung und Ablesung der Instrumente sowie über die Führung des Protokolls unterrichtet, damit sie in der Versuchsnacht sofort ohne vorherige Anweisung zur Verfügung standen.

War in den Mittagsstunden durch den Rundfunk eine Frostwarnung herausgegeben worden und konnte auf Grund der örtlichen Beobachtungen und Erfahrungen mit einer Frostnacht gerechnet werden, so wurden die Beobachter fernmündlich benachrichtigt und auf das Versuchsfeld gebracht. Nach letzter Anweisung der Beobachter, die mit Protokollheft, Bleistift und Taschenlampe ausgerüstet wurden, begann die eigentliche Messung. Die Ablesungen erfolgten in der Regel alle Viertelstunde auf ein verabredetes Signal. Zuerst wurden 2—3 Blindablesungen gemacht, d. h. Ablesungen vor dem Anzünden der Heizkörper. Diese Ablesungen sollten zur Erkennung der ohne die Einwirkung der Heizung vorhandenen Temperaturunterschiede im Gelände dienen. Dann wurde mit der Heizung begonnen und die Ablesungen erfolgten in gleichen Zeitabständen während der Dauer der Heizung. Meist wurden auch noch nach Beendigung der Heizung 1 oder 2 Blindablesungen vorgenommen.

Die beschriebenen Protokollhefte, die nicht nur die eigentlichen Ablesungen an den Thermometern und den anderen Meßinstrumenten enthielten, sondern auch allgemeine Angaben über das Verhalten der Heizkörper in Bezug auf Anbrennen, Hitzeentwicklung, Rauchbildung, Verlöschen usw. und über die Gesamtwitterung, namentlich plötzliche Änderungen in Bezug auf Wind und Bewölkung, wurden schließlich eingesammelt und dienten als Grundlage zur Auswertung mit Hilfe von Tabellen, Karten und Kurvendarstellungen.

Ein Großversuch wickelte sich demnach in folgender Form ab:

Zunächst wurde die Versuchsfrage gestellt. Entweder sollte z. B. ein neuer Ofentyp ausprobiert und mit einem bereits bewährten System verglichen werden, oder es sollte die Wirkungsweise eines anderen Heizmaterials bestimmt werden. Demgemäß wurde die Anzahl der zu verwendenden Heizkörper und die Dichte ihrer Aufstellung festgelegt. Während Heizkörper und Heizmaterial anrollten, wurde eine geeignete Geländewahl getroffen und mit der Vermessung und Kartierung begonnen. Gleichzeitig fand eine Nacheichung der Thermometer und Überprüfung der anderen Meßgeräte statt. Auch wurden Vordrucke für die Protokolle angefertigt. Nachdem die nötige Anzahl von Beobachtern gewonnen und unterwiesen war, konnte dann nach Aufstellung der Heizgeräte und Anbringung der Thermometer der eigentliche Versuch unternommen werden.

#### *b) Die Heizversuche mit Ölöfen.*

Die ersten Versuche zur Frostschadenverhütung mit Ölöfen wurden auf den „Auswendigen Äckern“ bei Oppenheim unternommen. Das Versuchsfeld lag etwa 200 m vom Rhein entfernt und war fast vollkommen ebenes Wiesengelände.

Fürs erste wurden 100 Ölöfen (System Maurer) in gleichen Abständen so aufgestellt, daß auf je 50 m<sup>2</sup> ein Heizofen kam. Die eigentliche beheizte, d. h. die von den äußersten Ofenreihen eingeschlossene Fläche, hatte eine Ausdehnung von 63 × 63 m = 4000 m<sup>2</sup>.

Zur Ermittlung der Heizwirkung wurden 17 Thermometer nach Angabe der Lageskizze (Abb. 100) 50 cm hoch über dem Boden der beheizten Fläche aufgestellt, während 28 Thermometer über die unbeheizte Fläche verteilt wurden; diese Außenthermometer standen 5, 10 und 40 m vom Rande der quadratischen Heizfläche entfernt. Die Thermometer selbst trugen keinen Strahlungsschutz. Inmitten des beheizten Feldes wie auch in der unbeeinflussten Zone befand sich außerdem noch je eine Thermometerstaffel mit Thermometern von 5 cm bis 250 cm Abstand vom Boden.

Die Witterung am 26. April 1929 zeichnete sich durch starke Bewölkung aus. Die tagsüber schwachen Winde aus östlichen Richtungen legten sich gegen Abend nahezu vollkommen. Nach einem Tagesmaximum von 10,6 Grad wurden an der benachbarten meteorologischen Station Mainz um 21 Uhr 30 5,1 Grad festgestellt. Kurz vor Beginn des Versuches fiel gegen 21 Uhr 00 etwas Regen, dem jedoch bald Aufheiterung folgte. Um 23 Uhr 00 war bereits wieder stärkere Bewölkung aufgezo-gen, die sich auch bis zur Beendigung des Versuches hielt. Es handelte sich also nicht um eine ausgesprochene Ausstrahlungsnacht mit raschem Temperaturfall und ausgeprägter vertikaler Schichtung. Für den Versuch war jedoch günstig, daß fast keine Luftbewegung herrschte; nur zeitweilig konnte leichter NE-Wind festgestellt werden.

Auf Grund der viertelstündlichen Temperaturablesungen wurden Isothermenkarten gezeichnet, von denen hier die vier wesentlichen zur Wiedergabe und Besprechung gelangen.

Die Isothermenkarte von 22 Uhr 00 (Abb. 100), welche der letzten Ablesung vor dem Anzünden der Öfen entspricht, zeigt nur geringe Temperaturunterschiede von einigen Zehntel Graden über dem Versuchsfeld. Die

Temperaturen liegen zwischen 6,0 und 6,5 Grad. Kurz nach dieser Ablesung wurde mit dem Anzünden der Öfen begonnen. Um sämtliche 100 Öfen in Betrieb zu setzen, brauchte ein Mann mit der Lötlampe 30 Minuten.

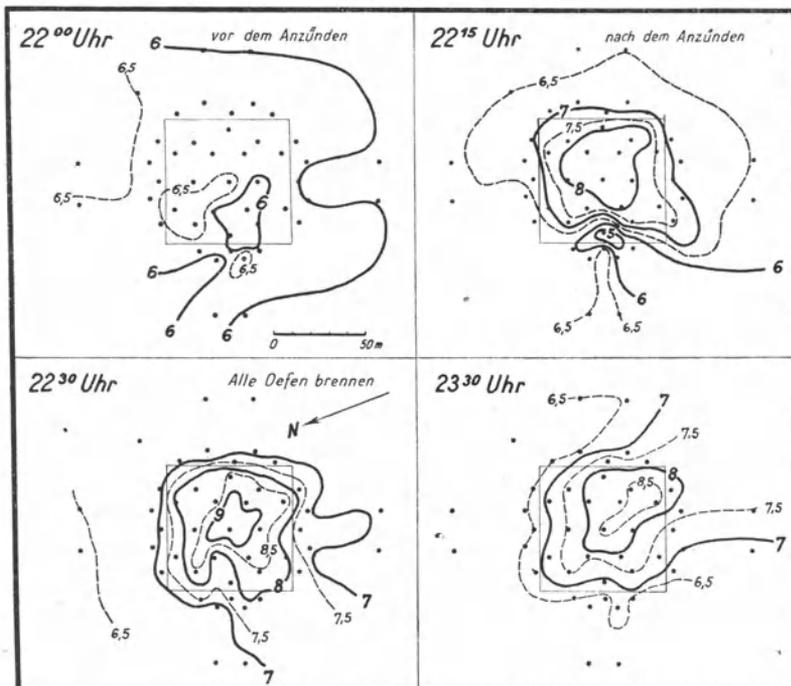


Abb. 100. Isothermen zum Heizversuch mit Ölheizöfen, System Maurer. Oppenheim, 26./27. April 1929. (Zeitangaben bedeuten Ablesetermine.)

Auf der Isothermenkarte von 22 Uhr 15 läßt sich über dem bereits beheizten Gebiet eine Wärmeinsel erkennen, deren Kern Temperaturen von 8 Grad und mehr aufweist und somit gegenüber der unbeeinflussten Umgebung um mindestens 2 Grad wärmer erscheint. Besonders auffallend ist auf dieser Karte die Ausbildung einer zungenförmigen Kaltluftzone über dem Teil des Heizfeldes, dessen Öfen noch nicht in Brand waren. Diese Erscheinung deutet darauf hin, daß sich unmittelbar nach dem Anzünden eine wirbelförmige Bewegung der Luft ausbildete, wie sie auch bei vielen späteren Heizversuchen beobachtet werden konnte.

Um 22 Uhr 30 erkennt man bereits eine in sich abgeschlossene und ziemlich gleichmäßig über das Heizfeld gelagerte Wärmezone. Der Temperatureffekt, der gemäß der Thermometeraufstellung als Minimaleffekt bezeichnet werden muß, liegt zwischen 2 und 3 Grad.

Auf der Karte von 23 Uhr 30 ist eine kleine Verschiebung des Wärmezentrums nach einer Ecke des Versuchsfeldes zu erkennen. Diese beruht nicht auf einem ungleichmäßigen

Brennen der Öfen, sondern ist auf eine schwache Windströmung zurückzuführen.

Bei diesem Versuch ergaben die Temperaturmessungen in verschiedenen Höhen über dem Boden ein ähnliches Bild, wie wir es später bei den Versuchen mit offen ausgelegten Briketts wiederfinden werden (Seite 183). So war vor allem an dem Thermometer, das dicht über dem Boden der beheizten Fläche lag, keine wesentliche Temperaturerhöhung gegenüber der unbeheizten Fläche in gleicher Höhe festzustellen. Die stärkste Erwärmung wurde an dem höchsten Thermometer in 250 cm Höhe festgestellt; vielleicht hätte in größerer Höhe eine noch stärkere Erwärmung gemessen werden können. Diese Beobachtung zeigt, daß bei der kräftigen Aufwärtsbewegung der Luft, die durch die Ölöfen hervorgerufen wird, die Hauptmenge der freiwerdenden Verbrennungswärme nach oben hin abwandert. Demnach besteht die schützende Wirkung der Heizmethode mit Ölöfen weniger in einer direkten Erwärmung der Luft im Bereich der Vegetation, sofern dieselbe nicht einige Meter hoch reicht (Bäume), als vielmehr in einer starken Durchmischung, die keine Schichtung und Ausbildung einer mächtigeren Kaltluftschicht über dem Boden aufkommen läßt.

Wir müssen uns den Vorgang also in der Weise vorstellen, daß zunächst durch Kontaktleitung eine starke Überhitzung der unmittelbar den Öfenwänden aufliegenden Luftteile hervorgerufen wird. Die aufsteigende erhitzte Luft bewirkt, vermischt mit den noch heftiger aufsteigenden Abgasen der Öfen, eine starke Durchwirbelung der Luft. Während ein solcher Austausch eine, wenn auch verhältnismäßig kleine, so doch ziemlich gleichmäßige und über die ganze Fläche verteilte Erwärmung mit sich bringt, treten in unmittelbarer Nähe der Öfen an den Thermometern bzw. Pflanzenorganen vereinzelt starke Temperaturerhöhungen auf, die der direkten Ausstrahlung seitens der heißen Öfenwände und brennenden Gase zuzuschreiben sind. Spätere Versuche geben hierüber weiteren Aufschluß (siehe Seite 191).

Aufstellung und Verteilung der Ölöfen bei einem Versuch vom 2./3. Mai 1929 unterschieden sich nicht wesentlich von denjenigen, welche bei dem Versuch vom 26./27. April gewählt worden waren. Da aber dieses Mal die Versuchsfläche um nahezu 2000 m<sup>2</sup> größer genommen wurde, war auch die Zahl der Öfen vermehrt worden, und zwar um 37. Bei dieser zweiten Durchführung eines Versuches mit Ölheizern sollte neben der Feststellung des allgemeinen Wirkungsgrades auch noch die Frage beantwortet werden, wie sich die Temperaturerhöhung in der näheren Umgebung eines solchen Ofens auswirkt.

Die Witterungsdaten für diese Versuchsnacht konnten der inzwischen eingerichteten meteorologischen Station Oppenheim entnommen werden. Nach einigen Schauern am Vormittag des 2. Mai stieg die Temperatur bis 12,3 Grad an; das Tagesmittel betrug 7,2 Grad. Während des Nachmittags trat Aufheiterung ein. Zu Beginn des Versuches

waren nur mehr zwei Zehntel des Himmelsgewölbes durch Wolken bedeckt. Daher konnte sich in der kommenden Nacht bei nur ganz schwachem NW-Wind eine deutliche Luftschichtung ausbilden. Die vertikal gestaffelten Thermometer der Station Oppenheim ergaben folgende Minima während der Nacht:

Höhe über Boden: 0 10 50 100 200 cm  
 Minima: 3,0 3,2 3,9 4,5 4,7 Grad C.

Von den zahlreichen Isothermenkarten, die nach Korrektur der viertelstündlichen Ablesungen gezeichnet wurden, bringen wir hier der Raumersparnis wegen nur einige wenige.

Wie wir es häufig bei unseren Versuchen auf den „Auswendigen Äckern“ feststellen konnten, lassen die vor dem Anzünden um 20 Uhr 45 (Abb. 101) beobachteten Temperaturen erkennen, daß das eigentliche Versuchsfeld etwas wärmer war als die weitere Umgebung. Diese Tatsache, daß die Temperaturen in einem nächtlichen Versuchsfeld vor Beginn der Versuche höher liegen, kann nicht immer mit kleinen Geländeunterschieden erklärt werden. Wir finden diesen Fall übrigens nicht nur sehr häufig bei unseren Versuchen, sondern auch bei W. Schmidt und anderen. Unseres Erachtens genügt bereits die geringe Durchwirbelung der in Ausstrahlungsnächten so stark geschichteten Luft über dem Versuchsfeld durch die zum Ablesen der vielen Thermometer eingesetzten Menschen, um eine kleine Erhöhung der Temperatur über dem Versuchsfeld gegenüber dem weniger begangenen Außenfeld hervorzurufen.

Diese vor dem Anzünden über dem engeren Versuchsfeld beobachteten Temperaturunterschiede, die im Höchstfall etwas mehr als 1 Grad betragen, dürften für die Beurteilung des Heizeffektes nicht von Bedeutung sein, weil diese Störung der Schichtung gegenüber der starken Aufwirbelung durch die Wirkungsweise der Heizöfen nicht sonderlich ins Gewicht fällt.

Um 21 Uhr 30, als die letzten Öfen gerade in Brand gesetzt waren, betrug die Temperaturerhöhung im Kern der Wärmezone gegenüber dem unbeeinflussten Außengebiet 3—4 Grad. Im späteren Verlauf (Abb. 101) wurde allerdings ein Rückgang dieses Unterschiedes um 1—2 Grad beobachtet. Schließlich brachte eine schwache Luftbewegung aus NW eine Verlagerung des Wärmezentrums nach einer Ecke des Heizfeldes mit sich.

Um die Temperaturverteilung in unmittelbarer Nähe eines Ölofens zu ermitteln, waren um einen Ofen in der Mitte des Heizfeldes in Richtung auf die vier benachbarten Öfen je acht ungeschützte Thermometer in verschiedenen Abständen aufgestellt worden (Abb. 102). Die Entfernungen der acht Thermometer von dem zentralen Ofen betragen der Reihe nach 30, 60, 110, 220, 330, 440, 550 und 660 cm. Zu Anfang des Versuchs waren nur sechs Thermometer in jeder Richtung vorhanden. Erst

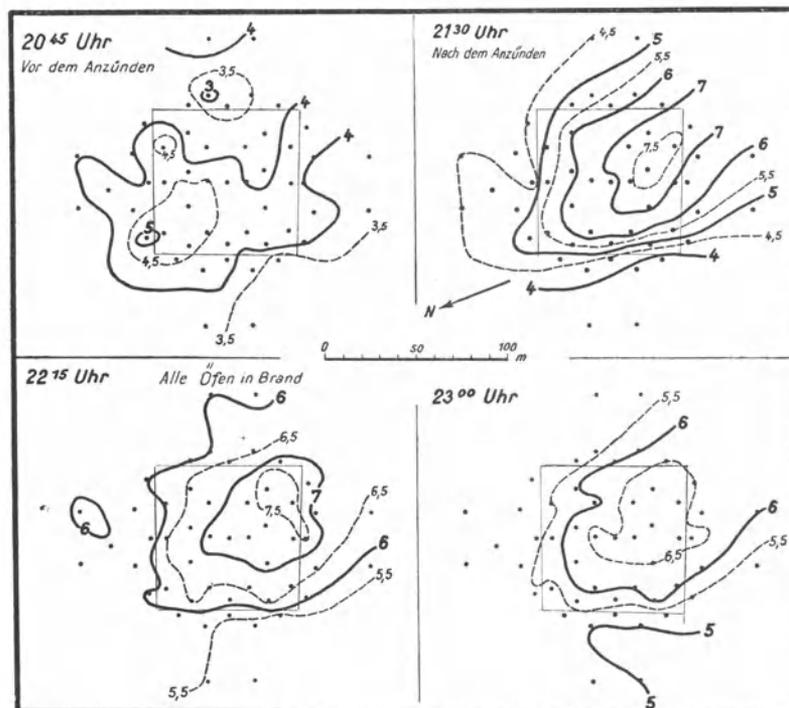


Abb. 101. Isothermen zum Heizversuch mit Ölheizöfen, System Maurer. Oppenheim, 2./3. Mai 1929.

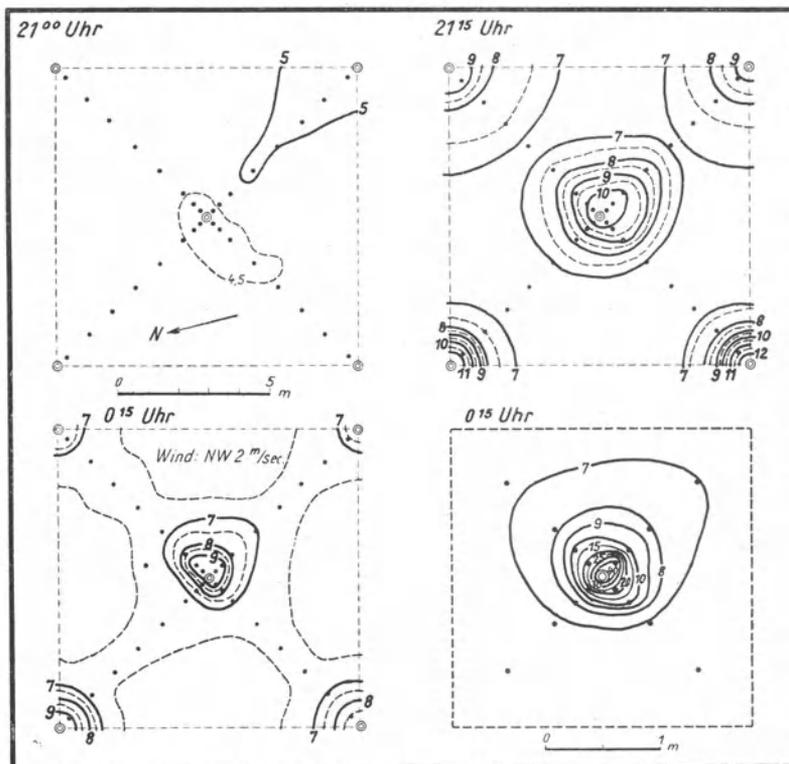


Abb. 102. Isothermen zum Heizversuch um einen brennenden Ölheizofen. Oppenheim, 2./3. Mai 1929.

später wurden die beiden nächsten Thermometer in 30 und 60 cm Entfernung vom Ofen hinzugefügt. Da bei diesen kurzen Abständen vom Ofen wegen der hohen Temperaturen Minimumthermometer nicht verwendet werden können, wurden Quecksilber-, und zwar Maximumthermometer benutzt, die nach jeder Ablesung neu eingestellt werden mußten. Auf diese Weise konnten jeweils die zwischen zwei Ablesungen aufgetretenen Maximalwerte erfaßt werden. Die Ablesungen wurden alle Viertelstunden vorgenommen.

Um 21 Uhr 00, also unmittelbar vor dem Anzünden gibt die Isothermenkarte (Abb. 102) für das Flächenstück mit den fünf Öfen eine ziemlich gleichmäßige Temperaturverteilung wieder. Die Werte liegen um 4,5 Grad. Gleich nach dem Anzünden der Öfen lassen sich um diese herum kräftige Wärmeinseln erkennen, die bei Entfernungen von nicht ganz 1 m Temperaturen zwischen 10 und 12 Grad besitzen. Infolge des schwachen NW-Windes zeigen die Isothermen eine Verlagerung nach der Leeseite des Ofens.

Als um 00 Uhr 15 vorübergehend eine Auffrischung des nordwestlichen Windes bis zu 2 m pro Sekunde erfolgte, gingen die Werte bei gleichzeitig stärkerer Ausbuchtung der Isothermen etwas zurück.

In einer besonderen Darstellung der Isothermenwerte der Ablesung um 00 Uhr 15 ist die nächste Umgebung des zentralen Ofens bis zum vierten Thermometer in 220 cm Abstand wiedergegeben (Abb. 102). In der kürzesten Entfernung von 30 cm stellt sich das Thermometer auf Temperaturen von über 40 Grad ein.

Bei Rebplantagen, in denen die Öfen im Extremfall nur 40 cm von den zu schützenden Reben entfernt stehen, hat diese starke Erwärmung nach unseren Beobachtungen keine schädigenden Wirkungen auf die Pflanzenorgane ausüben können. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Pflanzenteile die Ofenstrahlung stärker absorbieren als unsere Maximumthermometer, deren Quecksilber erheblich reflektiert.

Zur weiteren Prüfung der Methode der Geländeheizung mit Ölheizöfen in hängigem Gelände wurde in der Nacht vom 20./21. Dezember 1929 im Konzer Tälchen oberhalb Trier ein Großversuch bei tiefen Temperaturen durchgeführt.

Als Versuchsgelände diente eine Wiese des Falkensteiner Hofes am Südhang des Konzer Tälchens unterhalb eines ausgedehnten Weinberges. Diese Wiese hatte eine Ausdehnung von etwa 7 ha und reichte von der Höhenlinie 175 bis zur Höhenlinie 200 m über dem Meeresspiegel (Abb. 103 und 197, Tafel 7).

Das beheizte Feld selbst hatte eine rechteckige Form und lag mit seiner Längenerstreckung von 225 m parallel zur 200 m-Höhenlinie. Auf der Ostseite war der Hang etwas steiler als auf der Westseite. Bei einer Breite von 125 m war die beheizte Fläche etwa 3 ha groß.

Auf dieser Fläche standen 777 Öfen, so daß bei gleichmäßiger Verteilung auf je 36 m<sup>2</sup> ein Ofen kam. Die Öfen standen also 6 m auseinander.

Zwischen den Öfen waren in der üblichen Diagonalanordnung 84 Minimumthermometer in 50 cm Bodenabstand aufgestellt. Sie waren in sieben Horizontalreihen zu je zwölf Meßstellen angeordnet. Acht von diesen Stationen, die im Lageplan durch kleine Dreiecke angedeutet sind, waren außerdem noch mit je drei Thermometern in 2, 10 und 150 cm über dem Boden versehen.

Außer diesen Thermometern im Heizfeld waren in angemessenem Abstand um dieses Rechteck herum acht Stationen aufgestellt, die den Temperaturverlauf außerhalb der Einflußzone der Öfen zu verfolgen gestatteten. Sie waren mit je drei Thermometern in 2, 50 und 150 cm Höhe ausgerüstet.

Die insgesamt 132 Thermometer, die ohne Strahlungsschutz aufgestellt waren, wurden von 18 Beobachtern von Viertelstunde zu Viertelstunde abgelesen. Die Beobachtungen wurden drei Stunden lang durchgeführt. Von den hieraus gewonnenen Isothermenkarten werden die wichtigsten weiter unten besprochen.

Während der Versuchsnacht herrschte nur schwache Luftbewegung. Bei klarem Himmel konnte die Ausstrahlung des Bodens bzw. der Pflanzendecke besonders stark wirksam werden. Über dem Versuchsfeld war ein Wind aus ENE spürbar, der wohl hauptsächlich als Fallwind gedeutet werden kann. Außer dem Bergwind, der von dem oberen Teil des Tälchens herunter wehte, bewegten sich auch Kaltluftmassen geringer Mächtigkeit aus den höheren Hanglagen über das Versuchsfeld bis zur Talsohle.

Die Isothermen, welche auf Grund der 18 Uhr 15-Ablesung an den 50 cm hohen Thermometern kurz vor dem Anzünden der Öfen gezeichnet wurden (Abb. 103), lassen längs des Hanges einen Temperaturabfall von — 4,5 Grad oben bis — 6 Grad unten erkennen. Man sieht also deutlich, wie sich der warme Hang aus dem bereits in Gang kommenden Kaltluftstrom über der Talsohle heraushebt.

Bald nach dem Anzünden der Öfen, womit an der Nordostecke des Heizfeldes begonnen wurde, bildeten sich mehrere Wärmekerne im Isothermenfeld aus. Während die Temperaturen über den oberen Hanglagen auf — 6 Grad und an der Talsohle auf — 8,5 Grad zurückgegangen waren, ließ sich im Bereich des beheizten Teiles um 18 Uhr 45 bereits ein Temperatureffekt von 3—4 Grad feststellen. Als der größte Teil der Öfen um 19 Uhr 00 in Brand stand, wurden im Wärmezentrum Temperaturen von — 2 Grad abgelesen, was einer Erhöhung von 4 Grad gegenüber gleichhohen Lagen der Außenzone entspricht.

Um 19 Uhr 45 zeigte das Isothermenfeld einen recht gleichmäßigen Abfall von der Mitte des Heizfeldes aus nach allen Randzonen. Die  $-6$ -Grad-Isotherme umschloß fast alle Außenmeßstellen. Gegenüber diesen Werten war der zentrale Teil des beheizten Feldes um  $4,5$  Grad, der Randteil um  $2$  Grad wärmer.

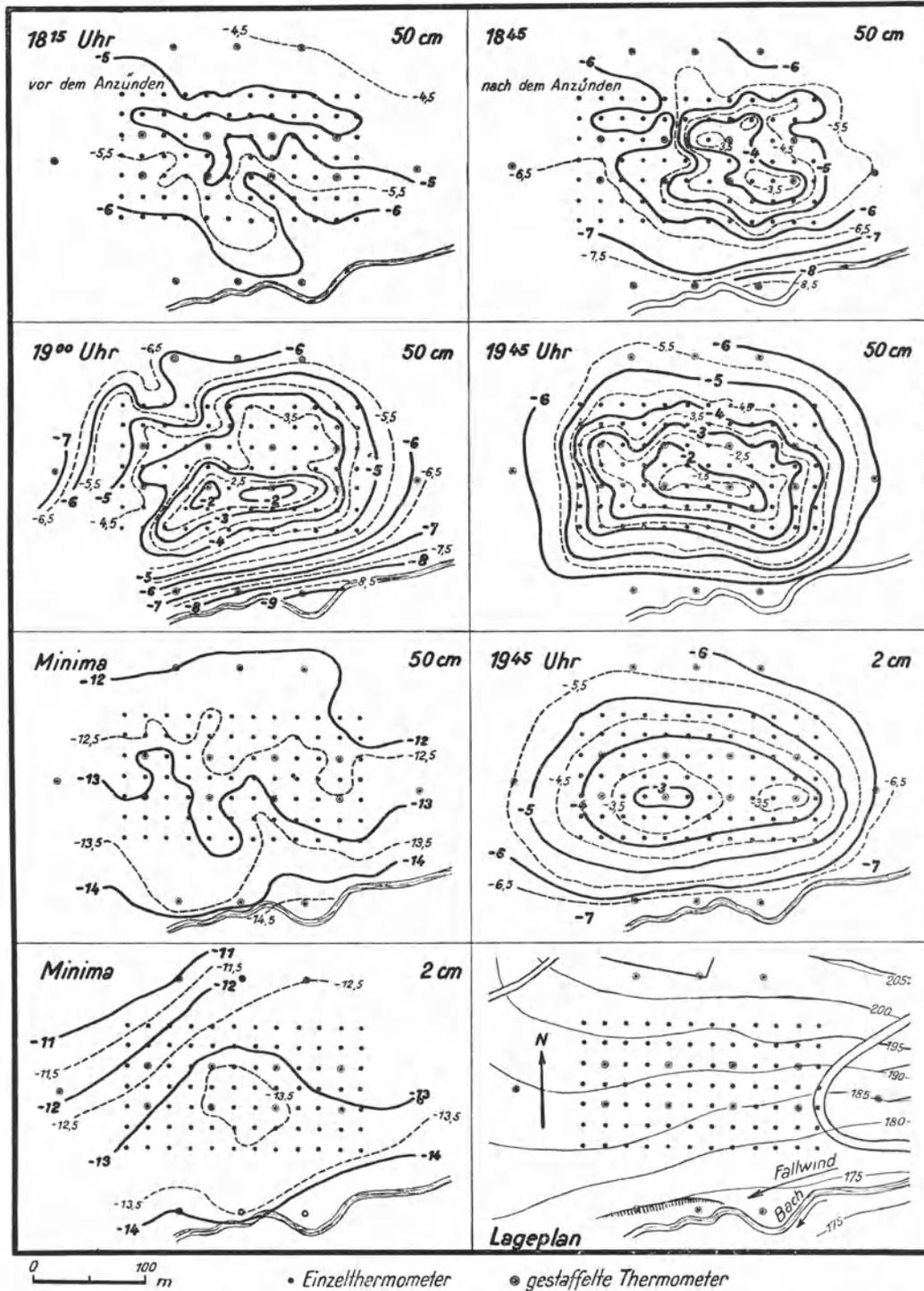


Abb. 103. Isothermen zum Heizversuch mit Ölheizöfen. Falkensteinerhof bei Konz, 20./21. Dezember 1929.

Die Messungen haben also gezeigt, daß die intensive Ölheizung nach Inbetriebnahme sofort eine deutliche Temperatursteigerung in der bodennahen Luftschicht hervorzubringen vermag. Die anfängliche Temperaturunruhe mit vielen kleinen Wärmeinseln weicht nach längerer Heizdauer einer großen Heizzone mit einem gleichmäßigen Gefälle von der Mitte zum Rand. Schließlich wird sogar der starke Temperaturgradient, der vorher über dem Hangprofil liegt, fast gänzlich zum Verschwinden gebracht. Dieser letzte Effekt findet seine Erklärung darin, daß durch die intensive Aufwärtsbewegung der von den vielen kleinen Feuerstellen ausgehenden Heizgase eine kräftige Durchwirbelung und Durchmischung der ursprünglich übereinander geschichteten Luftmassen zustandekommt.

Die Isothermenkarte der Minima, die sich ohne Beeinflussung der bereits beendeten Heizung in den frühen Morgenstunden einstellten, zeigt wieder den ursprünglich gemessenen Temperaturabfall von oben nach unten. Die Isotherme, die am unteren Rand des Weinbergs entlang läuft, hat den Wert  $-12$  Grad. Auf dem Talgrund verläuft in der Nähe des Baches die  $-14,5$ -Grad-Isotherme.

In der Abbildung 103 ist auch eine Isothermenkarte für 2 cm Bodenabstand und eine für die Minima in dieser Höhe wiedergegeben. Im Vergleich zur 50 cm-Höhe zeigt die Karte von 19 Uhr 45 einen ähnlich gleichmäßigen Verlauf, nur daß die Werte um 1—2 Grad tiefer liegen, wie es auch die Beobachtungen in der Ebene gezeigt haben. Die Minima in 2 cm Höhe unterscheiden sich kaum merklich von denen im Normalabstand, was auf das sofortige Abfließen kalter Luft an einem steilen geneigten Hang ohne bremsende Pflanzendecke zurückzuführen ist.

c) *Die Heizversuche mit offen ausgelegten Briketts.*

Nach einigen kleinen Vorversuchen, die hauptsächlich der Untersuchung und dem Vergleich der Heizstoffe untereinander gewidmet waren, fand Mitte April 1929 der erste größere Heizversuch mit offen ausgelegten Braunkohlebriketts statt.

Das Versuchsfeld lag in fast vollkommen ebenem Wiesengelände 200 m vom Rhein entfernt. Die eigentliche Versuchsfläche, die mit Briketts beschildet war, hatte eine Größe von  $12,5 \times 22 \text{ m} = 275 \text{ m}^2$ . Die Briketthäufchen wurden schon einige Tage vor dem Versuch in Abständen von 1,40 bzw. 1,45 m ausgelegt. Auf diese Weise kam also auf  $2 \text{ m}^2$  jeweils eine Feuerstelle. Da jedes Häufchen aus vier Briketts bestand, entfielen zwei Briketts (1 kg) auf  $1 \text{ m}^2$ , eine Dichte, die zunächst auch bei den späteren Versuchen bis 1930, insbesondere bei dem Großversuch in Saarfels, beibehalten wurde. Die vier Briketts einer Feuerstelle waren so angeordnet, daß zwei Briketts in einem Abstand von etwa 5 cm nebeneinander gelegt wurden, während die beiden anderen quer darüber lagen. In den Zwischenraum wurde ein Gemisch von Rohnaphtalin und Sägespänen als Anzündmasse gestreut.

Zur Ermittlung des Temperatureffektes wurden einige ungeschützte Alkoholminimumthermometer innerhalb und einige außerhalb der beheizten Fläche aufgestellt. Der Abstand der Thermometer von der Bodenoberfläche betrug 50 cm.

Um auch die Temperaturänderung in den höheren Luftschichten verfolgen zu können, wurden im Heizfeld und außerhalb desselben vertikal gestaffelte Thermometer angebracht. Die eine Thermometerstaffel befand sich in der Mitte der beheizten Fläche, während die unbeeinflusste Station 20 m vom Rande des Heizfeldes an dessen Luvseite Aufstellung fand. Beide Stationen besaßen auch je ein Thermometer unmittelbar auf dem Boden, während die anderen vier Thermometer in Abständen von 25, 50, 100 und 250 cm über dem Boden an einer Meßplatte befestigt waren.

Alle Thermometer wurden viertelstündlich von vier Personen abgelesen. Da die Ablesungen immer in derselben Reihenfolge stattfanden, blieb die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Ablesungen jeweils die gleiche.

Das Anzünden wurde von zwei Männern besorgt. Es geschah in der Weise, daß der eine die Anzündmasse mit Petroleum übergießt, während der andere die Feuerstellen mit einer Lötlampe zum Entflammen brachte. Obwohl die Briketts in den Vortagen wiederholt von Regen benäßt worden waren, ergaben sich beim Anzünden keine Schwierigkeiten. Die Entzündung der insgesamt 160 Briketthäufchen nahm eine Zeit von 25 Minuten in Anspruch.

Die Witterung verlief für den Versuch verhältnismäßig günstig. Die meteorologische Station Oppenheim war damals noch nicht in Tätigkeit, weshalb wir auf die Beobachtungen der benachbarten Stationen Mainz und Worms zurückgreifen. Bei durchschnittlich mäßigem Winde war die Bewölkung am 15. April stark wechselnd, die Sonne kam nur zeitweise zum Durchbruch. Die höchste Tagestemperatur wurde in Mainz mit 13,7 Grad, in Worms mit nur 11,0 Grad erreicht. Das Tagesmittel lag in Mainz bei 8,8 Grad, in Worms bei 6,8 Grad. Da die Luft verhältnismäßig trocken war, konnte sich die Ausstrahlung in der folgenden Nacht während des zeitweisen Rückganges der Bewölkung gut auswirken. Kurz nach Mitternacht kam jedoch allgemein Bewölkung auf, so daß der Versuch bald danach abgebrochen wurde.

Aus den beigegebenen Isothermenkarten (Abb. 104) ist die Verteilung der Temperaturen zu den verschiedenen Terminen zu erkennen. Die letzte Ablesung vor dem Anzünden um 20 Uhr 45 ergibt eine Temperaturverteilung, nach der das eigentliche Versuchsfeld um fast 1 Grad wärmer ist als die weitere Umgebung (Seite 179).

Unmittelbar nach dem Anzünden ergeben sich um 21 Uhr 00 Temperaturanstiege in der Mitte des Versuchsfeldes bis zu 22 Grad, während die Außentemperaturen immer noch 2—3 Grad betragen. Diese hohen Werte sind auf die Wirkung der brennenden Anzündmasse zurückzuführen und stellen nicht Lufttemperaturen dar, sondern erklären sich aus der von den Thermometerkörpern absorbierten Strahlung, die von den Naphtalinfeuern ausgeht. Sie entsprechen annähernd der Temperatur, die die Pflanzenteile unter gleichen Umständen angenommen hätten.

Erst nach dem Verlöschen des Naphtalins treten die nun in Glut gekommenen Briketts in Tätigkeit, die viel langsamer aber gleichmäßiger brennen. Das zeigt die Isothermenkarte von 21 Uhr 30, zu welcher Zeit die Temperaturen der Innenthermometer im Höchsthalle nur noch 10 Grad betragen, während die Außentemperatur keine wesentlichen Änderungen erfahren hat. Nunmehr zeigen die Thermometer keine Über-temperierung durch absorbierte Strahlung, sondern etwa wahre Lufttemperatur.

Die folgenden Ablesungen zeigen ein weiteres Abklingen der Temperaturen. So beträgt die Höchsttemperatur in dem durch südliche Winde nach der Nordseite verlagerten Wärmezentrum um 21 Uhr 45 (Abb. 104) nur noch 7,0 Grad, was eine Erhöhung um 5 Grad gegen außen bedeutet. Im weiteren Verlauf steigen die Temperaturen sowohl im eigentlichen Wärmezentrum als auch in den Randzonen des Heizfeldes wieder merklich an (22 Uhr 45). Allerdings nehmen in der gleichen Zeit wegen aufkommender Bewölkung auch die Temperaturen in der weiteren Umgebung wieder zu, so daß sich hier zwei Effekte überlagern. Wesentlich ist jedoch, daß die Temperatursteigerung bis zum Abbruch der Beobachtungen um 01 Uhr 00 fast unverändert bleibt.

Im letzten Teilbild der Abbildung 104 sind die Mittelwerte der Temperaturen von 21 Uhr 45 bis 00 Uhr 45 als Isothermen eingezeichnet. Auf Grund dieser Darstellung kann man annehmen, daß für die gewählte Aufstellung der Thermometer eine mittlere Temperaturerhöhung um 3 Grad zustande kam, die in einem kleinen Kerngebiet bis zu 5 Grad anstieg.

Der Temperaturverlauf an den gestaffelten Thermometern im beheizten und unbeheizten Feld ist in der Abbildung 105 kurvenmäßig dargestellt. Wie schon erwähnt, waren auch die Temperaturen in der unbeheizten Zone Schwankungen unterworfen, die mit der wechselnden Bewölkung in Zusammenhang stehen. Am stärksten sind die Schwankungen in der dem Boden unmittelbar aufliegenden Luftschicht. Während hier schon um 21 Uhr 00 eine Temperatur von fast -1 Grad erreicht wird, steigt dieselbe bei zunehmender Bewölkung bis über +3 Grad um 23 Uhr 30 an. Im späteren Verlauf wird bei aufreißender Wolkendecke der Nullpunkt nochmals unterschritten.

Im unbeheizten Feld zeigen die höheren Thermometer einen ähnlichen Verlauf wie das Thermometer am Boden. Je größer der Bodenabstand der Thermometer ist, um so höher liegen die Werte. Außerdem zeigt sich deutlich nach oben hin ein allmählicher Ausgleich der Schwankungen. Aus den Messungen geht hervor, daß in der Versuchsnacht bei sehr schwacher Luftbewegung eine ausgeprägte Luftschichtung eintreten konnte. Die bodennächste Luftschicht ist um 20 Uhr 45, also vor Beginn des Heizens, über dem gesamten Versuchsfeld um 5 Grad kälter als die in 250 cm lagernde Schicht. Später

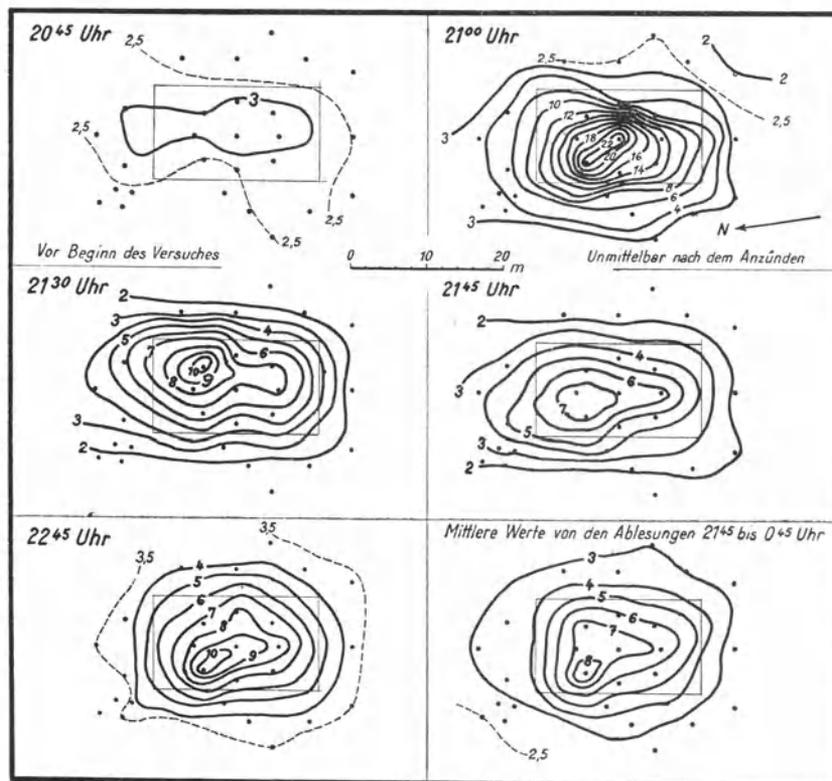


Abb. 104. Isothermen zum Heizversuch mit offen ausgelegten Briketts. Oppenheim, 15./16. April 1929.

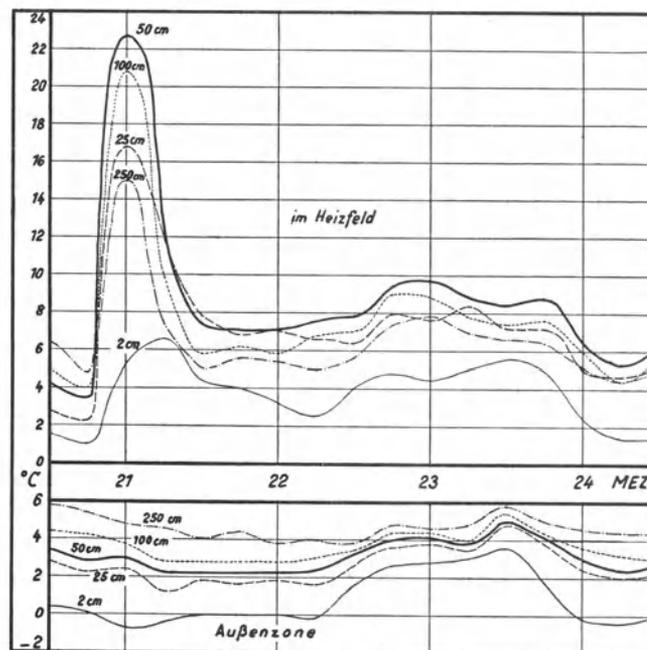


Abb. 105. Temperaturverlauf in fünf verschiedenen Höhen über dem Heizfeld und der Außenzone.

die bodennächste Luftschicht ist um 20 Uhr 45, also vor Beginn des Heizens, über dem gesamten Versuchsfeld um 5 Grad kälter als die in 250 cm lagernde Schicht. Später

schrumpft in der unbeheizten Zone diese Differenz allerdings unter dem Einfluß von Bewölkung und Luftbewegung zeitweise auf 2 Grad zusammen.

Verfolgen wir den Verlauf der Temperaturen im beheizten Feld, so fällt zunächst auf, daß die dem Boden unmittelbar aufliegende Lufthaut auch nach Anstecken der Briketts stets die niedrigsten Werte aufweist. Obwohl die Feuerstellen unmittelbar am Boden liegen, vermögen sie, wie die Messungen zeigen, nur geringen Einfluß auf die Temperatur in Bodennähe zu nehmen. Die Thermometer in 2 cm Höhe liegen offenbar meist noch innerhalb der von der Grasnarbe festgehaltenen Kaltluft und nehmen daher praktisch nur geringen Anteil an dem durch die Heizung in Gang gesetzten Luftaustausch. Dazu kommt, daß die von den Feuerstellen erwärmten Luftteilchen in ihrer Bewegung steil nach oben gerichtet sind, während gleichzeitig aus der Umgebung kalte Luft in dünner Schicht über die am Boden haftende Lufthaut herangesaugt wird. Auch die Strahlungswirkung der brennenden Briketts ist auf den gegebenen Abstand von 1 m gering.

Im großen und ganzen schneidet die 50 cm hohe Lage am besten ab. Während die Temperaturkurve dieser Höhe für die Zeit vor Beginn des Anzündens sowohl beim Heizfeld wie bei der Außenzone in der Mitte der Temperaturkurven liegt, die für die anderen vier Thermometer gelten, überragen die 50 cm-Werte schon unmittelbar nach dem Anzünden alle anderen. Bei der anfänglich durch die Verbrennung der Anzündmasse hervorgerufenen Störung zeigt das 50 cm hohe Thermometer einen Anstieg um fast 20 Grad, wie wir das auch auf der Isothermenkarte gesehen haben. Zur gleichen Zeit steigt das Thermometer in 100 cm Höhe um 17 Grad, in 25 cm um 15 Grad, in 250 cm um 10 Grad und am Boden nur um 5 Grad.

Im späteren Verlauf, nachdem die Anzündmasse aufgebraucht ist und die Briketts zur vollen Entfaltung ihrer Heizwirkung gelangt sind, bleibt das bodennahe Thermometer mit seinen Temperaturen im Mittel um 4 Grad unter den Temperaturen der anderen Meßpunkte. Am höchsten sind die Werte für 50 cm Höhe, nur wenig darunter liegen die Temperaturen für 100 cm Höhe bei fast gleichem Verlauf.

Man erkennt also deutlich, daß das Heizverfahren mit ruhig abbrennenden Briketts, die dem Boden unmittelbar aufliegen, eine weit geringere Höhenwirkung mit sich bringt als die Heizung mit Ölöfen. Es wird sich also besonders zur Bekämpfung von Frostschäden an niedrig wachsenden Kulturen eignen.

Während der Oppenheimer Versuch die Wirkung der Heizung mit offen ausgelegten Braunkohlebriketts über einer ebenen Fläche zu beurteilen gestattet, wurde vom 13./14. Mai 1929 ein weiterer Versuch angestellt, bei dem die gleiche Art der Heizung auf einem Weinbergshang ausprobiert wurde. Außer zum Studium der veränderten Verhältnisse, nämlich einer Hanglage gegenüber der Ebene, sollte dieser Versuch aber auch zum Vergleich zweier verschiedener Brikettarten, Braunkohle- und Holzkohlebriketts, dienen.

Das Versuchsfeld lag auf dem Südhang des Kirchbergs oberhalb Veldenz in einem Seitental der Mosel. Es hatte eine Ausdehnung von etwa 2 ha. Aus dieser Fläche wurden vier rechteckige Einzelfelder herausgegriffen. Sie alle schnitten unten mit derselben Höhenlinie ab, längs der sich ein Weg von Westen nach Osten hinzog. Die kleinen Felder I und III erstreckten sich in Nord-Südrichtung, also in Richtung des Gefälles, über 28 Stöcke und senkrecht dazu über acht Zeilen. Die großen Felder II und IV erstreckten sich hangaufwärts über je 56 Stöcke, in der Richtung der Talachse über je 16 Zeilen. Der Abstand der Zeilen betrug im Mittel 1,6 m, war aber wegen des parzellierten Besitzes einigen Schwankungen unterworfen. Der Abstand zwischen den Rändern der jeweils benachbarten Heizfelder betrug 50 m.

Bei diesem Gelände war von zwei Seiten her Kaltluft zu erwarten. Von oben her konnte kalte Luft, die sich auf den kahlen Höhen des Bergrückens bildete, herabfließen. Von unten her bestand die Möglichkeit der Ausbildung eines Kaltluftsees, der seinen Zufluß von den Seitentälern erhielt und in den die unteren Stöcke allmählich eintauchten.

Jedes der vier Einzelfelder wurde mit annähernd gleichviel Brennstellen beschickt. Da die Flächen II und IV viermal so groß waren als die Flächen I und III, war die Dichte der Brennstellen innerhalb der kleinen Felder viermal so groß als auf den großen Feldern. In den kleinen Feldern betrug die Entfernung der Brennstellen voneinander durchschnittlich 1,6 m, in den großen 3,3 m.

Auf den Feldern I und II wurden Braunkohlebriketts, auf den Feldern III und IV Holzkohlebriketts (Marke Fagonit) ausgelegt. Von den Braunkohlebriketts wurden je drei zu einer Brennstelle vereinigt, wobei zwei Briketts im Abstand von zwei Fingerbreiten nebeneinander lagen, während das dritte den mit Anzündmasse ausgefüllten Zwischenraum überdeckte. Die Holzkohlebriketts wurden einzeln mit der Schmalseite auf den Boden gestellt.

Das Auslegen der Briketts und die Zugabe der Zündmasse erfolgte am 13. Mai; mit dieser Arbeit waren vormittags vier, nachmittags zehn Leute beschäftigt.

Vor dem Anstecken der Holzkohlebriketts wurden diese mit Holzgeist übergossen. Das Anzünden selbst geschah mit Hilfe von Fackeln, die den Vorteil haben, daß sie den Weg bei Nacht erhellen. Andererseits gehen sie aber leicht aus und bringen infolge ihrer geringen Hitzeentwicklung die Zündmasse besonders dann schwer

zum Entflammen, wenn sie vorher von Regen durchnäßt wurde. Für diesen Fall sind besondere Anzündkannen (Seite 153) oder Lötbrenner brauchbar.

Auf dem gesamten Versuchsfeld waren 33 ungeschützte Alkohol-Minimumthermometer in 50 cm Bodenabstand aufgestellt, zu gleichen Teilen auf das eigentliche Heizfeld und die nichtbeheizte Außenzone verteilt (Diagonalaufstellung).

Die der Versuchsnacht vorausgehende Witterung bewirkte bei starker Einstrahlung und westlichen Luftströmungen eine recht gute Durchwärmung des Erdbodens. Die Nacht selbst war für den Versuch insofern günstig, als es gegen Mitternacht wolkenlos wurde. Erst in den Morgenstunden kam erneut Bewölkung auf.

Das Ergebnis der halbstündlichen Thermometerablesungen ist in den beigegebenen Isothermenkarten (Abb. 106) festgehalten. Die Ablesung um 00 Uhr 30 kurz vor dem Anzünden zeigt, daß sowohl oben als auch unten gemäß der geschilderten Lage des Versuchsfeldes die nächtliche Abkühlung zuerst einsetzt. Die mittlere Hanglage, auf der die Heizfelder liegen, ist ziemlich gleichmäßig temperiert. Hier liegen die Temperaturwerte zwischen 7 und 8 Grad.

Die vier Felder wurden nacheinander wie folgt in Brand gesetzt: um 01 Uhr 15 wurde mit dem Anzünden auf dem großen Feld IV begonnen, um 02 Uhr 00 auf Feld III, um 02 Uhr 20 auf Feld II und um 02 Uhr 40 auf Feld I. Die Brennstellen wurden auf jedem Feld vom Tal her in Brand gesetzt.

Auf der Karte von 01 Uhr 30 bildet sich eine schwache Wärmeinsel über Feld IV aus. Im späteren Verlauf treten über den Heizfeldern Temperaturerhöhungen von 1—2 Grad gegenüber den Werten der Außenzone in gleicher Höhe auf. Auffallenderweise sind die Temperaturen in den viermal so dicht belegten kleinen Feldern nicht wesentlich höher als in den großen Feldern. Aus der Karte mit den Minimumablesungen, die sich hier auf Ablesungen während des Brennens der Briketts beziehen, ist ein kaum merklicher Vorsprung der Holzkohle gegenüber den Braunkohlebriketts zu entnehmen.

Zur richtigen Beurteilung des Wärmeumsatzes und der Wirtschaftlichkeit beider Verfahren ist eine Umrechnung der Energien auf die Flächen- und Zeiteinheiten erforderlich. Eine solche Berechnung ist in Tabelle 36 durchgeführt.

Tabelle 36. Vergleich zwischen Braunkohle- und Holzkohlebriketts

Brennstoff:	A. Braunkohlebriketts	B. Holzkohlebriketts
Sorte . . . . .	Union	Fagonit
Zeilenabstand . . . . .	1,6 m im Mittel	1,6 m im Mittel
Fläche je Brennstelle (e n g e Auslegung) . . . . .	2,6 m <sup>2</sup>	2,6 m <sup>2</sup>
Anzahl der Briketts je Brennstelle . . . . .	3 Briketts	1 Brikett
Gewicht eines Briketts . . . . .	rd. 0,5 kg	rd. 0,3 kg
Heizwert . . . . .	rd. 5000 kcal/kg	rd. 6600 kcal/kg
Brenndauer . . . . .	rd. 9 Stunden	rd. 4,5 Stunden
Preis für 100 kg . . . . .	2.— RM	21.— RM
Leistung je Brennstelle . . . . .	830 kcal/std.	440 kcal/std.
Flächenintensität . . . . .	320 kcal/std. m <sup>2</sup>	170 kcal/std. m <sup>2</sup>

Die Flächenintensität bei der Heizung mit Braunkohlebriketts ist also rund zweimal so groß wie bei der Heizung mit Holzkohlebriketts, wenn man die Verteilung im Veldener Versuch zugrunde legt und gleichmäßiges

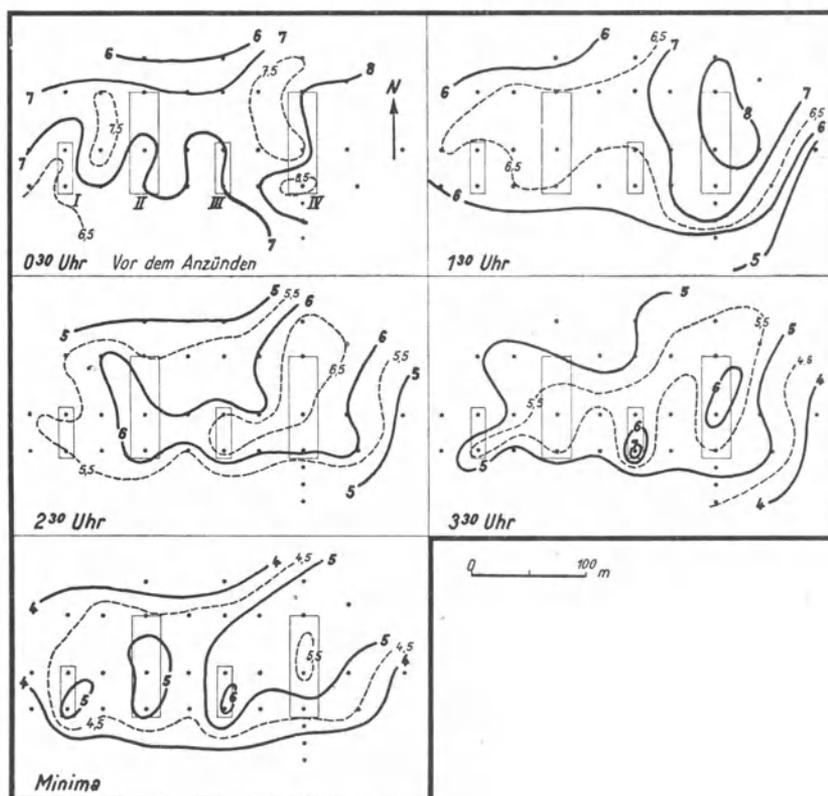


Abb. 106. Isothermen zum Heizversuch mit offen ausgelegter Holzkohle und mit offen ausgelegten Braunkohlebriketts. Veldenz bei Bernkastel, 13./14. Mai 1929.

Abbrennen voraussetzt. Zum Vergleich sollen noch die Werte für Heizung mit Braunkohlebrikettöfen herangezogen werden. Bei diesem Heizverfahren werden in der Regel je Stunde rund vier Briketts verbrannt, was einer Leistung je Brenn­stelle von annähernd 10 000 kcal/std entspricht. Die Flächenintensität der Heizung errechnet sich für einen Ofenabstand von 7 m (ein Ofen auf rund 50 m<sup>2</sup>) zu 200 kcal/std m<sup>2</sup>. Dieser Wert liegt also zwischen den beiden vorher berechneten Zahlen.

Im Falle der Heizung mit offen ausgelegten Braunkohlebriketts muß stets mit einer Gesamtbrenndauer von rund 9 Stunden gerechnet werden; wenn nämlich die Briketts einmal angezündet sind, können sie nicht wieder gelöscht werden. Eine Möglichkeit des Lös­chens besteht nur bei Benutzung von Steinkohlebriketts.

Unter Zugrundelegung des in der Zusammenstellung angegebenen Preises von RM. 2.— für 100 kg wäre für 1/4 ha mit RM. 29.— zu rechnen. Für die Holzkohlebriketts ergibt sich für dieselbe Fläche ein Kostenaufwand von RM. 61.—. Der Nachteil der doppelten Kosten für die Holzkohlebriketts erscheint aber dadurch weniger schwerwiegend, weil die Holzkohlebriketts ihre Wärme in der halben Zeit abgeben als die Braunkohlebriketts.

Im Vergleich hierzu seien wieder die Kosten für das Heizverfahren mit Brikettöfen angeführt. Als Regel gilt: in der ersten Stunde sechs Briketts, jede weitere Stunde vier Briketts. Werden die Öfen 4 1/2 Stunden in Betrieb genommen, so werden je Ofen 20 Briketts verbraucht. Für die Fläche eines 1/4 ha ergibt dies eine Menge von 1000 Briketts, welche RM. 10.— kosten. Man sieht anhand dieser Zahlen deutlich die wirtschaftliche Überlegenheit der Heizöfen gegenüber den offen ausgelegten Briketts, die bei Einbeziehung der Arbeitslöhne noch mehr hervortreten würde.

Vom 1. zum 2. Juni 1929 wurde in dem Weingut von Adolf Wagner bei Schloß Saarfels ein großer Versuch mit offen ausgelegten Briketts durchgeführt, bei dem die eigentliche Heizfläche eine Größe von rund 0,8 ha hatte. Der Weinberg liegt am Hang eines kleinen Nebenbaches der Saar. Er ist gegen Süden bis Südwesten exponiert und hat eine Neigung von durchschnittlich 20 bis 25 Grad. An den Weinberg schließt sich nach der Höhe zu schwächer geneigtes Ackerland an, das nachts Kaltluft für das darunter liegende Gelände liefert. An den unteren Weinbergshang grenzt ein schmaler Acker, an den sich die etwa 50 m breite Talwiese anschließt. In der Mitte dieser Wiese fließt ein kleiner Bach. Auf der anderen Seite des Tales liegt ein flacher Höhenrücken, der als Ackerfeld benutzt wird. Das gesamte Frosteinzugsgebiet des Baches umfaßt bis zum Weingut etwa 25 km<sup>2</sup> und weist Gipfelpunkte von 400 bis 500 m auf.

Der Weinberg wurde im Jahre 1912 angelegt. Früher standen hier, wie auch auf dem nach oben angrenzenden Gebiet Eichenschälwälder, die der Lohgewinnung dienten. Der Wald in dem höher gelegenen Gebiet wurde erst während des Krieges abgeholzt. Die dadurch hervorgerufene Verschlechterung des örtlichen Klimas wirkte sich nicht nur auf die Weinberge von Saarfels, sondern auch auf die der höher gelegenen Domäne Serrig ungünstig aus (siehe auch Seite 106).

Wie bei dem Versuch in Veldenz, so wurden auch in Saarfels die Braunkohlebriketts in Häufchen von je drei Stück ausgelegt. Zwischen je vier Rebstöcke kam ein Häufchen zu liegen. Bei einem Abstand der Stöcke von rund 1,25 m entfielen also auf jeden Quadratmeter Bodenfläche zwei Briketts (1 kg).

Die der Versuchsnacht vorausgegangene Witterung führte unter dem Einfluß hohen Luftdruckes zu Höchstwerten der Lufttemperatur von 25 Grad. Nach häufigen Gewitterstörungen trat gegen Ende Mai unter erneutem Anstieg des Luftdruckes wieder Aufheiterung ein. Hierbei wurden die Schwankungen zwischen Tag- und Nachttemperaturen immer größer. Einige benachbarte Stationen hatten etwa 15 Grad Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht.

Für den Versuch war wesentlich, daß die Reben zu dieser Zeit dichtes Laub trugen und die Gescheine kurz vor der Blüte standen. Da die Briketts samt der Anzündmasse bereits vier Wochen vorher ausgelegt worden waren, hatten sie infolge der häufigen Gewitterregen eine starke Durchfeuchtung und teilweise Verwitterung erfahren.

Die Heizwirkung der Briketts wurde durch Ablesungen an 36 ungeschützten Alkoholminimumthermometern ermittelt; sie standen wie üblich wieder 50 cm über der Bodenoberfläche (innerhalb der Heizfläche Diagonalaufstellung).

Das Ergebnis der Messungen ist aus den gezeichneten Isothermenkarten ersichtlich (Abb. 107). Von den zahlreichen Karten, die die viertelstündlichen Ablesungen lieferten, sind wiederum nur einige markante herausgegriffen. Zu Beginn des Versuches um 23 Uhr 45 herrscht am Hang ein normales Temperaturgefälle von oben nach unten. Die Unterschiede innerhalb des Weinberges sind jedoch nur gering. Die Temperaturen liegen hier zwischen 6 und 7 Grad. Eine kleine Wärmeinsel ist an der Westecke des Versuchsfeldes zu erkennen; hier wurde nämlich gerade mit dem Anzünden begonnen.

Das Anzünden wurde durch 16 Arbeiter des Weingutes durchgeführt, welche das Heizfeld von Westen nach Osten durchschritten. Sie benötigten zum Anzünden aller Brennstellen, die sich auf nahezu 7000 Stück

beliefen, 50 Minuten. Diese Zeit war deshalb länger als bei den anderen Versuchen, weil die Briketts wegen der Feuchtigkeit nur schwer anbrannten, obwohl die Zündmasse vor dem Anzünden mit Öl begossen worden war. Es stellte sich bei einer späteren Begehung des Versuchsfeldes heraus, daß 52 Feuerstellen nicht gebrannt hatten.

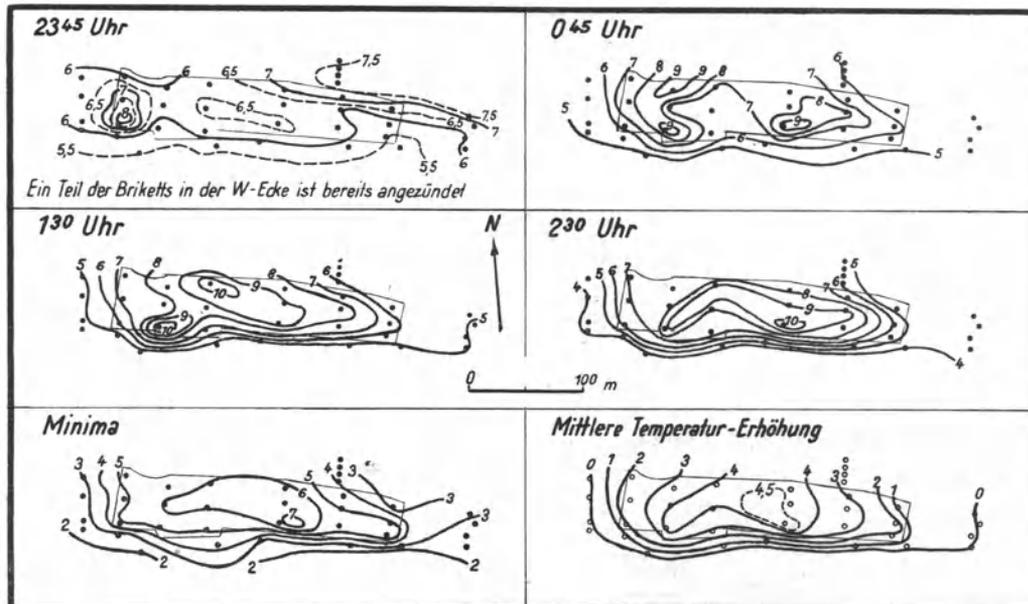


Abb. 107. Isothermen zum Heizversuch mit offen ausgelegten Braunkohlebriketts. Schloß Saarfels bei Serrig, 1./2. Juni 1929.

Die Isothermenkarte von 00 Uhr 45, zu welcher Zeit sämtliche Briketts in Brand waren, zeigt über den beiden Hälften des langgestreckten Heizfeldes je eine Wärmeinsel mit Kernen von 9 Grad. Auf der Talsohle haben sich mittlerweile Temperaturen von 5 Grad eingestellt. Im weiteren Verlauf zeigen die Kerne zeitweilig eine Verschiebung gegen den Talausgang, die auf die schwache talabwärts gerichtete Luftbewegung zurückzuführen ist.

Die Isothermenkarte, die auf Grund der Minimumablesungen am nächsten Morgen gezeichnet wurde, läßt erkennen, daß die Temperaturen innerhalb des beheizten Feldes mit Ausnahme des talauf gelegenen Endes während der Nacht nicht unter 5 Grad gesunken waren. In einem großen Mittelstück des Feldes, das etwa den dritten Teil der gesamten Heizfläche einnimmt, liegen die Mindesttemperaturen sogar zwischen 6 und 7 Grad. Demgegenüber stehen Minima von 2 Grad und weniger auf der Talsohle und solche von 3 Grad über dem unbeheizten Hang.

In einer besonderen Darstellung sind die mittleren Temperaturerhöhungen in der Zeit von 00 Uhr 45 bis 05 Uhr 00 in 50 cm Höhe über dem Boden des Versuchsfeldes eingezeichnet. Hierbei wurden die mittleren Außentemperaturen auf der Talsohle und am Hang gleich Null gesetzt. Nach dieser Darstellung hat der größte Teil des beheizten Feldes eine mittlere Temperaturerhöhung von mindestens drei Grad erfahren. Ein kleines Kerngebiet weist Temperaturerhöhungen bis zu 4,5 Grad auf.

d) Die Heizversuche mit Brikettöfen.

Verschiedene Versuche, die in den Jahren 1932 bis 1934 mit Brikettöfen durchgeführt worden waren, hatten ergeben, daß die Heizung mit Braunkohlebriketts in Öfen zu den praktischsten und billigsten Methoden der Frostschadenverhütung gehört. Zwar hat das Heizen mit Ölföfen die gleichen Erfolge in Bezug auf die Temperaturerhöhung gezeitigt; ein Nachteil besteht aber bei der Heizung mit Braunkohlenschwelöl darin, daß die Öfen während der ganzen Heizdauer nur dann regelmäßig brennen, wenn sie dauernd gewartet werden.

Zur weiteren Durchbildung der Heizmethode mit Brikettöfen wurden im Frühjahr 1935 zwei Großversuche unternommen, durch die das Verfahren einmal auf einer ausgedehnten Ebene, das andere Mal in einer typischen Hanglage näher untersucht werden sollte.

Für den Heizversuch in der Ebene war gleichzeitig ein Vergleich von drei verschiedenen Ofentypen vorgesehen. Es standen folgende Ofentypen zur Verfügung: Die Öfen der Burger-Eisenwerke, die der Firma Monostrier mit Kegeleinsatz und ferner die Öfen der Domäne Avelsbach.

Um die drei verschiedenen Brikettöfentypen miteinander vergleichen zu können und den Typ mit dem besten Wirkungsgrad zu erkennen, wurde nach einem möglichst großen und ebenen Versuchsgelände Ausschau gehalten, bei dem auch die topographische Umgebung möglichst wenig störend auf die Temperaturverteilung während der

Nacht einwirken konnte. Als ein diesen Ansprüchen bis zu einem gewissen Grad genügendes Gelände wurde der ehemalige Flugplatz bei Trier-Euren angesehen.

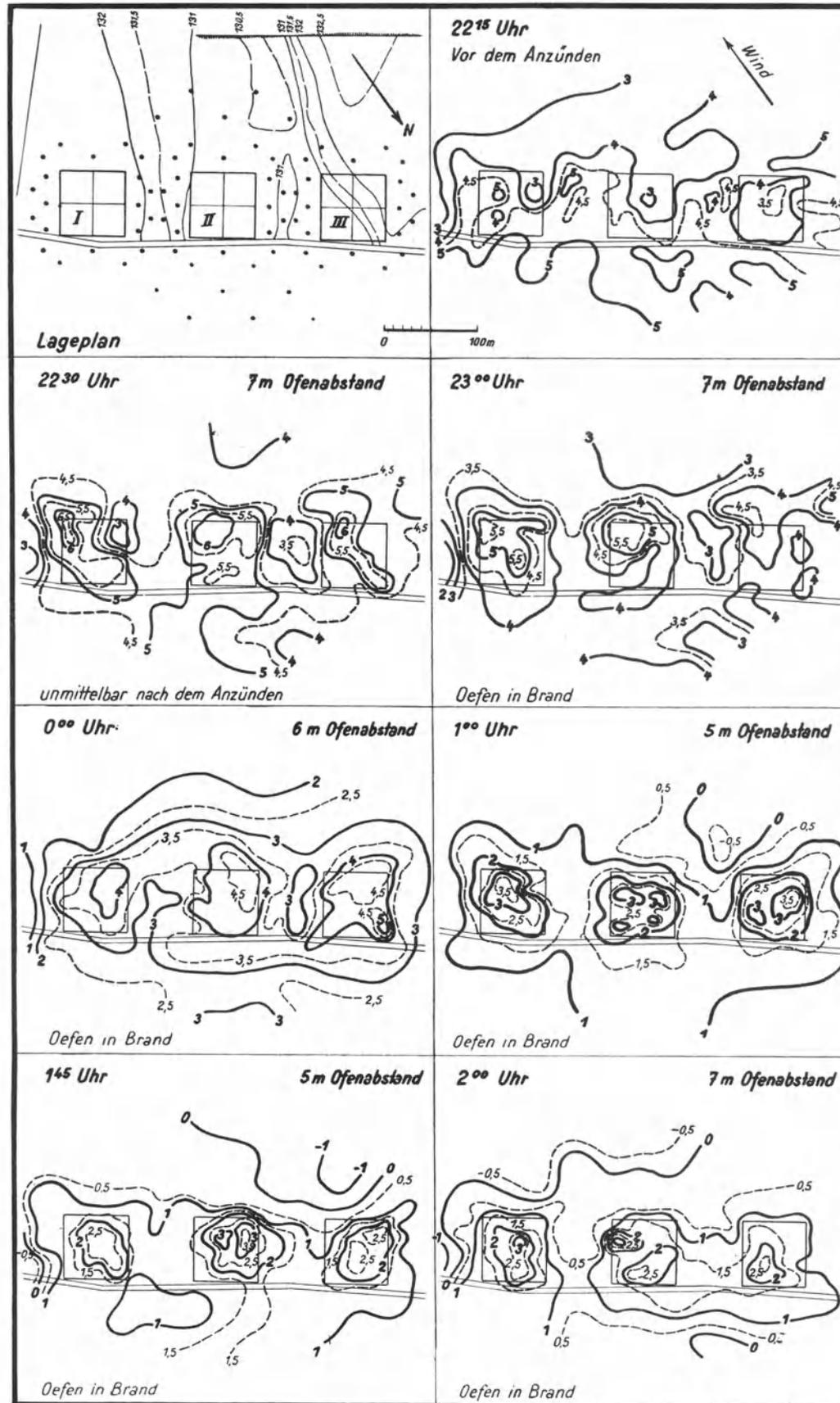


Abb. 108. Isothermen zum Heizversuch mit drei verschiedenen Brikettotypen. Eurerer-Flugplatz bei Trier, 30. April/1. Mai 1935.

Der für unseren Versuch gewählte Teil des Flugplatzes lag nordöstlich der Stelle, wo früher die Zeppelinhalle stand. Das Moseltal ist hier besonders breit, und die Randberge haben nur geringfügige Einschnitte, aus denen keine nennenswerten Zuflüsse von Kaltluft während der Nacht zu befürchten sind. Die tiefste Stelle des weiteren Versuchsgeländes liegt 130,5 m (Abb. 108), die höchste 132,5 m über dem Meeresspiegel, so daß also die Höhenunterschiede 2 m nicht überschreiten. Im engeren Versuchsfeld betragen die Höhendifferenzen nirgends mehr als 1 m.

Trotz der verhältnismäßig günstigen Lage ergaben sich bei Durchsicht der Auswertungen dennoch verschiedentlich Einflüsse dieser so geringen Höhenunterschiede auf die Verteilung der Lufttemperatur in Bodennähe. Auch die an der Ostecke gelegenen Schanzen, die das Versuchsgelände um 4—5 m überragen, hatten Einfluß auf die Temperaturgestaltung, da sie als Windfang wirkten.

Längs eines von Nordwest nach Südost verlaufenden Feldweges lagen die für die drei Ofentypen vorgesehenen Einzelfelder in gleichen Abständen voneinander entfernt (Abb. 108). Jedes Einzelfeld hatte eine Ausdehnung von  $70 \times 70$  m, war also rund 0,5 ha groß. Die Abstände der quadratischen Heizfelder voneinander betragen gleichfalls 70 m.

Auf dem Einzelfeld I in der Nähe der Schanzen standen die Burger-Öfen mit S-förmig gebogenem Deckel. Auf das mittlere Feld II wurden die Monos-Öfen mit Kegeleinsatz gestellt. Feld III wurde mit den Domänenöfen mit einem Löcherkranz in halber Höhe beschickt.

Auf jedes Einzelfeld entfielen 121 Öfen und 20 Temperaturmeßstellen (Abb. 109). Da die Wirkung der Öfen bei Aufstellung in verschiedenen Abständen ermittelt werden sollte, mußten für den Versuch Anhaltspunkte zur raschen Umstellung der Öfen und Thermometer geschaffen werden. Zu diesem Zwecke wurde einmal jedes einzelne Heizfeld nochmals in vier Quadranten unterteilt, von denen jeder eine Arbeitseinheit in Bezug auf die Verteilung der Öfen wie der Thermometer und deren Betreuung darstellte. Es wurden nun weiter in jedem Feld zunächst 121 Pflöcke eingemessen, die nach beiden Richtungen hin 7 m Abstand hatten. Unter Festhaltung des Mittelpunktes wurde sodann ein zweites System von Pflöcken eingemessen, die 6 m voneinander entfernt waren. Diese Pflöcke erhielten nach dem Einschlagen weiße Fähnchen. Schließlich war noch ein drittes System mit ebenfalls 121 Pflöcken vorgesehen, die 5 m Abstand hatten und mit roten Fähnchen versehen wurden.

Zur Beobachtung der Temperaturen in Vegetationshöhe standen in jedem Quadranten 5, in jedem einzelnen Heizfeld also 20 ungeschützte Alkoholminimumthermometer 50 cm hoch über der Bodenfläche (Diagonalaufstellung) (Abb. 109).

Bei der Umstellung der Öfen mußte natürlich jedesmal auch die Aufstellung der Thermometer geändert werden. Deshalb war jeder Quadrant schon von vorneherein mit 15 Thermometerpfählen versehen worden. Die Lage der Pfähle war in einem besonderen Plan eingezeichnet, der jedem Ableser vor dem Versuch ausgehändigt wurde (Abb. 109). Jeder einzelne Pfahl hatte seine Nummer, so daß bei dem Umstecken der Thermometer keine Verwechslungen vorkommen konnten.

Außer den Temperaturmeßstellen in 50 cm Bodenabstand über dem gesamten Versuchsfeld wurde inmitten des Mittelfeldes eine besondere Station eingerichtet, deren Meßreihen die Temperaturerhöhung der Luft (geschützte Thermometer) und der Pflanzenorgane (ungeschützte Thermometer) sowohl in verschiedener Höhe über dem Boden als auch in verschiedenem Ofenabstand ermitteln sollten. Diese Beobachtungen wurden noch ergänzt durch Strahlungs-, Feuchte- und Windmessungen.

Für die Bedienung der Öfen und Ablesung der Thermometer, für die Beaufsichtigung der Hilfskräfte und für Sonderaufgaben, wie Einzelmessungen und Befehlsübermittlung, war eine Reihe von Helfern notwendig. Damit das Umstellen der Öfen und Umstecken der Thermometer rasch und sicher durchgeführt werden konnte, waren

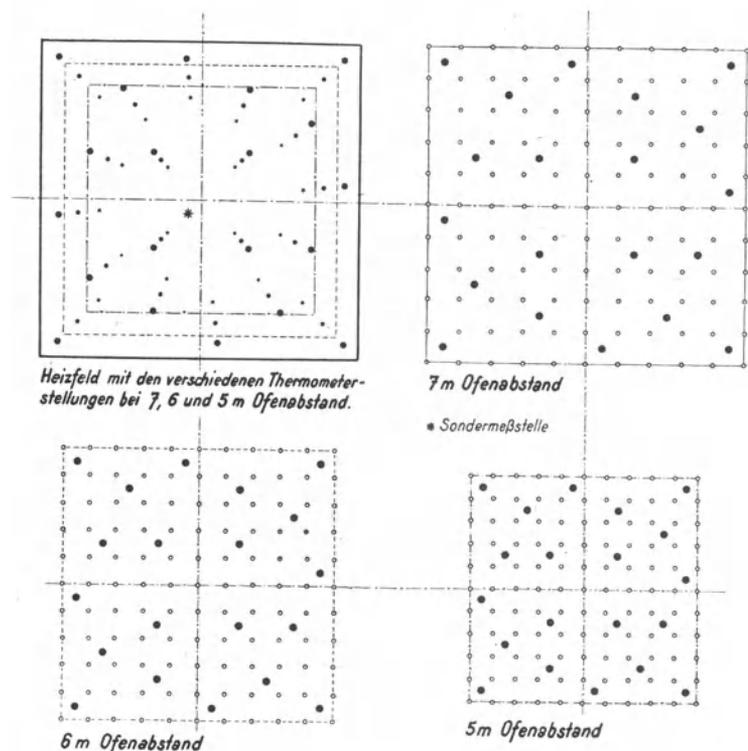


Abb. 109. Aufstellungsplan für Öfen und Thermometer zum Heizversuch mit drei Ofentypen.

die Einzelfelder in die schon oben angedeuteten vier Quadranten eingeteilt. Für jeden Quadranten standen vier Mann zur Verfügung: ein Mann hatte die Aufsicht, zwei bedienten die Öfen, einer las die Thermometer ab und steckte sie nach der jeweils letzten Messung vor der nächsten Umstellung der Öfen in die entsprechenden Halter. Der Aufsichtsführende erhielt jeweils einen genauen Plan von seinem Quadranten, in welchem die drei Systeme der Pflöcke maßstäblich eingetragen waren. Außerdem enthielt der Plan auch die Wege, die bei der Umstellung der Öfen wie der der Thermometer einzuhalten waren. Für die zwölf Quadranten der drei Felder waren daher zusammen 12 Unterführer, 24 Mann zur Bedienung der Öfen und 12 Mann für das Ablesen der Thermometer, insgesamt also 48 Mann, vorgesehen. Außerdem erhielt jedes Feld noch einen besonderen Führer. Für die beiden Zwischenfelder wurden je zwei Beobachter, für jede der beiden Schmalseiten am Außenrand der Heizfelder jeweils ein Beobachter, insgesamt also sechs Mann, eingesetzt. Auf der Luvseite und auf der Leeseite des Versuchsfeldes standen je vier Beobachter; jedem dieser Beobachter wurden fünf Thermometer zugeteilt. Es waren also 65 Mann und 130 Thermometer erforderlich.

Jeder Ofen enthielt außer der üblichen Anzündmasse sechs Briketts.

An einem Eckpunkt jedes Quadranten lagen die Brikettvorräte, aus denen das Material zum Nachfüllen genommen werden konnte. In der Regel erhielt jeder Ofen nach Ablauf einer halben Stunde zwei Briketts, die mit Hotten an die Öfen herangetragen wurden.

Der Versuch begann mit Ofenabständen von  $7 \times 7$  m. Auf Grund der viertelstündlichen Ablesungen wurden Isothermen gezeichnet, die bei diesem Versuch wegen der gleichmäßigen Verteilung der Thermometer besonders gut waren (Abb. 108). Um 22 Uhr 15 liegen die natürlichen Isothermen vor dem Anzünden ziemlich regellos über dem Versuchsfeld. Die gemessenen Temperaturen schwanken zwischen 3 und 5 Grad und liegen also im äußersten Falle 2 Grad auseinander. Obwohl Höhenunterschiede von 2 m vorhanden sind, halten sich die Temperaturunterschiede im allgemeinen in mäßigen Grenzen. Die stellenweise vorkommenden Temperaturgegensätze auf kleinen Entfernungen sind wohl auf eng begrenzte Geländeunebenheiten und verschiedenartige Beschaffenheit der Bodenoberfläche in Bezug auf Grasnarbe und Feuchtigkeit zurückzuführen. Der herrschende Nordwind von 1—2 m/sec verhinderte jedenfalls eine stärkere Schichtung der Luft in Bodennähe.

Sofort nach der Ablesung um 22 Uhr 15 wurden die Öfen in allen drei Feldern gleichzeitig angesteckt. Um 22 Uhr 30 wurden Temperaturen von über 6 Grad gemessen. Die Wärmezentren sind jeweils mit dem Wind aus der Mitte des Feldes nach der Südecke hin verschoben. Die Zwischenfelder heben sich als kalte Zonen ab. Der rasche Temperaturanstieg beruht darauf, daß die in jedem Ofen enthaltene Anzündmasse sofort mit lebhafter Flamme verbrennt und dabei erhebliche Wärmemengen an die Umgebung abgibt.

Um 23 Uhr 00 sind die Öfen schon recht gleichmäßig in Brand. Zwar ist Feld III im ganzen etwa 1 Grad kälter als die beiden anderen Felder, doch nimmt später die Wärmeentwicklung auch über diesem Feld einen günstigeren Verlauf, so daß es sich nicht mehr wesentlich von den anderen Feldern unterscheidet. Besonders interessant ist die schlauchartige Ausbuchtung der 4 Grad-Isotherme über Feld II (Abb. 108), die wohl das Einsetzen einer Wirbelbildung vermuten läßt. Die Temperaturen sind inzwischen an der kältesten Stelle nördlich der Schanzen unter 2 Grad gesunken.

Durch das Zusammenrücken der Öfen von 7 m Abstand auf 6 m, das kurz nach 23 Uhr 45 erfolgte, trat keine merkliche Temperaturerhöhung in 50 cm Bodenabstand ein. Auf der Karte von 00 Uhr 00 macht sich jedoch das Drehen des Windes von Nord auf Ost deutlich bemerkbar. Im Zusammenhang damit erscheint das Feld III gegenüber den beiden anderen etwas begünstigt; überhaupt ist eine gegenseitige Beeinflussung der Heizfelder wiederholt zu beobachten, obwohl von vornherein darauf Bedacht genommen war, die Felder weit auseinander zu legen und so zu orientieren, daß bei den in Frostnächten vorkommenden Winden eine Beeinflussung möglichst vermieden wurde. Bei vorübergehender Windstille liegen die Wärmekerne jeweils in der Nähe der Feldmitten.

Erst die zwischen 00 Uhr 45 und 01 Uhr 00 vorgenommene Verringerung des Ofenabstandes auf 5 m läßt eine merkliche Zunahme des Temperaturunterschiedes innen gegen außen erkennen. Vor allem wachsen aber infolge der Schrumpfung des eigentlichen Heizfeldes und der damit verbundenen Vergrößerung der Außenzonen die Gradienten in dem Grenzgebiet zwischen beheizter und unbeheizter Fläche. Bei dem Rückstellen der Öfen auf 7 m nehmen die Isothermen wieder die ursprüngliche, weiter auseinandergesogene Lage ein.

Wenn man die an sich geringfügigen Geländeunterschiede und die gegenseitige Beeinflussung der Heizfelder berücksichtigt, kann von einem unterschiedlichen Verhalten der drei Ofentypen nicht gesprochen werden. Die durchschnittliche Minimalerhöhung der Temperatur (Thermometer in Diagonalaufstellung) beträgt 2 Grad. Im Falle der engsten Aufstellung kommen Effekte bis zu 3 Grad vor.

In der Mitte des Feldes II war im Schnittpunkt der Diagonalen eines Ofenquadrates eine Meßplatte aufgestellt, an der in 50, 100 und 200 cm Höhe je ein ungeschütztes Minimumthermometer angebracht war. In Abbildung 110

ist der Verlauf der Temperaturen an diesen drei Thermometern dargestellt. Zunächst läßt sich die stärkere Erwärmung der beiden oberen Thermometer erkennen. Die Werte des untersten Thermometers liegen oft bis 1 Grad tiefer als die des mittleren. Das oberste Thermometer zeigt meist höhere Werte als das mittlere, doch weichen seine Temperaturen im allgemeinen nur wenig von denen des mittleren Thermometers ab.

Wie im Falle der Ölofenheizung, haben wir also auch bei der Brikettöfenheizung mit einer größeren Höherstreckung der Wärmewirkung zu rechnen. Allerdings scheint bei den Brikettöfen im Gegensatz zu den Ölofen der größte Effekt bereits in einer Höhe von 2 m zu liegen.

Um den Ofen, der genau in der Mitte des Feldes II stand und der daher bei der Umstellung nicht bewegt wurde, waren jeweils ein ungeschütztes und ein geschütztes Thermometer in Abständen von 50, 100 und 200 cm

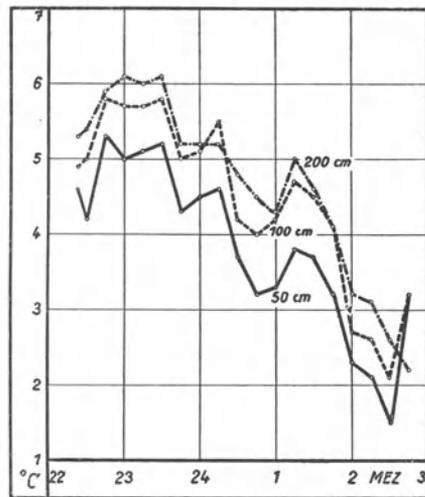


Abb. 110. Temperaturverlauf an drei vertikal gestaffelten Thermometern im Heizfeld.

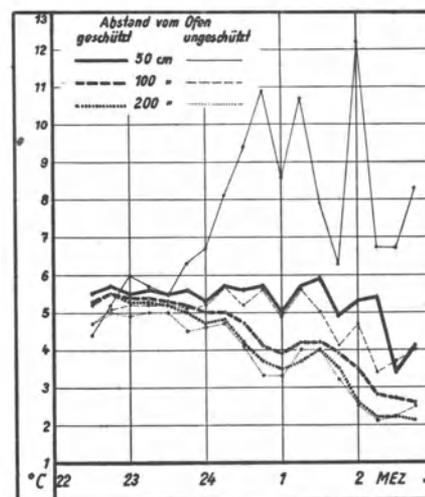


Abb. 111. Temperaturverlauf an drei horizontal gestaffelten Thermometern in der Nähe des zentralen Ofens. (Die dick ausgezogenen Kurven beziehen sich auf die Angaben der strahlungsgeschützten Thermometer.)

aufgestellt. Die Höhe dieser Thermometer über dem Boden betrug wiederum 50 cm. Der Strahlungsschutz bestand aus einer dünnen vernickelten Messinghülle mit Belüftungslöchern. Während also die an den ungeschützten Thermometern abgelesenen Werte einen Maßstab für die Einwirkung der Ofenstrahlung auf die Pflanzenorgane abgaben, lieferten die Werte der geschützten Thermometer annähernd die wahren Lufttemperaturen. Wie die Abbildung 111 zeigt, liegen die an den ungeschützten Thermometern abgelesenen Temperaturen in der Nähe des Ofens nicht nur erheblich über denen der entfernteren Thermometer, sondern sie sind auch den stärksten Schwankungen unterworfen. Diese Schwankungen kommen an den näher wie an den entfernter stehenden Thermometern in fast gleichem Rhythmus und Sinne zum Ausdruck. Die höchste Temperatur, die in 50 cm Abstand abgelesen wurde, betrug 12,1 Grad.

Die Temperaturkurven, die den an den geschützten Thermometern abgelesenen Werten entsprechen, wurden mit dickeren Strichen gleichfalls in die Abbildung 111 eingezeichnet, wodurch ein unmittelbarer Vergleich mit den Werten der ungeschützten Thermometer ermöglicht wird. Nach dieser Darstellung haben in 200 cm Abstand vom Ofen beide Thermometer gleiche Temperaturen. Schon in 100 cm Abstand treten deutliche Temperaturunterschiede zwischen geschützt und ungeschützt auf, die zeitweise Beträge von 2 Grad annehmen. Am größten ist der Unterschied naturgemäß an den ofennahen Thermometern; hier kommen Differenzen bis zu 7 Grad vor.

Um den Einfluß des Windes auf die Verschiebung der Wärmekerne innerhalb der Heizfelder und eine etwaige Beeinflussung der Zwischen- und Außenfelder besonders anschaulich darzustellen, wurden durch alle drei Heizfelder Schnitte gelegt, wobei als Schnittrichtung jeweils die Verbindungslinie zwischen Feldmitte und Schwerpunkt des Hauptwärmekernes gewählt wurde (Abb. 112 a, b). Diese Schnitte fielen annähernd mit der Windrichtung zusammen. Für genaue Schnitte in Windrichtung hätte die letztere in jedem Feld und an den Außenseiten dauernd verfolgt werden müssen; dies war jedoch wegen Personalmangels nicht durchführbar. Deswegen mußte auch auf die an sich interessante Untersuchung, inwieweit die tatsächliche Verlagerung des Wärmeschwerpunktes von der Windrichtung abwich, verzichtet werden. Eine solche Untersuchung hätte sicherlich Rückschlüsse auf Art und Stärke etwaiger Wirbelbildung zugelassen.

Zur Darstellung der zu diesen Schnitten gehörenden Temperaturkurven wurden die zu beiden Seiten der

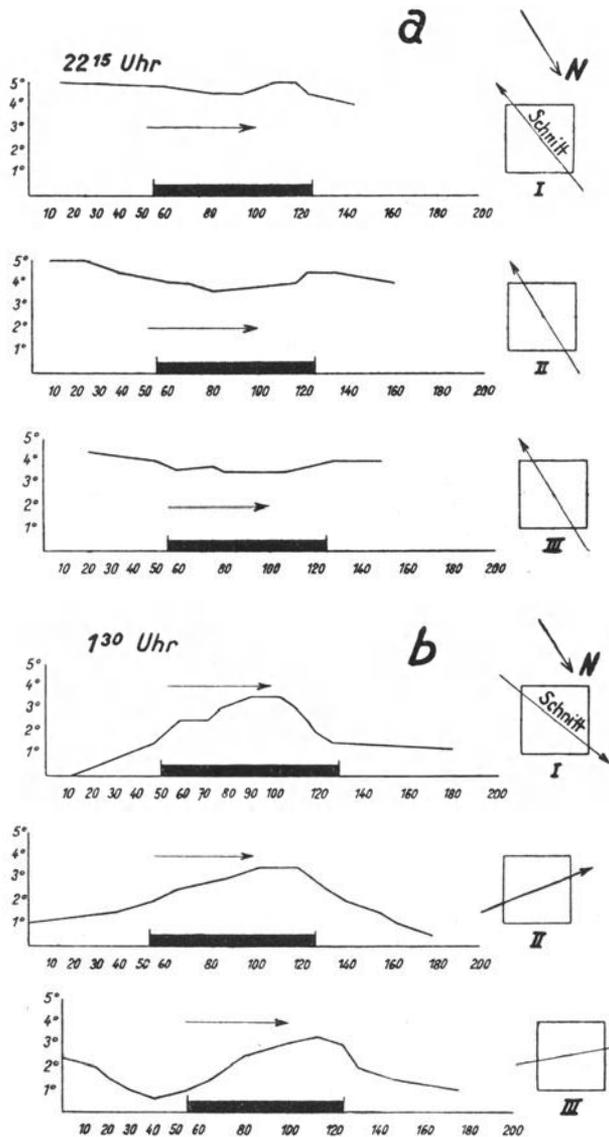


Abb. 112. Temperaturprofile über den drei Heizfeldern. a) Vor dem Anzünden. — b) Während der Heizung.

konnte überdies nachgewiesen werden, daß sie durch Ausstrahlung rund doppelt so viel Wärme nach der Seite abgaben als die anderen Öfen (siehe Seite 167).

Schnittlinie gelegenen Temperaturwerte paarweise gemittelt, so daß übermäßige Temperaturschwankungen etwas ausgeglichen werden konnten. Es wurden aber zu dieser Mittelbildung nur die in nächster Nähe der Schnittlinie gelegenen Thermometer herangezogen.

Aus den zahlreichen Temperaturprofilen sollen hier nur die von 22 Uhr 15 und von 01 Uhr 30 herausgegriffen werden. Die Temperaturprofile von 22 Uhr 15 (Abb. 112a) zeigen die schon erwähnte ziemlich gleichmäßige Verteilung der Temperatur vor Beginn der Heizung, wobei allerdings stellenweise auf kleinen Entfernungen Abweichungen auftreten. Nach dem Anzünden der Öfen zeigen sich zwischen beheizten und unbeheizten Feldern starke Unterschiede (Abb. 112b). Die Stelle der höchsten Temperatur ist jeweils von der Feldmitte in ungefährer Richtung des Windes gegen den Rand des Heizfeldes zu verschoben; ein Teil der Warmluft wird auch auf das angrenzende unbeheizte Gebiet verweht.

Des weiteren wurden zur Darstellung der Heizwirkung nach derselben Methode auch Temperaturschnitte durch die Mittellinie der drei Versuchsfelder gelegt; vergleichsweise zu diesen Temperaturprofilen längs der Hauptachse des Versuchsfeldes wurde das Geländeprofil in zehnfacher Überhöhung gezeichnet (Abb. 113). Dieses Geländeprofil läßt die etwas höhere Lage des Feldes I, die Mulde mit dem Feld II und den schwach geneigten Hang in Feld III erkennen. Diese Temperaturprofile zeigen das bei Besprechung der Isothermenkarte Gesagte in anderer, anschaulicher Form.

Die Zusammenfassung der Beobachtungen ergibt, daß zwischen den drei verschiedenen Ofentypen hinsichtlich der Heizwirkung wesentliche Unterschiede nicht bestehen. Es konnte jedoch festgestellt werden, daß die Domänenöfen etwas langsamer in Gang kamen; allerdings verwischten sich im Laufe der Zeit die Unterschiede vollkommen. Die Monos-Öfen zeichneten sich dadurch aus, daß sie besonders rasch in volle Glut kamen. Durch Messungen mit dem Ferneffektiv-Aktinometer

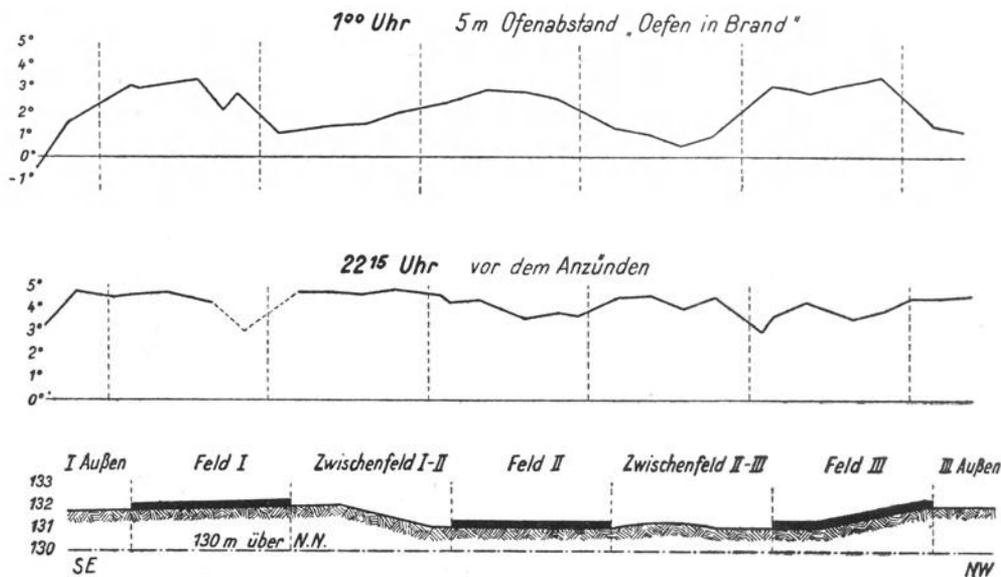


Abb. 113. Temperatur- und Geländeprofil durch das gesamte Versuchsfeld.

In Bezug auf die praktische Handhabung ergab sich, daß das Nachfüllen der Burger-Öfen mit großen Schwierigkeiten verbunden war, da die heißen Deckel nur mit Mühe abgehoben werden konnten. Eine erhöhte Heizwirkung auf die bodennahe Luftschicht, die durch die S-förmige Ausbildung der Deckel angestrebt wurde, konnte nicht beobachtet werden.

Im großen und ganzen kann aus den Messungen gefolgert werden, daß mit einem Ofenabstand von 5—7 m bei schwachem Wind und klarem Himmel in Vegetationshöhe (50 cm) zumindest eine Temperaturerhöhung von 2—3 Grad erreicht wird. Dieser Wert gilt für das eigentliche Wärmezentrum, während die Werte der Randzonen je nach Lage zur Windrichtung mehr oder weniger darunter liegen. In der Praxis müßten also die Öfen am Rand der Heizfelder dichter gestellt werden. An allen anderen Punkten des Versuchsfeldes nehmen die Temperaturen höhere Werte an, da die Thermometer ja absichtlich an den Stellen aufgestellt waren, die am weitesten von den Öfen entfernt lagen. Aus den Messungen mit geschützten Thermometern in verschiedenem Ofenabstand ergeben sich bei Entfernungen von 50 cm um 2—3 Grad höhere Lufttemperaturen als in der Mitte eines Ofenquadrates (Abstand 3,5—5 m). In derselben Entfernung von 50 cm steigen die Temperaturwerte an ungeschützten Thermometern, die sich gegenüber der Ofenstrahlung ähnlich wie die Pflanzenorgane verhalten, bei Außentemperaturen in Gefrierpunktsnähe zeitweilig bis auf 12 Grad an. Aus den Temperaturmessungen in verschiedenen Höhen ergibt sich, daß die Luftschicht zwischen 1 und 2 m Höhe gegenüber dem 50 cm-Niveau in Bezug auf Erwärmung besser abschneidet. —

Auf dem Weingut Salm bei Saarburg sollte in der Nacht vom 2./3. Mai 1935 die Heizwirkung der Brikettöfen in einer ausgesprochenen Hanglage untersucht werden.

Der zum Versuch ausgewählte Weinbergshang liegt in einem Seitental der Saar, durch das der Leukbach an dieser Stelle von Südwest nach Nordost fließt. Das Tal selbst stellt ein großes Einzugsgebiet für Kaltluft dar, die sich über den freien, höher gelegenen Feldern bei Perdenbach und Trassem in klaren Nächten bildet. Der Kaltluftstrom fließt in solchen Nächten gegen den unteren Teil des Weinbergs, welcher quer zur Hauptachse des Einzugsgebietes liegt, und erfährt dort eine Anstauung.

Nach Maßgabe des Lageplans befand sich das eigentliche Versuchsgelände (Weinberg mit Pfahlerziehung) bei einer Ausdehnung von rd. 200×100 m auf einem steilen Westhang. Die untere Mauer des Weinbergs liegt bei etwa 170 m Meereshöhe rund 5 m über der Talsohle. Das Versuchsgelände steigt von hier mit etwa 25 Grad Neigung an.

Für den Heizversuch gelangten in Richtung der Längsseite des Versuchsfeldes insgesamt sieben Ofenreihen (I—VII) zur Aufstellung (Abb. 114 und 198, Tafel 7). Die unterste Reihe (I) verlief der unteren Grenzmauer entlang; die Öfen standen hier in Abständen von vier Stock (Stockabstand etwa 1,10 m). In der II. Reihe, die fünf Zeilen darüber lag, standen die Öfen fünf Stock auseinander; die Öfen der III. Reihe waren in gleichem Abstand aufgestellt. Die Öfen der hangaufwärts gelegenen IV. bis VII. Reihe hatten jeweils innerhalb der Reihe einen gegenseitigen Abstand von sechs Stock, doch wurden die einzelnen Ofenreihen nach oben hin weiter voneinander gezogen (bis zu neun Stock).

In der unbeheizten Zone standen drei Thermometer unten am Bach, vier am Wiesenhang und neun auf dem oberen Weinbergspfad oberhalb des beheizten Feldes. Im eigentlichen Heizfeld waren die Thermometer reihenweise aufgestellt, in der untersten Reihe an der Mauer befanden sich neun, in der zweiten Reihe dreizehn und in der dritten zwölf Thermometer (Diagonalaufstellung in 50 cm Höhe).

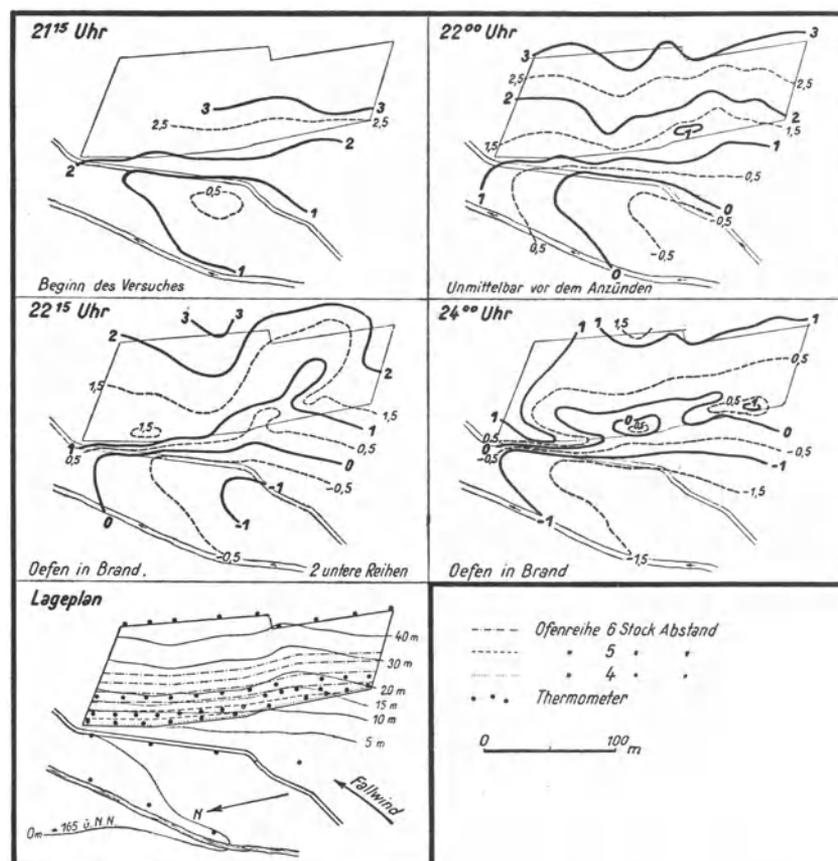


Abb. 114. Isothermen zum Heizversuch mit Brikettheizöfen. Saarburg (Weingut Salm), 2./3. Mai 1935.

Auf Grund der um 20 Uhr 15 beginnenden Ablesungen wurden für jede Viertelstunde Isothermenkarten gezeichnet; sie zeigen deutlich, wie andauernd Kaltluft aus dem oberen Tal herabfließt und am Fuße des Weinberges infolge der dort vorhandenen Verengung des Tälchens gestaut wird. Die höhere Hanglage erweist sich von vorneherein als wärmer im Vergleich zu den tieferen Lagen. Die Unterschiede zwischen Talsohle und mittlerer Hanglage bewegen sich um 3 Grad. Um 22 Uhr 00, als die letzte Ablesung vor dem Anzünden der Öfen stattfand, sind die Temperaturen in Vegetationshöhe (50 cm) auf der Wiese größtenteils bereits unter 0 Grad gesunken (Abb. 114). Am Hang selbst verlaufen die Isothermen, von einigen Ausbuchtungen abgesehen, annähernd parallel zu den Höhenlinien, die in der Darstellung auf 165 m Meereshöhe als Nulllinie bezogen wiedergegeben sind.

Als um 22 Uhr 15 die Öfen der beiden unteren Reihen angezündet sind, macht sich in der Mitte des Weinbergs immer noch der Kaltluftstau bemerkbar. Durch die vom oberen Leukbachtal herunterfließende Kaltluft wird der normale Isothermenverlauf am Hang dauernd gestört. Diese Störung durch das Anbränden der Kaltluft wird noch dadurch begünstigt, daß der Hang gerade an der Aufprallstelle eine kleine Mulde aufweist.

Bis gegen Mitternacht läßt sich eine wesentliche Temperaturerhöhung nicht feststellen. Das Ausbleiben der Heizwirkung ist jedoch auf das mangelhafte Funktionieren der Öfen infolge unsachgemäßer Bedienung mit ungeschultem Personal zurückzuführen. Fast die Hälfte der Öfen war in der Zwischenzeit ausgegangen und mußte neu in Brand gesetzt werden. Beim Einfüllen war nämlich die Zugabe von Rohnaphtalin versäumt worden; die Holzwolle allein reichte zur Entzündung der Briketts nicht aus. Durch wiederholtes Nachlegen gelang es, die Minimaltemperatur auch in den unteren Weinbergslagen meist noch eben über dem Gefrierpunkt zu halten.

Um den Verlauf der Temperaturen in den verschiedenen Lagen am Hang besser übersehen zu können, wurden die innerhalb der sechs Thermometerreihen gemessenen Temperaturen für jeden Ablesungstermin gemittelt und die so erhaltenen Mittelwerte in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen (Abb. 115).

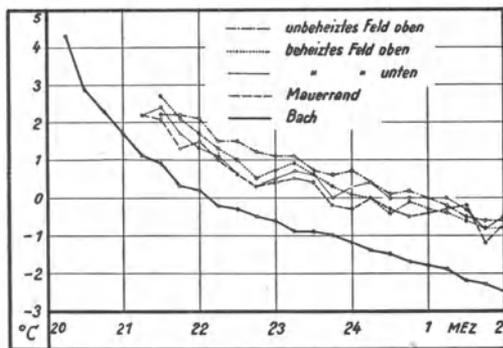


Abb. 115. Mittlerer Temperaturverlauf von fünf Thermometerreihen in verschiedener Hanghöhe.

Die Kurven für Bach und Wiese unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Der Temperaturverlauf am Bachrand beginnt mit 4,2 Grad um 20 Uhr 15, unterschreitet kurz nach 22 Uhr 00 den Gefrierpunkt und erreicht bei allmählichem Absinken um 02 Uhr 00 den Wert  $-2,5$  Grad. Die Mittelwerte für den Mauerrand liegen bis 23 Uhr 30 über, später unter 0 Grad. Als tiefster Wert wird  $-1,2$  Grad erreicht. Die zweitunterste durch das Heizfeld verlaufende Thermometerreihe liefert bis 00 Uhr 30 positive Werte; von dieser Zeit an verläuft die Kurve bis 01 Uhr 15 in der Nähe der Nulllinie, um späterhin auch negative Werte bis zu  $-0,6$  Grad anzunehmen. Die weiter oben durch das Heizfeld laufende Thermometerreihe liefert bereits ab 00 Uhr 15 Mittelwerte unter 0 Grad.

Die oberste Thermometerreihe gibt im Mittel erst nach 01 Uhr negative Werte; außer der Begünstigung infolge der oberen Hanglage kommt dieser Reihe offenbar auch der von den Öfen aufsteigende Warmluftstrom zugute.

Zwischen dem Leukbach und dem unteren Rand des Weinberges war auf der Wiese eine besondere Beobachtungsstation errichtet worden, an der außer einer Meßlatte mit vier ungeschützten Alkoholminimumthermometern in 25, 50, 100 und 200 cm Höhe auch ein Aßmann\*) in 150 cm Höhe, ein Schalenkreuzanemometer in 200 cm Höhe und ein Tulipan aufgestellt waren.

Während das tiefste der gestaffelten Thermometer in 25 cm Höhe die tiefsten Temperaturen anzeigte, die zu Beginn der Beobachtung um 22 Uhr 30 schon auf  $-1$  Grad gefallen waren, konnten die relativ höchsten Temperaturen an dem 100 cm hohen Thermometer abgelesen werden, wo die Werte von 0,4 Grad um 22 Uhr 30 bis  $-1,5$  Grad um 02 Uhr 00 allmählich absinken (Abb. 116). In größerer Höhe sind die Temperaturen wieder tiefer, so daß die 200 cm-Werte bis 01 Uhr 00 zwischen denen von 50 und 100 cm liegen. Diese deutliche Bodeninversion wird später durch den anschwellenden Bergwind wieder verwischt.

Die mit dem Aßmann gemessene Lufttemperatur in 150 cm Höhe nimmt einen ruhigeren Verlauf als die ungeschützten Minimumthermometer, die auf Schwankungen der Dunstdichte reagieren. Die Werte liegen insgesamt um etwa 1 Grad höher als die entsprechenden Werte an den ungeschützten Minimumthermometern.

Die absolute Luftfeuchte geht, wie wir es bei fast allen unseren Versuchen beobachten konnten, während der Nacht erheblich zurück. Innerhalb von vier Stunden ist ein Rückgang von 4,5 auf 3,9 mm QS, also um rund 15 % festzustellen. Entsprechend geht auch der Taupunkt von  $-0,1$  Grad auf  $-2,1$  Grad zurück. Hieraus ersieht man, wie vorsichtig man mit Folgerungen aus Taupunktmessungen selbst an Ort und Stelle in Bezug auf die zu erwartende Minimumtemperatur sein muß.

\*) Aspirations-Psychrometer nach Aßmann.

In 2 m Höhe über der Talsohle beträgt die Windstärke vor Mitternacht bei größeren Schwankungen im Mittel etwas mehr als 0,5 m/sec. Nach der mitternächtlichen Windruhe steigen die Werte langsam wieder an, überschreiten aber bis zu Ende des Versuchs nur wenig 0,5 m/sec.

Die mit dem Tulipan gemessenen Intensitätswerte der Ausstrahlung bewegen sich um einen mittleren Wert von  $0,12 \text{ gcal/cm}^2 \cdot \text{min}$ . Die Schwankungen zwischen 0,07 und 0,19 sind wohl auf Kondensationserscheinungen in der Luft zurückzuführen, die mit bloßem Auge kaum wahrgenommen werden können.

Auf Grund der Erfahrungen, die bei früheren Versuchen, insbesondere bei dem großen vergleichenden Heizversuch Serrig mit verschiedenen Heizverfahren im Frühjahr 1934 gewonnen worden waren, wurde von vornherein der Versuch in Saarbürg als schwierig erachtet.

Die Geländestelle des Versuchs Saarbürg, welche als Hanglage im Aufprall eines Kaltluftstromes angesprochen werden muß, war von uns als schwierigster Fall der Frostschadenbekämpfung erkannt worden. Infolgedessen war bei der Aufstellung der Heizöfen schon darauf Rücksicht genommen, daß an dieser Stelle größere Kaltluftmassen als in anderen Fällen durch die Heizung weggeschafft werden mußten. Die Isothermenkarten ergeben nun trotz der vorsorglich engeren Aufstellung der Öfen einen mangelhaften Erfolg der Heizung, der seiner Grund allerdings zum Teil in der schlechten technischen Durchführung der Heizung findet.

Eine Temperaturerhöhung tritt in dem vorliegenden Fall vor allem deshalb in so geringem Maße in Erscheinung, weil infolge der andauernd nachfließenden Kaltluft Störungen mannigfacher Art auftreten. Immer wieder werden neue Kaltluftmassen herangebracht, die sich unter die vorhandene wärmere Luft schieben; dieser Vorgang erfolgt vielfach periodisch.

Die Tatsache, daß der beheizte Weinberg während dieser Nacht von Frostschäden verschont blieb, während der 150 m Luftlinie davon entfernt liegende Weinberg eines anderen Besitzers unter günstigeren Geländebedingungen sehr starke Frostschäden aufzuweisen hatte, kann nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Versuchsfrage als nicht völlig gelöst betrachtet werden muß. Einige erfrorene Spitzen innerhalb des beheizten Feldes deuten darauf hin, daß auch hier die kritische Temperatur erreicht war. Nur um wenig mächtigere Kaltluftmassen oder etwas niedrigere Temperaturen derselben wären bei dieser Art der Versuchsanordnung nicht mehr erfolgreich zu bekämpfen gewesen.

In der Nacht vom 3./4. März 1937 wurde in Avelsbach ein Vergleich der Mauser-Öfen (siehe Seite 155) mit den gebräuchlichen Domänenöfen (Typ Monos ohne Kegeleinsatz) durchgeführt. Dazu waren jeweils 20 Öfen des gleichen Modells in 7 m Abstand voneinander im Viereck aufgestellt. Die Versuchsfläche lag im Grunde des Avelertals. Die Öfen wurden, wie üblich, mit  $1/2 \text{ kg}$  Naphtalin und sechs Braunkohlenbriketts beschickt; nach jeweils einer Stunde wurden je Ofen zwei Briketts nachgelegt. Da der Wind andauernd talabwärts wehte und die beiden zu vergleichenden Heizflächen quer zur Talachse nebeneinander lagen, war eine gegenseitige Beeinflussung nicht zu erwarten. Zur Beseitigung etwaiger kleiner Einflüsse des Geländes haben wir dann bei der Beurteilung die Differenzen der Temperaturmittel des einzelnen Heizfeldes gegen die entsprechende Außenzone herangezogen. Der zeitliche Verlauf der beiden mittleren Differenzreihen ist in Abbildung 117 kurvenmäßig wiedergegeben. Danach kann man auf einen wesentlichen Unterschied im Temperatureffekt zwischen diesen beiden Ofentypen nicht schließen.

Im praktischen Betrieb konnte aber folgendes als Hauptmangel der Mauser-Öfen festgestellt werden. Einmal saßen die Deckel derart fest auf den Öfen, daß sie, zumal in heißem Zustand, sogar mit der eigens dafür vorgesehenen Zange nur sehr schwer, in einem Falle sogar überhaupt nicht abgenommen werden konnten. Daher beanspruchte das Nachlegen eine bedeutend längere Zeit; während die 20 Domänen-Öfen in etwa fünf Minuten neu beschickt waren, brauchte man für die Mauser-Öfen die doppelte Zeit. Ferner war der zur Regulierung der Heizleistung vorgesehene Ring derart schwer zu verstellen, daß während des Versuches eine Änderung nicht vorgenommen werden konnte. Die Öfen brannten also dauernd mit maximaler Leistung.

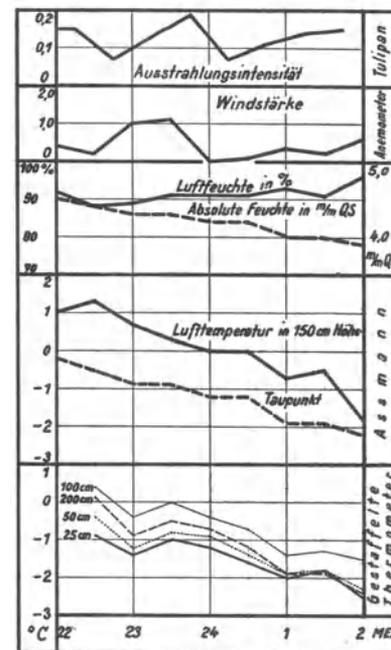


Abb. 116. Temperaturverlauf in vier verschiedenen Bodenabständen über der Talsohle; Verlauf der Luftfeuchte, Windstärke und Ausstrahlung.

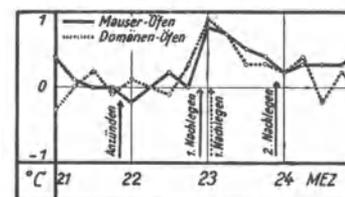


Abb. 117. Verlauf des viertelstündlichen Temperaturmittels im Heizfeld der „Mauser-“ und der Domänenöfen.

## e) Kombiniertes Heizen und Räuchern.

Auf den flachen Wiesen der „Auswendigen Äcker“ bei Oppenheim am Rhein gegenüber dem Ried, auf denen auch die ersten Versuche zur Geländeheizung mit Ölöfen und offen ausgelegten Briketts stattgefunden hatten, wurde Ende Februar 1930 in Gemeinschaft mit der Hessischen Lehr- und Versuchsanstalt für Weinbau in Oppenheim eine Primitivheizung mit Naphtalin versucht. Eine Fläche von 100 auf 80 m, die nur kleine Unebenheiten aufwies, wurde derart mit Feuerstellen überdeckt, daß auf je 25 m<sup>2</sup> ein Feuer zu liegen kam (Abb. 118).

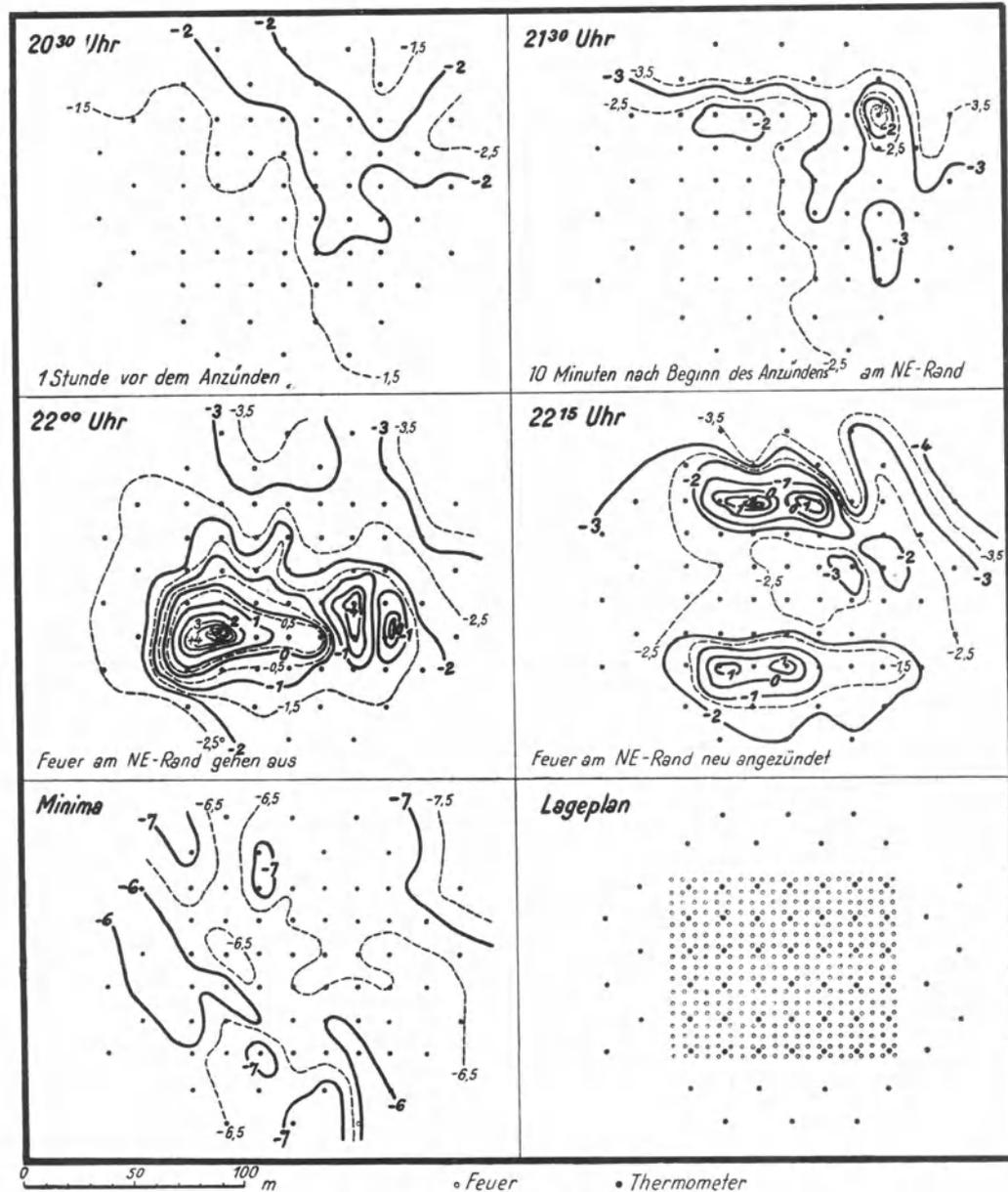


Abb. 118. Isothermen zum kombinierten Heiz- und Räucherversuch mit Naphtalin.  
Oppenheim, 19./20. Februar 1930.

Als Brennmaterial fand Rohnaphtalin Verwendung. Jede Feuerstelle bestand aus einem Häufchen von 1 kg Naphtalin.

In dem eigentlichen Heizfeld standen 42 Thermometer in der genormten Höhe von 50 cm (Diagonalaufstellung). Die unbeheizte Zone wurde durch 26 Thermometer überwacht.

Von den auf Grund der viertelstündlichen Ablesungen gewonnenen Isothermenkarten sind in Abbildung 118 fünf wiedergegeben. Die Isothermenkarte von 20 Uhr 30 stellt die natürliche Temperaturverteilung über dem Versuchsfeld eine Stunde vor dem Anzünden der Feuer dar. Es treten Temperaturunterschiede innerhalb der engeren Versuchsfläche bis zu 1 Grad auf, wobei die Nordost-Ecke mit  $-2,5$  Grad am kältesten erscheint. An dieser Ecke wurde kurz vor 21 Uhr 30 mit dem Anzünden begonnen.

Die Isothermenkarte von 21 Uhr 30 zeigt den Anfang der Erwärmung, die an der NE-Ecke mit 2 Grad zu bewerten ist. Um 22 Uhr sind die zuerst angezündeten Feuer bereits erloschen, so daß am Nordrand der Fläche eine starke Abkühlung zu verzeichnen ist. Gleichzeitig erreicht der Kern des Wärmegebietes an der Südwestecke Werte bis zu +6 Grad gegenüber -3 Grad Außentemperatur. Kurz nach 22 Uhr wurde von der Nordseite her erneut Naphtalin nachgelegt und angesteckt. Die nächstfolgende Ablesung ergibt Temperaturerhöhungen von 3 bis 5 Grad. Schließlich läßt sich an Hand der letzten Isothermenkarte auf Abbildung 118 erkennen, daß die während der Nacht eingetretenen Minima nach Abbrennen der Heizmasse innerhalb des eigentlichen Versuchsfeldes im äußersten Fall nur 1 Grad auseinander liegen (zwischen -6 und 7 Grad).

Bei diesem einfachen Verfahren ist der Temperatureffekt auf eine doppelte Wirkung zurückzuführen. Einmal gibt das brennende Naphtalin erhebliche Wärmemengen frei, wie wir es von dem Anbrennen der Briketts und der Brikettöfen her wissen. Zum anderen gewährt der gleichzeitig entstehende Ruß den von ihm überdeckten Pflanzen einen wirksamen Strahlungsschutz. Eine Zerlegung des gesamten Temperatureffektes in die beiden Anteile war mit den seinerzeit zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln meßtechnisch nicht durchführbar.

Wie man aus den Ergebnissen dieses Versuchs erkennt, läßt sich eine solche Primitivheizung im Notfall mit Erfolg anwenden. Nur muß man darauf achten, daß durch regelmäßiges Nachlegen in Zeitabständen von einer halben bis einer Stunde keine Lücken in der Wärmebelieferung des zu schützenden Feldes auftreten.

In der Praxis wurde dieses Verfahren auf dem Weingut Grünhaus a. d. Ruwer auf rund 10 ha angewendet. Dabei wurde ein von der J. G. Farbenindustrie geliefertes Material, bestehend aus einem Gemisch von Anthrazenpech und Torfmull, in flachen Schalen verbrannt. Durch den Zusatz wird die Verbrennung auf mehrere Stunden verteilt.

#### f) Versuche zur Entwicklung eines rußfreien Heizverfahrens.

In den Jahren 1933 und 1934 hat das Institut für Klimaforschung mit Unterstützung des Reichskuratoriums für Technik in der Landwirtschaft Versuche durchgeführt, um ein rußfreies Geländeheizverfahren zu entwickeln. Sämtliche amerikanischen und deutschen Ölheizmodelle befriedigen nämlich in Bezug auf rußfreie Verbrennung nicht.

Die in der Industrie üblichen Lösungen zur vollständigen Verbrennung flüssiger Brennstoffe beruhen auf Verfahren, die eine gründliche Durchmischung mit der, wenn möglich, warmen Verbrennungsluft gestatten. Dies geschieht durch Zerstäuben des Öles mittels Druck durch einen Kolben oder mittels eines Luftstromes. Daneben kennt man noch andere Methoden, wie z. B. Verdampfung durch Heizen des Ölvorrates oder einer Teilmenge mit Hilfe einer Nebenflamme oder einer fremden Heizeinrichtung besonderer Art und spätere Mischung des Öldampfes mit vorgewärmter Luft.

Es ist aber zu bedenken, daß die rußfreie Heizung für gärtnerische Betriebe in Frage kommt, wo reife Früchte (Tomaten, Obst) oder Blüten im Herbst vor Frostschaden geschützt werden sollen. Dadurch scheidet die Verwendung teurer und komplizierter Öfen und Brennerkonstruktionen aus. Die Verwendung von Brennern und die Verdampfung des Öles nach Art der Benzinlötampen verringerte die Rußentwicklung, doch mußte dieser Weg wegen Unwirtschaftlichkeit verlassen werden.

Bei einer Verbesserung der Versuchsanordnung, in der in einem geschlossenen Gefäß Öl durch Heizung von außen verdampft wurde und das aus einer feinen Düse austretende Gasgemisch in einem Brennröhr mit Lufteintrittsöffnungen verbrannt wurde, war die Verbrennung fast rußfrei, jedoch die Wahrscheinlichkeit einer Verwendung in der Praxis wegen der Umständlichkeit der Verfahren sehr gering. In den Versuchsanordnungen sah das Verfahren zuletzt so aus, daß nur noch ein Teil des Öles vorgeheizt wurde. Es zeigte sich aber, daß ständige Regulierung erforderlich war und daß sowohl die Außentemperatur als auch die Zusammensetzung des Öles Einfluß auf die Verbrennung ausübten. Vielleicht ließen sich diese Mängel nach Verfahren wie sie in den deutschen Patentschriften 553 804 und 544 119 beschrieben sind, verbessern; aber damit wäre eine wesentliche Verteuerung der Öfen verbunden, so daß die gestellte Aufgabe auf diese Art nicht gelöst werden kann.

Die Lösung führte schließlich darauf hinaus, Braunkohlebriketts oder Koks zu verwenden, die bereits in voller Glut waren, als sie an Ort und Stelle gebracht wurden. Zwecks vollständiger Verbrennung waren Rohre von der dreifachen Länge des Ofens aufgesetzt worden (Abb. 119). Beim Nachlegen entsteht zwar erneut etwas Ruß, der aber mit den Abgasen durch die besonders langen Ofenrohre abgeführt werden kann.

#### g) Verwendung der elektrischen Heizung zur Frostschadenverhütung.

In jüngster Zeit ist auch versucht worden, durch Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme die Luft und die Pflanzenorgane über dem Weinbergboden auf höhere Temperaturen zu bringen.



Abb. 119.  
Koks-Heizofen mit  
langem  
Rohraufsatz  
für rußfreie  
Heizung.

So wurden Mitte Mai 1935 erstmalig auf Anregung von Weinbauoberlehrer Schönhals-Bingen praktische Versuche, einen Weinberg durch elektrische Heizung vor Frostschaden zu bewahren, in der Gemarkung Bingen-Büdesheim am Ausgang des Nahetales durchgeführt.

In der eigentlichen Versuchsnacht herrschten verhältnismäßig ungünstige Witterungsverhältnisse. Der Nordwestwind nahm zeitweise die Stärke 4 an. Trotzdem konnten an den aufgestellten Thermometern deutliche Temperaturerhöhungen festgestellt werden, die naturgemäß erheblich größer ausgefallen wären, wenn eine schwächere Luftbewegung vorgelegen hätte.

Vor dieser Versuchsnacht (21./22. Mai 1935) wurde die Anlage während einer ausgesprochenen Frostnacht schon einmal in Betrieb genommen. Da der Strom jedoch infolge Unachtsamkeit der aufgestellten Temperaturwache zu spät, d. h. nach Unterschreitung der kritischen Temperaturgrenze eingeschaltet worden war, wurde nicht nur kein Schutz erzielt, sondern die verspätet in Gang gesetzte Heizung machte sich sogar besonders schädigend bemerkbar.

Wir haben hier einen häufig zu beobachtenden Fall vor uns, bei dem durch zu rasches Auftauen die Blattzellen zerstört werden. Die Beobachtungen am nächsten Morgen und an den darauffolgenden Tagen ergaben, daß der verspätet geheizte Weinberg zu einem hohen Prozentsatz erfroren war, während die Nachbarweinberge, die nicht geheizt waren, nur verhältnismäßig geringen Schaden erlitten hatten. Derartige Beobachtungen können gelegentlich gemacht werden, wenn nach einer schwachen Frostnacht die Sonne mit größerer Intensität einen Weinberg bescheint, dessen Blätter leicht angefroren sind. Ein solcher Weinberg zeigt dann bald die typischen Anzeichen des Erfrorenseins (Herabhängen und Welken der Blätter, die später braun werden und vertrocknen), während ein benachbarter Weinberg an beschattetem Hang infolge des langsameren Auftauens sich noch erholen kann.

Zur Besprechung der eigentlichen Versuchsnacht mit den exakten Messungen beginnen wir mit der Beschreibung der Versuchsanordnung.

Das Versuchsfeld bestand aus neun Zeilen von je 45 m Länge. Der Zeilenabstand betrug 1,1 m. Das beheizte Versuchsfeld hatte also eine Ausdehnung von rund 450 m<sup>2</sup>.

Die Heizdrähte wurden unterhalb der Triebe, etwa 20 cm über Boden schleifenförmig um die einzelnen Rebzeilen herumgeführt. Hin- und Rückleitung der Schleifen lagen jeweils 10—15 cm nebeneinander (Abb. 120), so daß die Rebbögen 5—7 cm von den Heizdrähten entfernt waren. Die Enden der neun Schleifen waren an die Sammelschienen angeschlossen. Wesentlich für die Schaltung ist also, daß die neun Drahtgabeln parallel geschaltet mit Strom beschickt wurden.

Die Schaltanlage war von dem Städt. Elektrizitätswerk

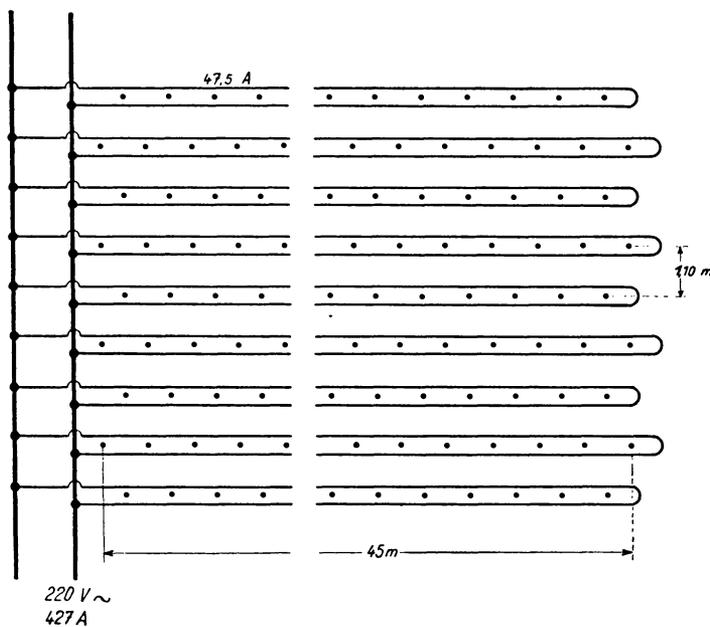


Abb. 120. Schaltskizze zum elektrischen Heizversuch, Bingen, 21./22. Mai 1936.

werk Bingen provisorisch im Weinberg montiert worden. Von einem in der Nähe stehenden Transformatorenhäuschen mit einer Primärspannung von 20 kV konnte Wechselstrom mit 220 V Spannung abgenommen werden.

Die Heizdauer betrug 85 Minuten. Während dieser Zeit wurden 133 kWh verbraucht, die an einem Wattmeter abgelesen werden konnten. Hieraus folgt eine Leistung von 94 kW und, da die Spannung 220 V betrug, eine Stromstärke von 427 A in der Sammelschiene. Somit floß durch jeden einzelnen Heizdraht ein Strom von 47 A.

Da die Versuchsfläche 450 m<sup>2</sup> groß war, so ergibt sich für einen  $\frac{1}{4}$  ha =  $5,55 \times 94 = 525$  kW Leistung. Wird in einer Frostnacht fünf Stunden lang geheizt, so werden  $5 \times 525 = 2610$  kWh an elektrischer Energie verbraucht.

Zur Ermittlung der Temperaturen setzten wir Minimumthermometer und Thermohygrographen ein. Die Minimumthermometer befanden sich mit ihrer Längsachse über der Mittellinie der Heizschleife, und zwar 70—80 cm über dem Boden (50—60 cm über den Heizdrähten), lagen also an den gleichen Stellen wie die zu schützenden Triebe. Sie waren der Ausstrahlung ausgesetzt wie die Triebe und erfuhren wie diese auch direkte Anstrahlung von seiten der Heizdrähte. Die Erwärmung durch aufsteigende Warmluft wird jedoch den Haupteffekt ausgemacht haben.

Von den Thermohygrographen hingegen wurden zwei an verschiedenen Stellen innerhalb der beheizten Feldes jeweils in die Mitte zwischen zwei Zeilen gestellt, wobei die empfindlichen Bourdonrohre in mittlere Triebhöhe gebracht wurden. Ein dritter Apparat stand in gleicher Höhe auf der Leeseite außerhalb des Versuchsfeldes.

Die Temperaturen an den Minimumthermometern waren bis gegen Mitternacht auf 11 Grad zurückgegangen. Um 00 Uhr 35 wurde der Strom eingeschaltet. Er rief Temperaturerhöhungen von  $\frac{1}{2}$  bis 1 Grad gegenüber der unbeheizten Zone hervor. Auch an den Thermographen war unmittelbar nach dem Einschalten des Stromes eine deutliche Erwärmung um einige Zehntel Grad zu erkennen. Diese geringfügige Temperaturerhöhung schien sich auch bis zum Ende der Heizung zu halten, denn danach zeigte die Registrierkurve einen plötzlichen Abfall.

Es ließ sich also einwandfrei ein Effekt nachweisen. Dieser wäre bei ruhiger Luft, wie sie in den ausgesprochenen Gefahrennächten vorhanden ist, zweifellos größer gewesen und hätte vielleicht Werte von 2 Grad angenommen. Er kann also für normale Frostnächte während der Vegetationsperiode im allgemeinen als ausreichend angesehen werden.

Vorteilhaft bei der elektrischen Heizmethode ist die Möglichkeit der sofortigen Änderung einer Dosierung. Je nach Stärke des Frostes können verschiedene Schaltungen vorgesehen werden, welche die Heizdrähte, wozu die im Weinberg üblichen Spanndrähte Verwendung finden können, entweder nur teilweise einschalten oder aber verschieden belasten. Diese technischen Einzelheiten bedürfen einer weiteren Untersuchung.

Was die Wirtschaftlichkeit anbetrifft, so entstehen die Anlagekosten im wesentlichen durch die Heranführung des Stromes an den Weinberg, da als Heizkörper bei Schaffung einer Neuanlage Erziehungsdrähte verwendet werden können. Eine Verbilligung der Anlage ließe sich durch gemeinsame Beteiligung der Besitzer von zusammenliegenden frostgefährdeten Weinbergen erzielen.

Schwieriger liegen die Verhältnisse hinsichtlich des Stromverbrauchs. Selbst bei einem ganz außergewöhnlichen Tarif von 2 Pfennigen für die Kilowattstunde war für die in Bingen eingerichtete Anlage mit einem Kostenaufwand von  $2610 \times 0,02 = 52,20$  RM. je  $\frac{1}{4}$  ha Anbaufläche zu rechnen, wenn in der Frostnacht fünf Stunden lang geheizt werden müßte. Dies stellt rund den vierfachen Betrag der Summe dar, welche unter gleichen Verhältnissen bei Anwendung der Heizmethode mit Brikettöfen benötigt wird. Die Anlagekosten sind selbstverständlich außerdem erheblich höher.

### E. Zusammenfassung.

Die Frostschadenverhütung durch Heizung nimmt zweifellos unter allen Verfahren die erste Stelle ein; sowohl in Deutschland als auch im Ausland ist sie das in der Praxis verbreitetste Verfahren. Über die Geländeheizung läßt sich zusammenfassend folgendes sagen:

1. Die Heizung ist weit weniger als andere Maßnahmen abhängig von der Geländegestaltung. Sie kann demnach Anwendung finden sowohl im Frostentstehungsgebiet selbst als auch im Fallwind und im Kaltluftsee.
2. Die Anwendungsweise ist verhältnismäßig einfach. Dies gilt sowohl für die teuren Verfahren der offen ausgelegten Briketts als auch für die Verfahren, bei welchen Öfen verwendet werden.
3. Während im Ausland die Ölheizung die erste Rolle spielt, ist in Deutschland die Ofenheizung mit festen Brennstoffen führend, wobei die Heizung mit Braunkohlebriketts den Vorrang hat.

Die in den einzelnen Abschnitten geschilderten Vor- und Nachteile der verschiedenen Brennstoffe haben in Deutschland aus Gründen der Volkswirtschaft, der Preisbildung und vor allem der Tatsache, daß das Material stets greifbar sein soll und keine besondere Lagerung braucht, zugunsten des Briketts entschieden.

4. Bei Flächen von 1 ha aufwärts genügt auf je 50 m<sup>2</sup> eine Brennstelle. Von dieser Brennstelle muß ein Mindestumsatz von etwa 10 000 kcal/std verlangt werden. In diesem Fall beträgt dann die Temperaturerhöhung an den Stellen, die den größten Abstand von den Öfen haben, etwa 3—4 Grad. Eine Steigerung der Verbrennungsintensität bei gleichzeitiger Verminderung der Brennstellen findet bald eine Grenze. Abstände der Brennstellen von 10 × 10 m sind bereits als äußerste Grenze zu betrachten. Ihnen steht als Ideal gegenüber die gleichmäßige Erwärmung der gesamten Oberfläche, die nur durch eine Unzahl kleiner Brennstellen erreichbar wäre. Die gefundene Norm von einer stärkeren Brennstelle je 50 m<sup>2</sup> kann in der Praxis nicht rezeptmäßig Anwendung finden. In der Ebene sind die Ränder mehr zu besetzen, während die Brennstellen im mittleren Feld größere Abstände voneinander haben können. An Hängen ist in demjenigen Teil des Geländes, welcher in den Kaltluftsee taucht, eine engere Aufstellung der Brennstellen notwendig und ebenso an den Stellen, an denen der Fallwind einbricht.

5. Die Wirtschaftlichkeit der Heizung ist im Wein- und Obstbau recht groß. Die Kosten betragen nur 1—2 % der durch Fröste zu erwartenden Schäden. Bei weniger wertvollen Kulturen wird sie allerdings kaum Anwendung finden können.

## IX. Die Belüftung und Entlüftung als Frostschutz.

### A. Die Belüftung (Ventilation).

Die Verfahren der Belüftung sind wohl die jüngsten Verfahren zur Frostschadenverhütung. Infolge der für eine Strahlungsnacht typischen Temperaturverteilung befindet sich schon in recht geringer Höhe über der Erdoberfläche bedeutend wärmere Luft als am Boden. Die Zerstörung dieser stabilen Schichtung der bodennahen Kaltluft ist das Hauptziel der Luftdurchmischung, die bei der Belüftung auftritt.

Drei Haupttypen einer Frostgefährdung mit den entsprechenden Übergängen sind möglich:

1. Kaltfluthaut stabil über ebenem Gelände lagernd und wenig mächtig.
2. Kaltluftansammlung in Mulden und Tälern, mehr oder weniger mächtige Kaltluftmassen.
3. Strömende Kaltluft, geringere oder stärkere Fallwinde.

Es ist klar, daß theoretisch das Verfahren nur für den Fall 1, vielleicht noch für den Fall 2 bei Muldenfrost mit geringem Einzugsgebiet in Frage kommen kann, in jedem anderen Falle aber praktisch bedeutungslos ist.

Eine weitere Wirkung der Belüftung besteht noch darin, daß von einer gewissen Windgeschwindigkeit ab, die etwa bei 3 m/sec liegt, durch den stärkeren Luftaustausch die Unterkaltung der Blätter gegen Luft aufgehoben wird. Diese Geschwindigkeit wird auch bei den stärksten Belüftern nur bis zu Abständen von einigen Dekametern noch erreicht.

Die ersten Versuche in dieser Richtung scheint man in Frankreich unternommen zu haben, indem man Windmühlen elektrisch betrieb. Die Versuche sind allerdings ergebnislos verlaufen.

#### 1. Die Versuche von J. Löschnig 1914.

Den Wirkungsgrad von Ventilatoren hat vermutlich Löschnig<sup>224)</sup> 1914 als erster zahlenmäßig zu bestimmen gesucht. Löschnig hatte an den vier Ecken eines ebenen Versuchsfeldes von  $50 \times 50$  m je einen Belüfter derart aufgestellt, daß die Luft aus 2 m Höhe herabgesaugt und waagrecht in das Versuchsfeld geblasen wurde (Abb. 168, Tafel 2). 32 Thermometer, die gleichmäßig über die Fläche verteilt waren, gaben teils die Temperaturwerte aus 50 cm, teils die aus 150 cm Höhe. Außerdem waren noch an den vier Seiten des quadratischen Versuchsfeldes, und zwar in 80 m Entfernung von demselben, Thermographen und weiterhin besondere Gerüste mit Thermometern aufgestellt. So erhielt man auch die Lufttemperatur außerhalb des Versuchsfeldes in Bodennähe und ferner alle 50 cm höher bis zu 3 m. Aus seinen Messungen zieht Löschnig folgende Schlußfolgerungen: Der Erfolg der Luftvermischung zur Erhöhung der Temperatur war ein sehr günstiger, denn es wurden Temperatursteigerungen von  $2\frac{1}{2}$  Grad C erzielt. Ganz besonders auffallend war es, daß die Temperatur bei der Luftmischung in  $\frac{1}{2}$  m Höhe über dem Boden höher oder gleich hoch war, wie jene in  $1\frac{1}{2}$  m Höhe (Seite 224).

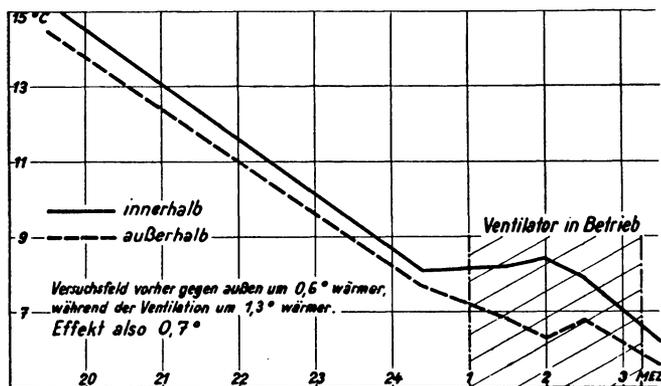


Abb. 121. Mittlerer Temperaturverlauf innerhalb und außerhalb des Versuchsfeldes in 50 cm Höhe. Ventilationsversuch Löschnig 29./30. April 1914.

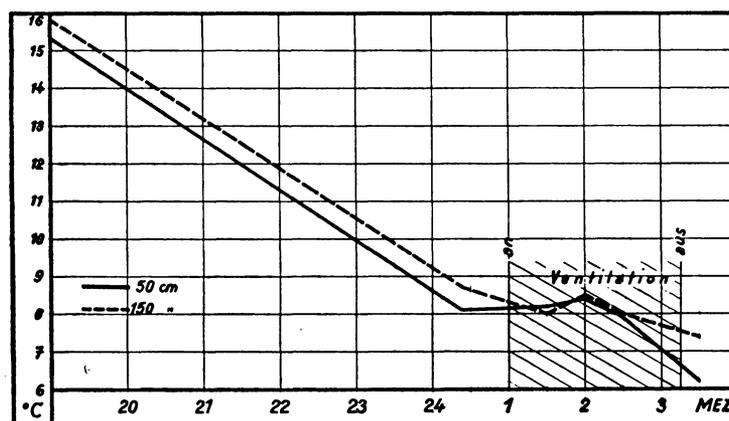


Abb. 122. Mittlerer Temperaturverlauf innerhalb des Versuchsfeldes in 50 und 150 cm Höhe. Ventilationsversuch Löschnig 29./30. April 1914.

Bei diesem Versuch, den Löschnig am 29. April 1914 durchführte, kommt durchaus nicht der hohe Effekt heraus, den er in seiner Schlußfolgerung angibt. Wenn wir die mittleren Differenzen, die zwischen den Thermometern im Versuchsfeld gegenüber den Thermometern außerhalb von vorneherein bestanden, von der mittleren Differenz während der Dauer der Belüftung abziehen, ist ein mittlerer Effekt von 0,7 Grad festzustellen (50 cm Höhe). (Abb. 121).

Vergleichen wir den Temperaturverlauf in 50 und 150 cm Höhe, so sehen wir, daß ursprünglich eine Differenz von 0,5 bis 0,6 Grad bestanden hat, und daß während der Belüftungszeit diese Differenz infolge der Luftdurchmischung aufgehoben war (Abb. 122).

Aus den von Löschnig angegebenen Zahlen geben die beiden Isothermenkarten (Abb. 123) ein Bild von dem Versuchsfeld vor und während der Belüftung. Es zeigt sich dabei, daß die Mitte des Versuchsfeldes bereits vor Beginn der Versuche deutlich wärmer war als die Geländestellen außerhalb des Versuchsfeldes. Obwohl in den vier Ecken des 50 × 50 m großen Versuchsfeldes große Ventilatoren standen, über deren Leistung und Betriebsaufwand Löschnig leider keine Angaben macht, ist der Erfolg nicht gerade erheblich. Aus dem Vergleich der Isothermenkarten kann er in der Mitte des Feldes gegenüber den 80 m vom Rand des Versuchsfeldes entfernten Thermometern auf weniger als 1 Grad geschätzt werden.

Löschnig hat kurz darauf nochmals einen Versuch mit Ventilatoren durchgeführt, dabei aber auf dem Versuchsfeld gleichzeitig noch an 50 Feuerstellen insgesamt 500 kg Kohle verbrannt. Seine aus den Messungen gezogene Schlußfolgerung lautet:

1. Die Wirkung der Kohlenfeuer, bei der hauptsächlich die strahlende Wärme, das heißt die Heizung in Frage kommt, erzielte einen Erfolg von rund 1 Grad C.
2. Der Versuch mit Kohlenheizung und Luftvermischung mit Ventilatoren brachte eine Steigerung der Temperaturzunahme.
3. Eine besondere Steigerung erfuhr die Temperaturzunahme, als in den Nachbarweingärten außerhalb des Versuchsfeldes die Räucherung einsetzte, weil sich dadurch der nachteilige Einfluß der Umgebung weniger auswirkte.

Die von Löschnig gemessenen Werte sind aus der Abbildung 124 zu ersehen.

Aus dem Vergleich der Temperaturverläufe bei dem Versuch am 2. Mai 1914 ergibt sich ein Effekt der Belüftung bei gleichzeitiger Kohlenheizung von 1,2 Grad. Eine Trennung zwischen dem Belüftungseffekt, dem Heizeffekt der Feuer und letzten Endes dem Ausstrahlungsschutz der Räucherung ist bei dem von Löschnig durchgeführten Versuchsplan nicht möglich.

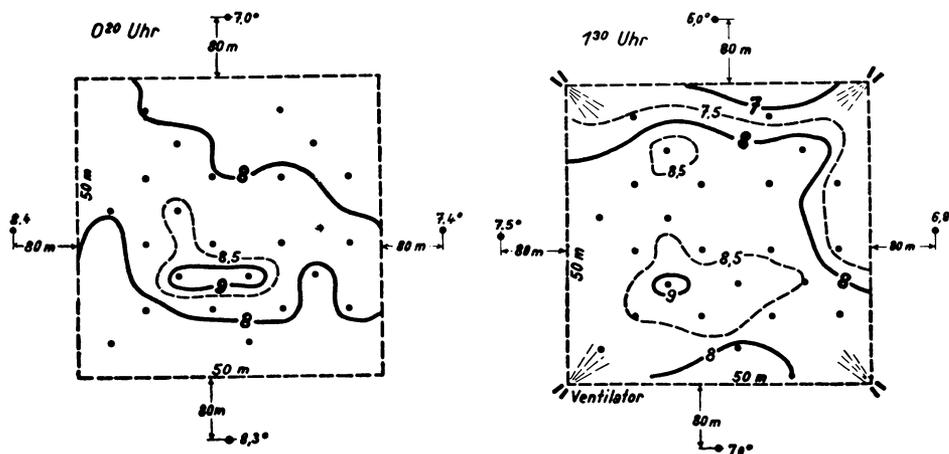


Abb. 123. Temperaturverteilung links vor Beginn — rechts während der Ventilation. Ventilationsversuch Löschnig 29./30. April 1914.

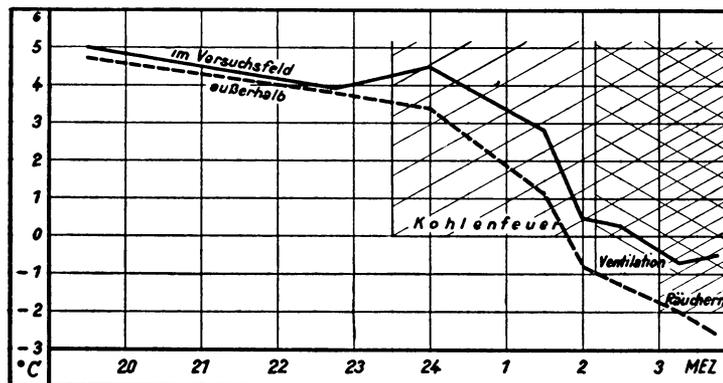


Abb. 124. Mittlerer Temperaturverlauf innerhalb und außerhalb des Versuchsfeldes in 50 cm Höhe. Versuch Löschnig mit Kohlenheizung, 2./3. Mai 1914.

## 2. Amerikanische Versuche.

Im Gegensatz zu anderen Ländern hat man vor allem in den Vereinigten Staaten von Nordamerika eine recht stattliche Anzahl von Maschinen zur Durchmischung der Luft gebaut. Die erste Maschine dieser Art war sehr einfach und bestand aus einem horizontal gelagerten Winderzeuger mit sechs Flügeln, der auf einem Turm angebracht war und durch einen Benzinmotor angetrieben wurde. Später ging man zu Zentrifugalbläsern über, die die Luft aus größerer Höhe in einem Rohre nach unten saugten und hier in horizontaler Richtung ausströmen ließen. Die Auslaßöffnung war drehbar, so daß also die Luft nach jeder Richtung hin geblasen werden konnte. Schließlich wurde noch versucht, die angesaugte, also schon relativ warme Luft mittels eines Ölbrenners noch weiter zu erwärmen. Über die damit erzielten Ergebnisse stehen uns leider nur zwei Zusammenfassungen von Young<sup>422)</sup> zur Verfügung. Danach konnte nur bei zwei Maschinen eine Erhöhung der Lufttemperatur fest-

gestellt werden, sonst war der Effekt praktisch immer gleich Null. Außerdem hat schon Humphreys<sup>166)</sup> 1914 darauf hingewiesen, daß die Unkosten viel zu groß sein werden.

Die erste dieser beiden Maschinen bestand aus einem Zentrifugalgebläse, das von einem 20 PS-Motor angetrieben wurde. Durch dasselbe wurde die Luft aus etwa 8 m Höhe durch ein eisernes Rohr herabgesaugt. Das Rohr besaß unten zwei Ausgänge; so konnte die Luft zum Erdboden wie auch über die Baumkronen eines Obstgartens geblasen werden. Durch zwei kleine Ölbrenner war die Möglichkeit gegeben, die angesaugte Luft noch weiter vorzuwärmen. Ohne Verwendung der Öfen betrug die Temperaturerhöhung am Auspuff im Mittel 5 Grad C; wurden die Brenner angesteckt, so stieg die Temperaturdifferenz bis auf 20 Grad. Bei diesem Vorwärmen erhielt die Luft aber einen derartigen Auftrieb, daß sie praktisch verloren ging. Im anderen Falle waren die abgegebenen Luftmengen viel zu gering, um auf die gesamte Luft des Obstgartens einen beachtenswerten Einfluß ausüben zu können.

Bei der anderen Maschine wurde ein vierteiliger Propeller, der sich in ungefähr 12 m Höhe befand, durch einen 120 PS-Motor angetrieben. Zwischen Luftschaube und Erdboden war ein großer Ölbrenner aufgestellt, um die von der Luftschaube herabgewehrte Luft zu erwärmen. Die in einer Frostnacht angestellten Messungen ergaben folgendes: Die Luftbewegung war bis auf etwa 35 m Entfernung von der Luftschaube spürbar; der Einfluß auf die Temperatur war jedoch hierbei nur sehr gering. In etwa 15 m Abstand von der Maschine wurde ohne Heizung eine Erhöhung der Lufttemperatur um 2,7 Grad, mit Heizung eine solche von 4,0 Grad festgestellt. Auch bei dieser Maschine war die Reichweite viel zu gering.

Young kommt so zu dem Ergebnis, daß der Bau von Belüftern, die auch bei strengem Frost ausreichen, trotz der großen aufgewandten Summen bis heute (1929) noch nicht gelungen sei. Denn durchweg waren alle Maschinen nicht imstande, die aus der Höhe angesaugte und damit relativ warme Luft über genügend große Flächen zu verbreiten. Man ist deshalb auch in den Vereinigten Staaten von dem weiteren Bau solcher Maschinen im allgemeinen abgekommen.

Als letzte amerikanische Konstruktion ist noch der Aladin-Garten-Protector (Abb. 167, Tafel 2), von dem mehrere Exemplare in Californien aufgestellt wurden, anzuführen. Der Winderzeuger besteht aus einem etwa 13 m hohen Stahlurm, an dessen Spitze eine verstellbare, flache Luftschaube angebracht ist. Als Antrieb dient ein 100 PS-Elektro-Motor. Der Schaft dreht sich in fünf Minuten einmal um seine Achse. Angeblich (nach Fabrik-Prospekten!) soll diese Maschine bei einem Frost von mehreren Graden für den Schutz eines etwa 400 ar großen Gartens genügen. Irgendwelche zahlenmäßige Angaben über den wirklich erzielten Temperatureffekt liegen aber nicht vor.

### 3. Versuche von Moser 1934.

Neuerdings wurde die Methode der Belüftung wiederum in Österreich und zwar von Moser<sup>264)</sup> aufgegriffen. Ein Benzinmotor von 8 PS wurde auf einer Drehscheibe 3 m hoch mitten im Weinberg aufgestellt, und zwar so, daß die an der Welle angebrachte Luftschaube die „angesaugte warme Luft schräg nach unten wirft“. Der Luftstrom konnte, nach Angabe des Erfinders, noch in 100 m Entfernung deutlich verspürt werden (Abb. 125).

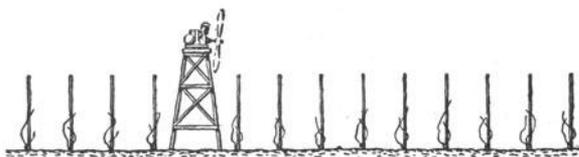


Abb. 125. Aufstellung eines 8 PS-Benzinmotors mit Flugzeugpropeller zur Durchmischung der Luft (nach Moser).

Im Betrieb wurde der Motor auf der Drehscheibe langsam gedreht. Zu Beginn eines Versuches herrschte in einer Frostnacht morgens um 01 Uhr 30 im Weingarten eine Temperatur von  $-1,2$  bis  $-1,6$  Grad C (in welcher Höhe vom Boden, ist nicht angegeben). 80 m vom Motor entfernt war ein zweites Thermometer angebracht (Höhe?); dieses stieg im Laufe einer Minute nach Anwerfen der Luftschaube von  $-1,5$  auf  $-0,8$  Grad C. Die vertikale Temperaturverteilung war die folgende: Vor Beginn des Versuches betrug die Temperatur in 3 m

Höhe  $+0,4$  Grad, am Boden  $-1,5$  Grad, nach 10 Minuten Laufzeit der Luftschaube in 3 m Höhe  $+0,7$  Grad, am Boden  $-0,2$  Grad. Nach einer Stunde Laufzeit betrug der Unterschied der Temperatur zwischen 3 m Höhe und 20 cm Höhe nur noch 0,3 Grad zu Ungunsten der tieferen Lage.

Ferner hat Moser noch den Wirkungsgrad eines 4 PS-Motors mit einer Luftschaube von 160 cm Länge festgestellt. Der Belüfter war 5 m über dem Versuchsfeld aufgebaut. Bei dem Versuch betrug die Temperatur innerhalb des Wirkungskreises der Luftschaube (bis zu 1000 m)  $-0,8$  bis  $1,2$  Grad C, außerhalb desselben  $-3,5$  Grad. In einer weiteren scharfen Frostnacht, bei der die Temperaturen außerhalb der Versuchsfläche bei  $-6,0$  Grad lagen, war die Wirkungsweite der Luftschaube geringer; sie betrug nur 50–80 m. Irgendwelche sonstigen Temperaturmessungen aus dieser Nacht sind aber nicht angegeben. Jedoch soll gerade die vom Luftstrahl bestrichene Fläche im Gegensatz zu den umliegenden Weinbergen keinen Frostschaden zu verzeichnen gehabt haben. Alle diese Angaben stammen vom Erfinder selbst.

## 4. Belüftungsversuch in Avelsbach 1936.

Schließlich wollen wir noch auf einen weiteren Belüftungsversuch eingehen, der im Frühjahr 1936 auf der Weinbaudomäne Avelsbach bei Trier durchgeführt und von der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle Trier überwacht wurde. Das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk hatte im Kelterhaus der Weinbaudomäne zwei große Gebläse derart aufgestellt, daß deren Öffnungen durch ein Fenster etwa  $2\frac{1}{2}$  bis 3 m über dem Boden ins Freie mündeten. Etwa 4 m von den Gebläsen entfernt begann das Weinbergsgelände, das als Versuchsfeld diente. Die Gebläse wurden durch je einen Drehstrommotor angetrieben, deren Stundenverbrauch zusammen 9,6 Kilowattstunden betrug. Bei 1450 Umdrehungen leisteten sie  $19\,500\text{ m}^3$  Luft je Stunde bei 80 mm Wassersäule (Abb. 169, Tafel 2).

Das eigentliche Versuchsgelände (Abb. 126), soweit es wenigstens mit Reben bestanden war, begann, wie schon erwähnt, etwa 4 m von den Ventilatoren entfernt und hatte eine Neigung von etwa 30 Grad. Der Luftstrom der Gebläse war also über den von rechts nach links abfallenden Weinbergshang hinweg gerichtet. Am Fuße des Weinbergs lief ein Talweg entlang, der gegen die  $1\frac{1}{2}$  m tiefer liegenden feuchten Wiesen durch eine Mauer abgegrenzt war. Der Weinberg, in dem die Wirkung der Luftdurchmischung zu untersuchen war, erstreckte sich nicht in gerader Linie, in der die Luft von den Gebläsen getrieben wurde, sondern er zeigte in seiner Längenerstreckung bei einem Abstand von 25 m von dem Gebläse einen leichten Knick nach rechts. Dieser bewirkte in Verbindung mit der Gehängeneigung des Weinbergs, daß der vom Gebläse erzeugte Luftstrom in größerer Entfernung zumindest nicht mehr unmittelbar über die Reben hinwegstrich; die Reichweite der Gebläse war dadurch also eingeschränkt.

Wir müssen hier einfügen, daß der Aufbau der Gebläse nicht von uns vorgenommen worden war, sondern daß wir vielmehr erst zu der Versuchsdurchführung herangezogen wurden, als die Einrichtung bereits fertig dastand.

Um die Änderungen der Temperaturverteilung in dem Weinbergsgelände zu erfassen, wurden acht Staffeln (I—VIII) mit je fünf Thermometern in einem Abstand von jeweils 10 m aufgestellt (Abb. 126). Der Abstand der Thermometer innerhalb der einzelnen Staffeln betrug 3 m. Infolge der dargelegten ungünstigen Geländebeziehungen hatte es keinen Wert, Thermometer in einem noch größeren Abstand als etwa 80 m vom Gebläse entfernt anzubringen. Alle Thermometer waren Alkohol-Minimumthermometer von Fueß und befanden sich 50 cm über dem Erdboden. Außerhalb wurden noch an den beiden Punkten A und B, 25 m bzw. 80 m vom Gebläse entfernt, zwei Latten senkrecht aufgestellt, die in 10, 20, 50, 100 und 200 cm Höhe Minimumthermometer trugen. Diese beiden Stationen waren außerdem noch mit je einem Thermohygrographen und je einem Anemometer in 50 cm Höhe über dem Boden ausgerüstet. Die Alkoholthermometer waren sämtlich ohne Strahlungsschutz, gaben also in erster Annäherung die Pflanzentemperatur an. Der Bau der benutzten Thermohygrographen von Fueß, bei denen sich der durch einen Drahtkorb geschützte Haarstrang über dem Thermometer, das als sogenannte Bourdonröhre ausgebildet war, befindet, hat jedoch zur Folge, daß die Temperaturregistrierungen weitgehend der wahren Lufttemperatur entsprachen, da das Thermometer in dieser Anordnung Strahlungsschutz genießt. Die orographischen Verhältnisse des Avelertales sind bereits oben beschrieben (Seite 16). Die kleine Versuchsfläche befand sich zwischen 5 und 20 m über der Talsohle des Kaltluftsees, der sich in jeder klaren Nacht dort bildet. Ein schwacher Fallwind von einigen Zentimetern in der Sekunde kam zwischen den beiden Häusern durch, ein weiterer von ebenfalls geringer Stärke folgte dem Laufe des Avelertales und strich an den unteren Reihen des Weinberges vorbei.

Um gleichzeitig einen Schnitt durch den Kaltluftsee des Avelertales zu erhalten, wurde noch eine Reihe von fünf Minimumthermometern ( $W_1$ — $W_5$ ) in 50 cm Höhe über dem Boden in der Wiese aufgestellt.

Einige Tage vor der Versuchsnacht hatte sich über Mitteleuropa ein ausgedehntes Tiefdruckgebiet ausgebildet und war nun im Begriff sich aufzufüllen. Dabei wurde arktisch-maritime Luft herangeführt, die jedoch bis zu der Zeit, in der der Versuch durchgeführt wurde, indifferent geworden war. Die Versuchsnacht selbst war klar und völlig wolkenlos. Innerhalb des Weinbergsgeländes war, sofern nicht der Ventilator lief, die Windgeschwindigkeit außerordentlich gering; sie verstärkte sich aber während der Nacht gelegentlich etwas infolge der Zunahme der Fallwinde (Abb. 127); siehe den Verlauf der Windgeschwindigkeit an der Meßstelle 80 m vom Gebläse, wo ein allmähliches Anlaufen auf rund 0,2 m/sec zu erkennen ist.

Um 22 Uhr 10 wurden die Gebläse, die etwa  $2\frac{1}{2}$  bis 3 m oberhalb der Reben ihre Öffnungen hatten, zum ersten Male angestellt. Die Luftströmung, die sie in 150 cm Höhe über dem Boden, also über 75 cm über den Reben hervorriefen, ist in Abbildung 128 wiedergegeben. Sie zeigt, daß die Reichweite recht gering war und die Strömungsgeschwindigkeit in 40 m Abstand nur mehr 0,1 m/sec betrug. Der verstärkte Umlauf bedeutete nur eine unwesentliche Erhöhung der Windgeschwindigkeit im Versuchsfeld. Bemerkenswert ist auch ein Vergleich der Windgeschwindigkeit in 150 cm Höhe mit den in 50 cm gemessenen Werten. Betrug jene in 25 m Abstand vom

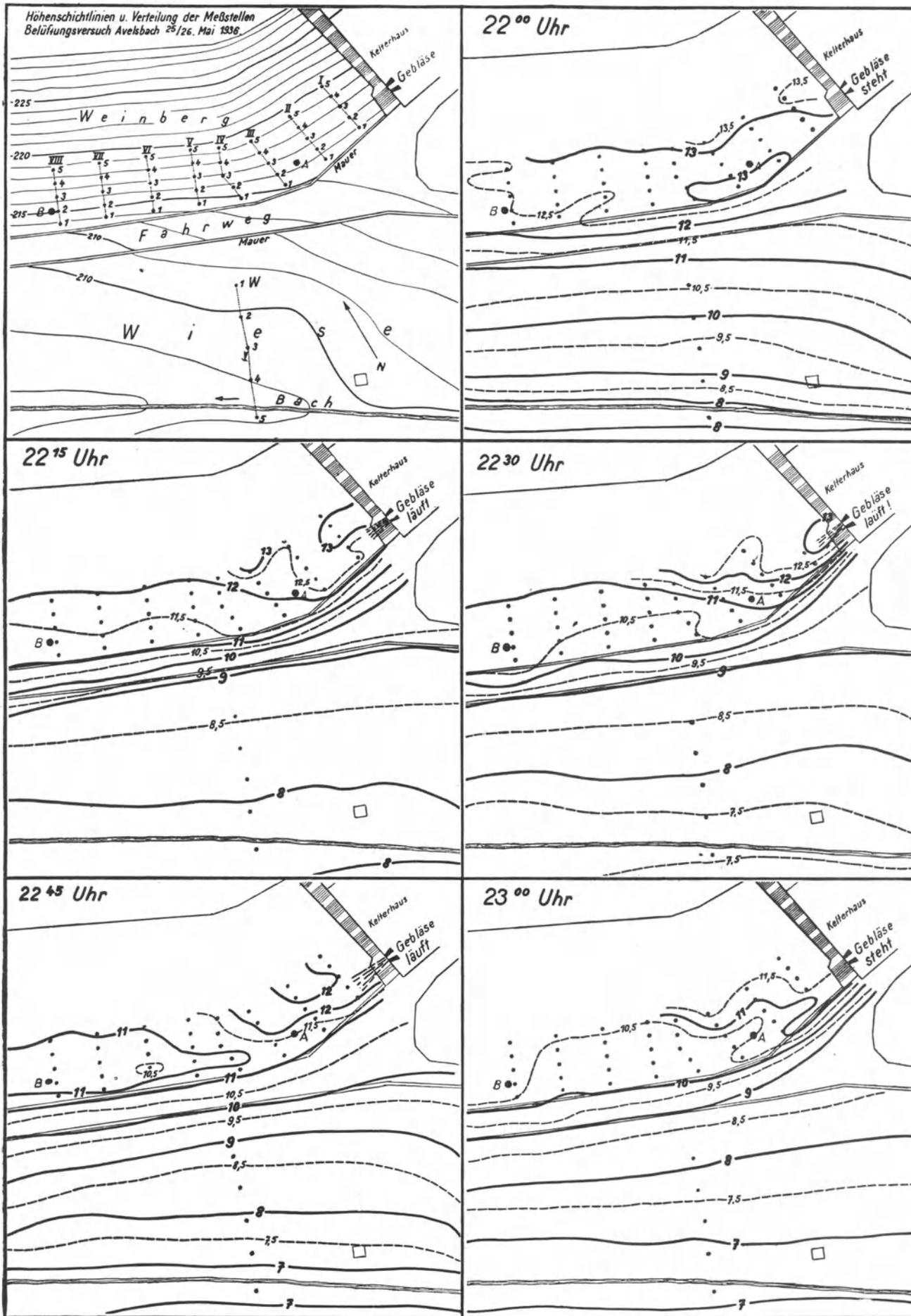


Abb. 126. Versuchsfeld und Isothermenkarten zu dem Belüftungsversuch Avelsbach 25./26. Mai 1936.

Gebläse oberhalb der Reben noch über  $1\frac{1}{2}$  m/sec, so erreichte sie in 50 cm Höhe noch nicht  $\frac{1}{2}$  m/sec. Der erzeugte Luftstrom wurde also durch die Reben außerordentlich stark abgebremst, und damit Reichweite und Wirkungsgrad bedeutend herabgesetzt.

Die Abbildung 127 läßt deutlich erkennen, daß in 80 m Abstand von den Gebläsen keine Spur von Einfluß der Belüftung in 50 cm Höhe mehr bemerkbar war.

Die Isothermenkarten (Abb. 126) zeigen, daß praktisch genommen ein Einfluß der Belüftung nicht zu erkennen ist. Vor Beginn des Versuches sehen wir die Isothermen nach den Höhenlinien ausgerichtet, wie es die Luftschichtung des Kaltluftsees der Talsohle vorschreibt. Der Temperaturabfall auf dem Talboden von der Umgrenzungsmauer bis zur tiefsten Stelle des Tales ist besonders stark. Bei knapp 1 m Höhendifferenz, nämlich von 210 auf 209 m, haben wir ein Temperaturgefälle von  $3\frac{1}{2}$  Grad. Im steilen Weinberg ist die Schichtung weniger stark. Mit geringen Ausnahmen verlaufen auch hier die Isothermen annähernd mit den Höhenschichtlinien. Der Schutz des Kelterhauses, das dem Fallwind entgegen steht, ist deutlich erkennbar.

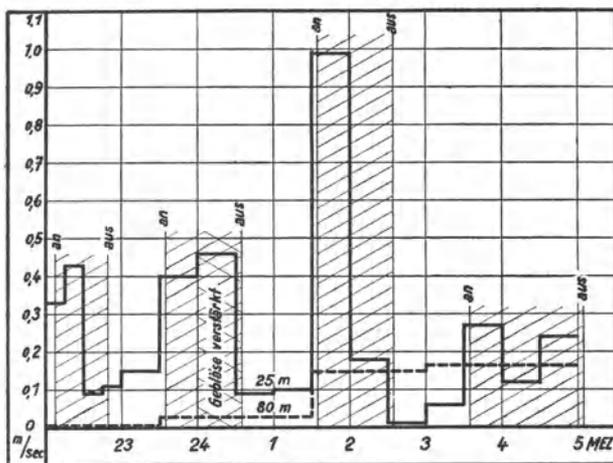


Abb. 127. Gang der mittleren Windgeschwindigkeit in 50 cm Höhe bei 25 bzw. 80 m Entfernung vom Gebläse. Belüftungsversuch Avelsbach 25./26. Mai 1936.

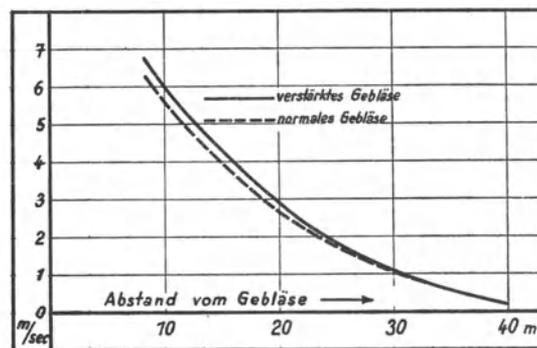


Abb. 128. Die Windgeschwindigkeit in 150 cm Höhe bei 10–40 m Abstand vom Gebläse. Belüftungsversuch Avelsbach 25./26. Mai 1936.

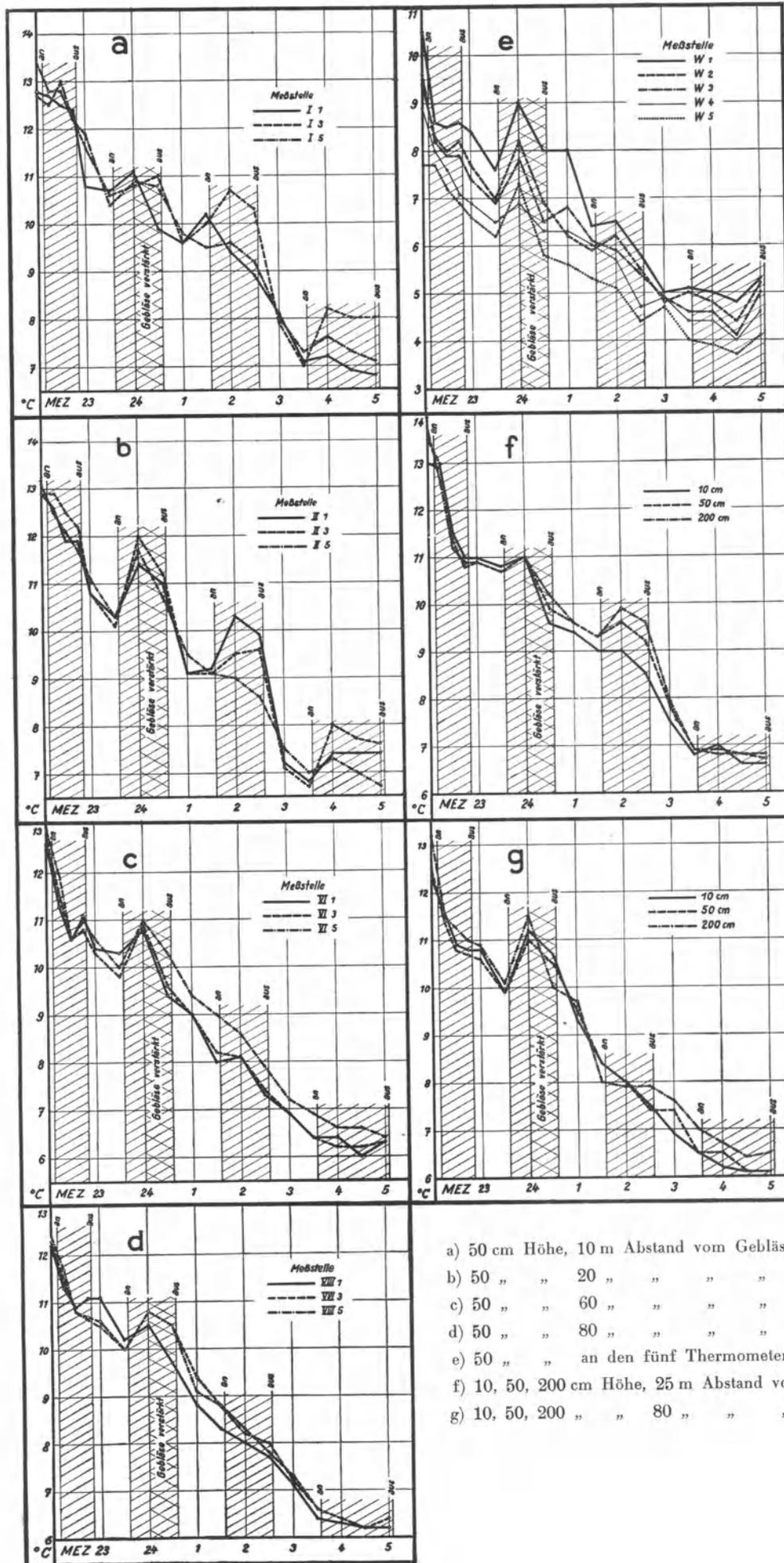
Die Ablesung um 22 Uhr 15 zeigt keine nennenswerte Änderung des Isothermenverlaufs gegen 22 Uhr 00. Die Temperatur ist allgemein im Weinberg um  $\frac{1}{2}$  Grad zurückgegangen und dieser Rückgang ist gleichsinnig eingetreten bei den Thermometern, welche nahe an den Gebläsen stehen, wie auch bei denen, die weiter entfernt sind.

Wenn man aus dem Isothermenbild von 22 Uhr 30 auf einen anscheinenden Erfolg der Ventilation schließen wollte, so kann man aus der darauffolgenden Ablesung um 22 Uhr 45 das genaue Gegenteil folgern. Auch die Temperaturverteilung um 23 Uhr 00, als die Gebläse wieder in Ruhe waren, läßt keine Unterschiede zugunsten der Belüftung bemerken.

Aus vier verschiedenen Thermometergruppen sind die Temperaturverläufe in 50 cm Höhe aufgezeichnet (Abb. 129 a—d). Es wurde dabei aus der Thermometerstaffel jeweils das unterste Thermometer an der Talsohle, das Thermometer, auf welches der Luftstrom der Gebläse besonders stark gerichtet war, und das oberste Thermometer der Reihe eingezeichnet. Bei der Darstellung des Temperaturverlaufes auf der Wiese wurden sämtliche Thermometer verwendet (Abb. 129 e). Insgesamt wurden viermal die Gebläse in Betrieb genommen und zwar 1. um 22 Uhr 10 bis 22 Uhr 50, 2. von 23 Uhr 40 bis 24 Uhr 40, wobei die letzten 40 Minuten die Gebläse in etwas verstärktem Umlauf gesetzt waren. Die dritte Belüftung fand statt zwischen 01 Uhr 35 bis 02 Uhr 35 und die vierte zwischen 03 Uhr 35 und 05 Uhr 05. Während der ersten Belüftungsperiode sehen wir keinen Erfolg der Belüftung. Die Temperaturkurven fallen dauernd. Wo geringfügige Anstiege während der Belüftung auftreten, wie wir das bei dem Thermometer I 3 feststellen, liegen diese Anstiege innerhalb der gewöhnlichen, aus anderen Ursachen auftretenden Schwankungen. Vergleichsweise siehe den Anstieg des Thermometers I 1 um 01 Uhr 30.

In die zweite Belüftungsperiode fällt ein vorübergehender kräftiger Temperaturanstieg um Mitternacht. Diesen Anstieg zeigen am wenigsten die Thermometer, welche 10 m Abstand von den Gebläsen haben und diejenigen, welche 80 m davon entfernt waren. Am stärksten ist er bemerkbar an den Thermometern auf der Wiese und in 20 m Abstand von den Gebläsen.

Dieser Temperaturanstieg ist gewiß nicht auf die Belüftung zurückzuführen, denn 1. nimmt er bereits während der Belüftungszeit und zwar ausgerechnet während der verstärkten Belüftung wieder ab, und 2. ist er



- a) 50 cm Höhe, 10 m Abstand vom Gebläse
- b) 50 „ „ 20 „ „ „ „
- c) 50 „ „ 60 „ „ „ „
- d) 50 „ „ 80 „ „ „ „
- e) 50 „ „ an den fünf Thermometern auf der Wiese
- f) 10, 50, 200 cm Höhe, 25 m Abstand vom Gebläse
- g) 10, 50, 200 „ „ 80 „ „ „ „

Abb. 129. Temperaturverlauf beim Belüftungsversuch Avelsbach 25./26. Mai 1936.

nicht etwa dort am stärksten, wo der Luftstrom der Gebläse voll auf die Thermometer auftrifft, nämlich in 10 m Abstand, sondern gerade hier am allergeringsten. Vielmehr ist allgemein die Temperatur auf dem Versuchsfeld um Mitternacht angestiegen, und zwar infolge einer stärkeren Luftaustauschströmung im Tal. Die Thermometer auf der Talsohle, welche niemals vom Gebläsestrom betroffen wurden und bei welchen nur ein rhythmisches Anschwellen des etwa 0,2 m in der Sekunde betragenden Fallwindes auftrat, nahmen den stärksten Anteil an diesem Temperaturanstieg. Die Thermometerstaffel 10 m vom Haus im Schutz der hohen Gebäude wurde vom Fallwind am wenigsten betroffen und nahm infolgedessen den geringsten Anteil an der Temperaturerhöhung. Auch die Thermometerstaffel in 80 m Abstand war gegen den Fallwind etwas geschützt, weil sie um die Kurve des Berges herum lag und der Fallwind hier kaum noch die Thermometer berührte.

Demnach ist der Anstieg, der in die zweite Belüftungszeit fällt, nicht eine Wirkung der Belüftung.

In der Folgezeit ist der Temperaturverlauf während der Belüftungszeiten und außerhalb derselben in 60 und 80 m Abstand von den Gebläsen völlig ungestört. Die Temperaturen sinken gleichmäßig. Infolge der Ausgleichsströmungen auf der Wiese ist der Verlauf hier zwar etwas unruhiger, aber in seiner Tendenz auch gleichmäßig fallend. Nur in 10 und 20 m Abstand erkennen wir Einflüsse der Belüftung. Am wenigsten beteiligt ist jeweils das Thermometer 5, das am weitesten von der Talsohle entfernt ist, während die anderen beiden recht kräftige Anstiege zu verzeichnen haben, die auf 0,5 bis 1 Grad geschätzt werden können.

Nun ist die (nicht von uns) gewählte Aufstellung der Gebläse gewiß nicht die günstigste gewesen, um maximale Erfolge zu erzielen. Der Effekt der Belüftung zerfällt nämlich, wie bereits erwähnt, in zwei Gruppen:

1. wird durch verstärkte Belüftung die durch die Ausstrahlung erfolgte Unterkaltung der Thermometer gegenüber Luft gemildert,
2. kann durch die Belüftung eine bestehende starke Schichtung der bodennahen Luftschicht infolge Durchwirbelung aufgehoben werden.

Wenn wir die gestaffelten Thermometer, die in 10, 50 und 200 cm Höhe (Abb. 129 f, g) angebracht waren, in ihrem Temperaturverlauf verfolgen, so sehen wir zunächst, daß eine Schichtung in Bodennähe nicht vorhanden war, denn die Thermometer haben durchweg fast gleiche Temperatur. Dies ist ohne weiteres verständlich, weil sie in einem Hang stehen und weil infolge des Abfließens der Kaltluft nach den tieferen Geländestellen hier kaum eine Schichtung auftreten kann. Dieser Teil des Effektes konnte also gar nicht in Erscheinung treten. Außerdem wurde der Gebläsestrom durch die Rebzeilen stark abgebremst, und infolgedessen ist auch eine temperaturerhöhende Wirkung durch den Luftaustausch an den unterkühlten Thermometern wenig bemerkbar. Wenn man dazu noch bedenkt, daß die Thermometer zwischen den Rebzeilen in 50 cm Höhe immerhin noch einigen Ausstrahlungsschutz genossen, da die Reben zur Zeit des Versuches bereits 75 cm hoch waren (bei einem Abstand der Rebstöcke von 1 m), so kann man nur den Schluß ziehen, daß die Versuchsbedingungen denkbar ungeeignet waren, um einen hohen Wirkungsgrad der Belüftung hervorzurufen. Das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk ist daher unserem Wunsch auf Abänderung der Versuchsbedingungen gefolgt und wird zukünftig die Gebläse auf der Sohle des Kaltluftsees aufstellen. Es soll auf das Anblasen der Reben verzichtet werden, weil dies infolge der Reibung ja nur in einem ganz begrenzten Umfange in der Nähe der Gebläse von Erfolg sein kann. Die Gebläse sollen nunmehr den Fallwind verstärken und in seiner Richtung die Kaltluft aus dem Kaltluftsee beschleunigt entfernen helfen.

Es soll demnach nicht mehr Belüftung, sondern Entlüftung getrieben werden.

Wir lassen noch einige Angaben über die Kostenfrage folgen. Der Elektromotor hat eine Leistung von 10 Kilowatt. Bei der vorhandenen Aufstellung ist maximal ein Effekt von 1 Grad anzusetzen. Die Reichweite des Gebläses beträgt rund 30 m, so daß bei drehbarer Anordnung etwa  $\frac{1}{4}$  ha = 2500 m<sup>2</sup> vom Luftstrom bestrichen werden. Bei einem Preis von 10 Pfennig für die Kilowattstunde belaufen sich die Betriebskosten auf RM. 4.— je Hektar und Stunde unter der Voraussetzung, daß der Belüfter drehbar angeordnet ist. Zu den an sich nicht hohen Betriebskosten kommen natürlich die sehr hohen Kosten für die Tilgung der Anlage.

Zusammenfassend wird zu der Belüftung als Frostschutz festgestellt, daß weder die inländischen noch die ausländischen Versuche bisher befriedigende Resultate in der Frostschutzwirkung ergeben haben. Wenn überhaupt eine temperaturerhöhende Wirkung festgestellt wurde, dann war sie nur in nächster Entfernung von der Belüftungsanlage zu spüren.

### B. Die Entlüftung eines Tales (Luftdrainage).

Eine andere Anordnung der Belüfter, nämlich zum Zwecke des Auspumpens eines Kaltluftsees, ist noch nicht ausprobt, verspricht aber immerhin eher einen Erfolg als das unmittelbare Anblasen der Pflanzen in den Kulturen, wo durch Reibung die erzeugte Strömung zu schnell vernichtet wird.

Bei dem Abschnitt „Die natürliche Klimaverbesserung“ (Seite 22) haben wir auf die Bedeutung des verstärkten Abflusses von Kaltluft aus einem Tal hingewiesen. Während hier nur auf die natürlichen Mittel, nämlich

Entfernung von rückstauenden Hindernissen, Verminderung der Reibung der Bodenoberfläche, Vergrößerung des Gefälles usw. hingewiesen wurde, seien hier die künstlichen Mittel erwähnt, welche in Frage kommen können. Diese bestehen in dem Einsetzen großer Gebläse, wie es für den Fall Avelsbach vorgesehen ist. Gleichsinnig mit der Richtung des nächtlichen Bergwindes soll das Gebläse gerichtet werden und den Fallwind erheblich verstärken. Es tritt dann durch den stärkeren Fallwind 1. eine Auflockerung der stabilen Schichtung der Kaltluft auf der Talsohle ein, und 2. wird der Kaltluftabfluß nach dem Ausgang des Tales verstärkt.

Durch Anzünden starker Feuer auf der Talsohle erreichen wir eine erhebliche Verstärkung des Fallwindes, wie wir es am besten bei tief eingeschnittenen Tälern feststellen konnten, in denen nach Entzünden der Räucher- und Heizfeuer plötzlich der Fallwind sich erheblich verstärkte. Einen solchen Fall haben wir bei der Besprechung des Abriegelns der Fallwinde durch Sperrfeuer (siehe Bachemer Tal, Seite 146) beschrieben. Die großen Temperatargegensätze setzen eine lebhafte Entlüftung in Gang. Bei geschickter Anwendung starker Feuer auf den Talsohlen kann man erheblichen Einfluß auf den Abfluß der Kaltluft eines Tales gewinnen.

Die Idee, während der Nacht Viehherden durch das zu schützende Gebiet, z. B. eine ebene Obstplantage, dauernd hin und her zu treiben, ist für einen praktischen Betrieb, wo die Möglichkeit dazu geboten ist, gewiß nicht schlecht. Die Luftdurchmischung soll in Verbindung mit der Körperwärme der Tiere als Frostschutzmaßnahme angesehen werden. Dieses Verfahren wäre allerdings noch der Gruppe der Belüftungsverfahren zuzuordnen.

### C. Die Frostschadenverhütung durch Bewegen der Pflanzen.

In Frostnächten sind frei aufgestellte Körper gegenüber der Luft kühler. Diese Unterkaltung kann an Glasthermometern bis 2 Grad betragen und wird bei Pflanzenorganen nicht geringer, sondern eher größer sein. Bei ständigem Kontakt mit der strömenden Luft wird die Abkühlung dadurch aufgehoben, daß an Stelle der Kaltlufthaut, die den untertemperierten Körper umgibt, stets wärmere Luft tritt, die dem Körper Wärme durch Leitung zuführt. Durch genügend starke Belüftung kann also die nächtliche Untertemperatur teilweise oder ganz verhindert werden. Da es jedoch im Prinzip dasselbe ist, ob Luft an einem ruhenden Körper vorbei streicht oder aber der Körper in ruhender Luft bewegt wird, so kann man auch daran denken, der sich einstellenden Mehrabkühlung durch Bewegen der Pflanzen entgegenzutreten. Auf diesem Grundsatz beruht auch das strahlungsunempfindliche Schleuderthermometer von Schubert, das so schnell bewegt wird, daß eine Über- und Untertemperatur als Folge der Absorption und Emission von Strahlung nicht eintritt.

Wie Foß<sup>108)</sup> mitteilt, hat man in Norwegen schon von altersher eine auf dieser Idee beruhende Methode zur Verhütung von Frostschäden bei Getreide angewendet. Dabei gingen zwei Leute in einigem Abstand nebeneinander durch das Kornfeld und zogen ein Tau zwischen sich vorwärts, so daß es auf den Ähren fortglitt und dieselben dadurch in Bewegung setzte. Der Nutzeffekt war allerdings auch nach Ansicht von Foß sehr klein. Durch Ersetzen des Taus durch einen breiteren Leinwandstreifen wurde der Effekt etwas größer.

Auch gibt es Methoden, die zum Ziele haben, den Austausch zwischen Pflanze und Luft zu verstärken oder wenigstens nicht unnötig herabzusetzen. Aus diesem Grunde biegt man in Deutschland zum Beispiel häufig vor Beendigung der Frühjahrsfrostperiode die Rebzweige nicht und bindet sie auch nicht fest, so daß sie schon durch leichten Luftzug in Bewegung gesetzt werden.

## X. Die Beregnung als Frostschutz.

### A. Worin besteht die Schutzwirkung der Beregnung?

Unter den bekannten und gebräuchlichen Methoden der künstlichen Frostschadenverhütung nimmt die bisher im Ausland fast gänzlich unbeachtete Maßnahme der Beregnung eine Zwischenstellung ein. Wie bei den Verfahren der Bedeckung, der Räucherung und der Vernebelung wird ein schützender Stoff über die Pflanzen gebreitet. Im Falle der Beregnung beruht die Schutzwirkung aber weniger auf einer Verminderung der Ausstrahlung, wodurch eine Verzögerung des Temperaturrückganges und damit ein höherer Wert des nächtlichen Minimums erzielt wird; vielmehr gibt das auf die Pflanzen niederregnende Wasser im Augenblick des Erstarrens Wärme frei und verursacht dadurch eine unmittelbare Temperatursteigerung. Somit steht die Beregnung der Methode der Heizung näher, die ebenfalls auf einer Versorgung der zu schützenden Pflanzenteile mit Wärme entweder unmittelbar durch Strahlung oder auf dem Wege über die Luft durch Austausch und Leitung beruht. Neben dieser Hauptschutzwirkung der Beregnung treten noch einige weitere Schutzwirkungen auf, von denen jede für sich einen kleinen Effekt bedeutet. Während der Beregnung wird die Ausstrahlung infolge der Erhöhung des Wasserdampfgehaltes der bodennahen Luftschicht etwas herabgesetzt, es wird die Wärmeleitfähigkeit eines vorher trockenen

Bodens erhöht und schließlich wird eine, wenn auch unbedeutende, unmittelbare Erwärmung der Pflanzen dadurch erreicht, daß das Beregnungswasser wärmer ist als die beregneten Pflanzen.

Theoretische Erwägungen stellte Humphreys<sup>166)</sup> an, der zu dem Schluß kam, daß Erfolge durch Beregnung wenig wahrscheinlich, Versuche darüber aber immerhin erwünscht seien, während Hamrick<sup>143, 144)</sup> berichtet, daß in Colorado einige Farmer die zu schützenden Früchte ansprühten, um sie gewissermaßen durch die sich bildende Eisschicht zu schützen. Der Versuch führte zu einem negativen Ergebnis. Auch bei verschiedenen Versuchen deutscher Gärtner wird über das Fehlschlagen von „Besprühen“ (anstatt „Dauerberegnung“) der Pflanzen berichtet. Die Gründe des Versagens sind in unseren Versuchen klarge­stellt.

Die pflanzenphysiologische Erklärung eines Beregnungserfolges von Cline<sup>72)</sup>, wonach das Wasser von den Außenzellen der erfrorenen Pflanzen absorbiert wird, wenn sie auftauen, was die Zerstörung des Zellgewebes verhindern soll, scheint abwegig.

Von 1932 bis zum Jahr 1936 wurde auf dem Gelände der Provinzialgemüsebauschule durch das Institut für Klimaforschung bzw. die Agrarmeteorologische Forschungsstelle Trier eine Reihe von Versuchen zur Klärung des Fragenkomplexes „Beregnung als Frostschutz“ durchgeführt. Diese Versuche wurden in Zusammenarbeit mit der Studiengesellschaft für Feldberegnung (Dr. G. Schönopp) eingeleitet und konnten dank der Finanzierung aus Mitteln des Reichskuratoriums für Technik in der Landwirtschaft, Berlin, mehrjährig durchgeführt werden. Es erscheint später eine weitere Veröffentlichung über „Die Beregnung als Frostschutz“, wenn die Versuche als abgeschlossen gelten können.

### B. Die Beregnungsversuche bei Trier.

Von den hier angestellten Versuchen sollen nur diejenigen ausführlich besprochen werden, die zur Lösung einer der aufgeworfenen Fragen beigetragen haben.

1. Versuch: Nacht vom 27./28. Mai 1932. Kein Frost. Ort: Gemüsebauschule Trier. Regnersystem: Schwenkregner „Hydor“-Landregen und „Regenkanone“ von Siemens-Schuckert.  
Versuchspflanzen: Kartoffeln und Erdbeeren. Meßgeräte: Boden-, Minimum- und elektrische Widerstandsthermometer (künstliche Blätter) mit Registriergerät, Thermohygrographen in Hütten, Schwarzkugelaktinograph und Blankkugelschreiber.
2. Versuch: Nacht vom 15./16. Mai 1934. Tiefstgemessene Temperatur — 1,6 Grad. Ort: Gemüsebauschule Trier. Regnersystem: „Hydor“ und „Regenkanone“. Versuchspflanzen: Kartoffeln, Tomaten und Bohnen. Meßgeräte: wie bei 1; dazu Aßmann'sches Aspirations-Psychrometer und Thermobatterien zur Messung der Lufttemperatur, Schalenkreuzanemometer zur Bestimmung der Windstärke.
3. Versuch: Nacht vom 17./18. Mai 1934. Tiefstgemessene Temperatur — 2,2 Grad. Ort: Gemüsebauschule Trier. Alles übrige wie bei 2.
4. Versuch: Nacht vom 2./3. Mai 1935. Tiefstgemessene Temperatur — 3,1 Grad. Ort: Gemüsebauschule Trier. Regnersystem: Schwenkregner „Hydor“. Versuchspflanzen: Erdbeeren in Blüte, Kartoffeln. Meßgeräte: Minimumthermometer.
5. Versuch: Nacht vom 12./13. März 1936. Tiefstgemessene Temperatur — 2,6 Grad. Ort: Gemüsebauschule Trier. Regnersystem: Schwenkregner „Hydor“. Versuchspflanzen: Tomaten. Meßgeräte: Minimumthermometer.
6. Versuch: Nacht vom 23./24. April 1936. Tiefstgemessene Temperatur — 2,4 Grad. Ort: Gemüsebauschule Trier. Regnersystem: Schwenkregner „Hydor“. Versuchspflanzen: Tomaten, Bohnen, Weinreben. Meßgeräte: Bodenthermometer, Minimumthermometer geschützt und ungeschützt, elektrische Widerstandsthermometer, Thermohygrographen, Regenmesser.

#### 1. Die Versuche im Frühjahr 1932.

Die Gemüsebauschule in Trier, auf deren Gelände die Beregnungsversuche durchgeführt worden sind, liegt auf einem kleinen Plateau in etwa 170 m Meereshöhe am Ausgang des von Osten her in das Haupttal der Mosel einmündenden Olewiger Tälchens zwischen Olewig und Heiligkreuz.

Das eigentliche Versuchsfeld, das für die ersten Versuche im Frühjahr 1932 Verwendung fand, lag gegen 30 m über der Talsohle, stieg nach Westen hin sanft an und hatte eine Gesamtausdehnung von rund  $\frac{3}{4}$  ha. Die Einteilung des Versuchsfeldes sowie die Anordnung der aufgestellten Beregnungsapparate und Meßinstrumente geht aus dem Lageplan (Abb. 130) hervor. Nahezu senkrecht zu dem von NW nach SE verlaufenden Hauptweg war das bewegliche Schwenkrohr des „Hydor“ (Abb. 201, Tafel 8) am Rand einer Parzelle aufgestellt und zu einer Länge

von 60 m zusammengesetzt. Von der Mitte des Rohres aus waren nach Nordwesten hin auf einem Kartoffelfeld in Abständen von  $3\frac{1}{2}$ , 8 und  $14\frac{1}{2}$  m drei Pfähle postiert. Der nächstgelegene Pfahl stand in der Mitte der einseitigen Beregnungszone, der mittlere Pfahl bekam am Rand dieser Zone gerade noch einige Tropfen ab, während der äußerste Pfahl im doppelten Abstand der Zonenbreite frei von jeder Beregnung blieb.

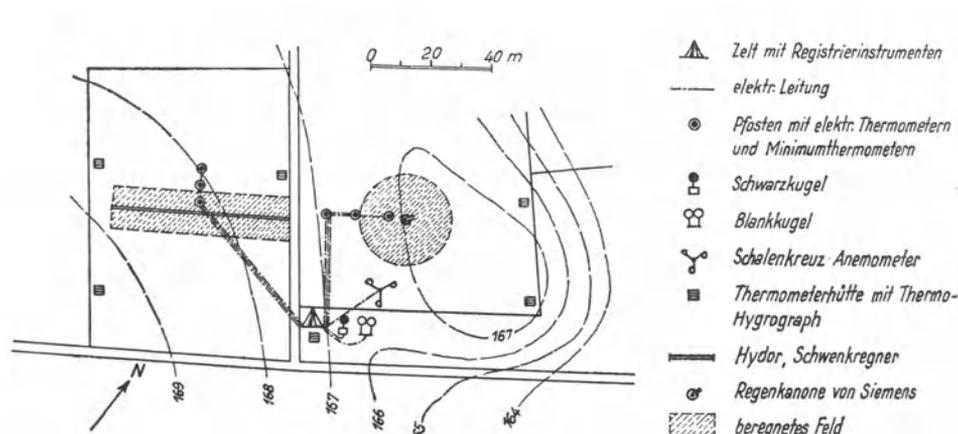


Abb. 130. Lageplan zu den Beregnungsversuchen in Trier-Olewig im Mai 1932.

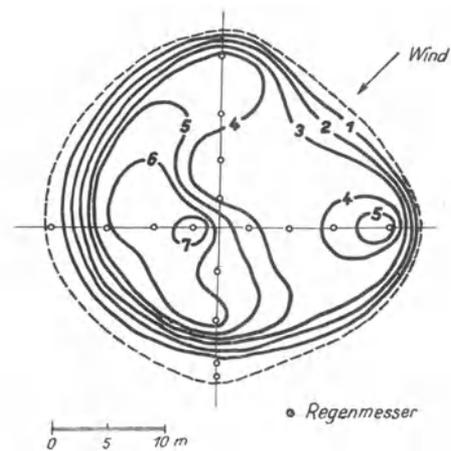


Abb. 131. Verteilung der von der Regenkanone gependeten Niederschlagsmenge (Ltr./m<sup>2</sup> Std.) auf die Bodenoberfläche in der Zeit von 20–21 h bei Windstärke 1–2 m/sec.

Nordöstlich des Hauptweges, in der ungefähren Verlängerung des Hydorrohres, war die „Regenkanone“ Modell RK 20 von Siemens & Schuckert (Abb. 202, Tafel 8) in 33 m Entfernung vom Weg, an dem die Hydranten lagen, auf einem mit Erdbeeren bepflanzt Stück aufgestellt. Von dieser aus standen wiederum drei Pfähle in Richtung auf den Weg, die  $5\frac{1}{2}$ , 16 und 27 m Abstand von der Regenkanone hatten. Der nächstgelegene Pfahl befand sich mitten im Hauptaktionsbereich des Regners, während der mittlere nur eben noch von einigen Tropfen erreicht werden konnte und der entfernteste völlig frei von Niederschlag blieb.

Um ein Bild von der Verteilung des Niederschlags einer Regenkanone innerhalb der Einflußzone zu gewinnen, wurden in einem Sonderversuch 16 Regenmesser in der auf Abbildung 131 wiedergegebenen Weise um die Regenkanone herum aufgestellt. Nach einstündiger Beregnung wurden die in den Regenmessern aufgefangenen Niederschläge gemessen. Diese Werte dienten dann als Grundlage zur Zeichnung einer Karte mit Linien gleicher Regenmenge, wie sie Abbildung 131 zeigt. Aus ihrem Verlauf geht hervor, daß die Verteilung keine gleichmäßige ist. Besonders deutlich ist eine Verschiebung der Hauptregenzone infolge der Windwirkung nach der Leeseite der Regenkanone hin zu erkennen. Hier kommen auf einem eng begrenzten Gebiet Niederschlagsmengen von über 7 Stundenlitern je Quadratmeter vor.)\*

An den drei erwähnten Pfählen waren Thermometer angebracht, die zur Messung der Luft- und Blatttemperaturen in verschiedener Höhe über dem Boden innerhalb und außerhalb der berechneten Zone dienen sollten. Jeder Pfahl trug zwei elektrische Widerstandsthermometer, eines in 10, das andere in 50 cm Höhe über dem Boden. Ein solches Widerstandsthermometer, das ein künstliches Blatt darstellte, bestand aus einem 0,2 mm dicken Pertinaxplättchen von  $14 \times 2,5$  cm Größe. Ein Nickeldraht (4,8 m lang, doppelt mit Seide umspinnen, 0,08 mm Durchmesser, 73 Ohm Widerstand bei 0 Grad C) war bifilar über die Hälfte des Pertinaxplättchens gewickelt, so daß die von ihm überdeckte Oberfläche  $17,5 \text{ cm}^2$  (einseitig) betrug. An dem wicklungsfreien Ende des Pertinaxplättchens wurde das Thermometer mit Isolierband an dem Pfahl befestigt, wobei die temperaturempfindliche Wicklung frei über den Boden zu liegen kam. Die Wicklung war mit gut isolierendem Bakelitlack überzogen, das Ganze mit weißem Lack dünn bestrichen. Das Thermometer hatte in dieser Form annähernd die gleiche Wärmekapazität wie ein gleichgroßes Pflanzenblatt. Die Befestigungsstellen am Pfahl befanden sich genau 10, bzw. 50 cm über der Bodenoberfläche, während die freistehenden Enden infolge der Eigenschwere und der Belastung bei der Beregnung sich etwas neigten und eine schräge, blattähnliche Stellung einnahmen, wie es auf Abbildung 203, Tafel 8 zu sehen ist.

Von den sechs Pfählen mit je zwei Blatthermometern führten insgesamt 24 gummiisolierte Kupferkabel von je  $1,5 \text{ mm}^2$  Querschnitt zu dem Zwölffachschreiber (Kreuzspulinstrument) der Firma Hartmann & Braun-

\*) Technische Daten zu diesem Versuch: Der Leitungsdruck, gemessen am Widerstand der Pumpe, betrug 5 atü. Die Regenkanone löste aus bei 3 atü. Die Pumpe benötigte 3 kW.

Frankfurt am Main, der mit anderen elektrischen Registrierinstrumenten in einem  $2 \times 3$  m großen Zelt untergebracht war, welches 35 m südöstlich der Beregnungsfelder Aufstellung gefunden hatte.

Die im Laboratorium vorgenommene Eichung wurde auf dem Felde nochmals kontrolliert, indem die Wicklungen der Widerstandsthermometer an Ort und Stelle in eine mit Eiswasser gefüllte Thermosflasche gesteckt wurden, wobei die Temperatur unter Umrühren an einem Normalthermometer abgelesen und der Leitungswiderstand abgeglichen werden konnte. Die Wicklungen waren so dimensioniert, daß für beide Meßgruppen auf den beiden Hälften des Registrierstreifens ein normaler Meßbereich von je  $+10$  bis  $-10$  Grad zur Verfügung stand. Die Gruppe I mit den Thermometern Nr. 1—6 schrieb auf der linken Seite und galt für die Hydoranlage; beim Übergang auf die rechte Hälfte des Papierstreifens konnten für diese Gruppe auch noch Temperaturen bis zu  $+30$  Grad registriert werden. Die Gruppe II mit den Thermometern Nr. 7—12 umfaßte die Anlage um die Regenkanone; sie registrierte rechts und konnte nur Temperaturen bis  $+10$  Grad aufzeichnen. Die Einstellungsdauer am Registriergerät betrug etwa 8 Sekunden, lag also noch unter der Umschaltzeit von 10 Sekunden.

Bei der Montage der Blatthermometer mußte streng darauf geachtet werden, daß weder durch die Benässung eine Verschlechterung der Kontakte eintreten konnte, was eine scheinbare Temperaturerhöhung ergeben hätte, noch durch Elektrolyte eine leitende Verbindung zwischen den Klemmen entstehen konnte, wodurch die Temperatur scheinbar erniedrigt worden wäre.

Außer mit elektrischen Thermometern, die eine Beurteilung der Blattemperatur ermöglichen sollten, war das Versuchsfeld mit sechs auf dem Boden stehenden meteorologischen Hütten versehen worden, in denen Thermo-hygrographen die Lufttemperatur und Luftfeuchte in einem Bodenabstand von 15 bis 20 cm registrierten. Die Verteilung der Meßstellen geht aus dem Plan (Abb. 130) hervor.

Um die auf den Pflanzenkörper einwirkenden Strahlungsverhältnisse ermitteln zu können, wurde eine Schwarzkugel nach Linke<sup>222)</sup> 1,2 m hoch in der Nähe des Zeltes aufgestellt. Diese Schwarzkugel ist ein Strahlungssummenmesser und erlaubt, eine Bilanz aller auf einen frei aufgestellten Körper einwirkenden Strahlungen zu gewinnen. Das Gerät besteht aus einer hohlen Kupferkugel von 10 cm Durchmesser, welche außen geschwärzt ist und daher maximal Strahlung absorbiert und emittiert. Thermoelemente im Innern der Kugel, welche in thermischem Kontakt mit dem Kupfermantel stehen, geben an einen Hartmann & Braun'schen Doppeltvolt-schreiber ihre Über- bzw. Untertemperaturen gegenüber Vergleichselementen weiter, welche in einer kleinen weißlackierten Thermometerhütte in gleicher Höhe über dem Boden auf Lufttemperatur gehalten werden. Aus der Übertemperatur der Kugel tagsüber und ihrer Untertemperatur gegenüber Luft während der Nacht kann jedoch nicht ohne weiteres auf den Betrag der überwiegenden Ein- oder Ausstrahlung geschlossen werden, da der Einfluß der Luftbewegung von großer Bedeutung ist. Tagsüber führt Luftbewegung in der Regel zu einer Abkühlung, nachts zu einer Erwärmung der Schwarzkugel. Die Luftbewegung über dem Versuchsfeld wurde durch ein elektrisch registrierendes Köpselanemometer (starker Wind) und eine Doppelblankkugel nach Linke-Dubois (schwacher Wind) bestimmt. P. Dubois hatte die Schwarzkugel und die Windmeßeinrichtungen geeicht, so daß nach Berücksichtigung des Windeinflusses aus der Über- und Untertemperatur der frei aufgestellten schwarzen Kugel gegen Luft die gesamte Ein- und Ausstrahlung (effektive Strahlung) in  $\text{mgcal/sec} \cdot \text{cm}^2$ , bezogen auf die Oberfläche der Schwarzkugel, berechnet werden konnte.\*)

Da während der Vegetationszeit im Frühjahr 1932 keine Nachtfröste eintraten, mußten wir uns mit Vorversuchen über die Einwirkung von Beregnungen auf die Temperaturverhältnisse des beregneten Raumes in Strahlungsnächten ohne Frost begnügen.<sup>315a)</sup> Zuerst wurde jedoch ein Versuch an einem heißen Tag unternommen, durch den die abkühlende Wirkung der Beregnung auf Pflanzenteile festgestellt werden sollte. Hierfür wurde der 20. Mai 1932 gewählt.

An diesem Tag herrschte über Deutschland eine flache Luftdruckverteilung. Das Trierer Gebiet lag unter einer kontinentalen, einem östlichen Hoch entstammenden Luftmasse, die sich bei intensiver Einstrahlung stark erwärmte.

An der benachbarten Hangstation des Instituts für Klimaforschung (200 m ü. NN.) wurden am 20. Mai bei einem mittleren Druck von 744,7 mm zu den drei Terminen die Lufttemperaturen 14,8, 28,6 und 20,3 Grad ab-

\*) Da die Blankkugeln nach Linke-Dubois (Abb. 210, Taf. 9) als Windmeßgeräte bisher in der Literatur nicht beschrieben sind, soll das Prinzip hier kurz erläutert werden. Zwei verchromte Kupferhohlkugeln von 10 cm Durchmesser werden in gleicher Höhe frei aufgestellt. In ihrem Innern befinden sich Thermoelemente mit thermischem Kontakt am Kupfermantel. Da die Blankkugeln infolge ihrer Verchromung die Strahlung reflektieren, stellen sich die in ihnen untergebrachten Thermoelemente annähernd auf Lufttemperatur ein. Eine der Kugeln wird durch Zufuhr von konstantem Strom geheizt und müßte bei ruhender Luft eine entsprechende Übertemperatur gegenüber der anderen, nicht beheizten Kugel haben. Diese Übertemperatur ist jedoch infolge des Windeinflusses nicht vorhanden, da jeder Luftstrom abkühlend wirkt. Nach Eichung im Windkanal ist die Stärke der Luftbewegung aus der abkühlenden Wirkung des Windes zu ermitteln so daß nunmehr auch ein Eichfaktor für die Schwarzkugeln angebracht werden kann.

gelesen. Das Maximum betrug dort 29,7 Grad, hatte also fast die Höhe eines Tropentages erreicht. Seit dem Morgen des 18. Mai war kein Niederschlag mehr gefallen. Die absolute Feuchte erreichte ein Tagesmittel von 10,2 mm, während die relative Feuchte zu den drei Terminen 81, 35 und 56 % betrug. Die Bewölkung nahm nach Morgennebel bei schwachen südlichen Winden gegen Mittag einen Betrag von acht Zehnteln an, der bis zum Abend wieder auf zwei Zehntel zurückging.

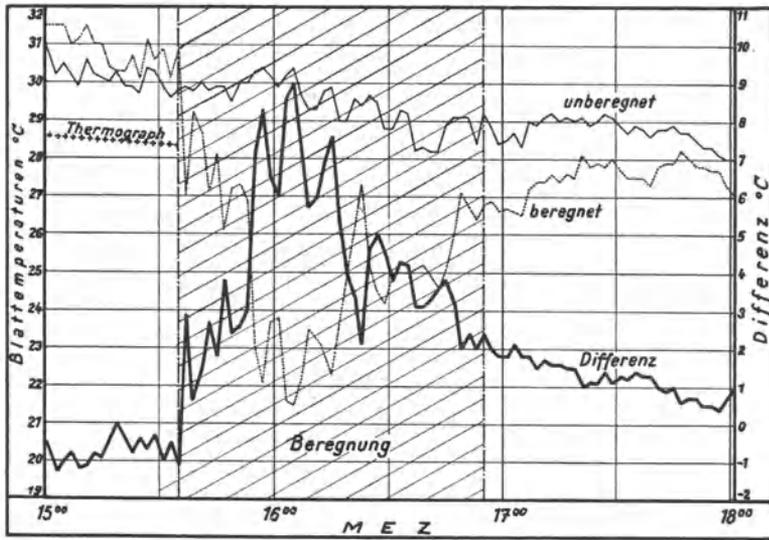


Abb. 132. Blatt-Temperaturen an einem sonnigen Tag (20. Mai 1932) über einem unberegneten und einem mit Hydor beregneten Feld bei einer Blattohöhe von 50 cm über Boden und 15 Grad Wassertemperatur.

also ohne Anbringung einer Windkorrektur, einem Wärmegewinn von 2,3 bis 1,6 mgcal/sec · cm<sup>2</sup>. Von einer Reduktion auf Windstille wurde in diesem Fall abgesehen, da nicht allein der reine Strahlungseinfluß erfaßt werden sollte, sondern die Gesamtwärmebilanz des exponierten Körpers.

Die Hydoranlage war an diesem Nachmittag an anderer Stelle aufgestellt und zwar so, daß je ein Thermometer in 50 und in 10 cm über Boden im Beregnungsbereich des Hydors lag, während zwei andere Thermometer in gleicher Aufstellungsweise vollkommen trocken blieben und von dem äußersten Rand der Regenzone etwa 4 m entfernt waren. Die Beregnung fand von 15 Uhr 35 bis 16 Uhr 55 statt.

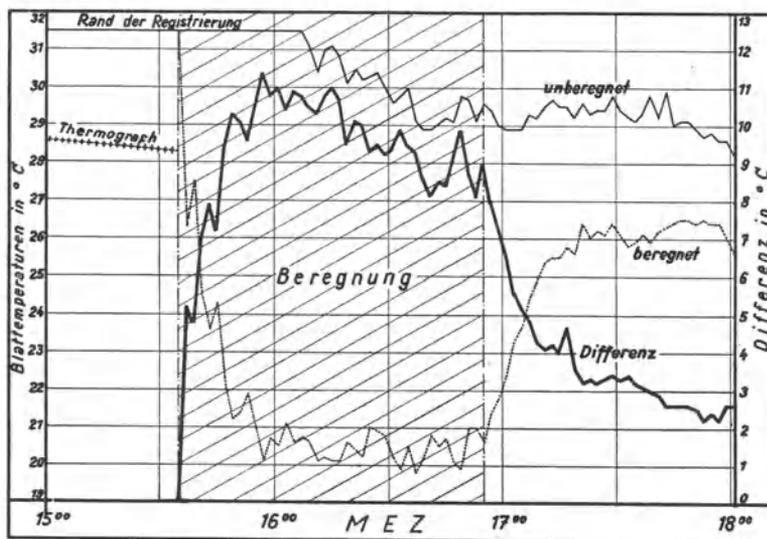


Abb. 133. Blatt-Temperaturen über beregnetem und unberegnetem Teil des Versuchsfeldes in 10 cm Höhe über Boden. (Sonstige Bedingungen wie bei Abb. 132).

Schwankungen etwa 9—10 Grad kälter als das gleichhohe trockene, während in 50 cm Höhe eine meist geringere Abkühlung eintrat, die sich zwischen 3 und 9 Grad bewegte und starken Schwankungen unterworfen war. Die Temperatur des Wassers, das den Regner speiste, betrug 15 Grad. Trotzdem hatte das bodennahe Thermometer seinen tiefsten Stand während der Beregnung bei 19,8 Grad, das höhere bei 21,5 Grad. Nach Beendigung der Beregnung war der Einfluß auf das 50 cm hohe Thermometer im Verlaufe einer knappen Stunde bis auf eine Abkühlung von 1—2 Grad abgeklungen, während das 10 cm hohe Thermometer um 18 Uhr noch 3 Grad Untertemperatur zeigte.

Der Hydor spendete auf eine Gesamtfläche von 950 m<sup>2</sup> rund 4 m<sup>3</sup> Wasser je Stunde. Für die Dauer der Versuchsberegnung waren also 2,5 m<sup>3</sup> Wasser über dem Aktionsbereich gefallen, das sind durchschnittlich 5,5 Liter

Nach Registrierung des Hüttenthermohygrographen am Zelt auf dem Versuchsfeld war das Temperaturmaximum von 28,8 Grad beim Versuchsbeginn gerade unterschritten; in der Folgezeit erfuhr die Temperatur einen gleichmäßigen Rückgang von 28,6 auf 26,8 Grad am Abend. Die Luftfeuchte erreichte gegen 16 Uhr mit 42 % ihr Minimum.

Der Einfluß der Sonnenstrahlung konnte sich an dem Versuchsnachmittag bei wechselnder Bewölkung nicht voll auswirken. Die Übertemperatur der Schwarzkugel gegen Luft schwankte zwischen 9,9 Grad nachmittags und 6,6 Grad am Abend. Dies entsprach mit Einschluß des Windeinflusses,

Wie die Abbildungen 132 und 133 zeigen, hatten die blattähnlichen Widerstandsthermometer zu Beginn des Versuchs Temperaturen, die einige Grad über der Lufttemperatur (Thermograph) lagen. Der Unterschied betrug in 10 cm Höhe bis 16 Uhr mehr als 3 Grad, um 17 Uhr fast 2 Grad und um 18 Uhr 1½ Grad.

Während die Temperaturen der beiden Thermometer in 50 cm Höhe vor der Beregnung durchschnittlich nur um 1 Grad voneinander abwichen, setzte sofort nach Beginn der Beregnung ein rascher Temperatursturz an dem nassen Blatthermometer ein. Die stärkste Abkühlung war nach etwa 30, in 10 cm Höhe schon nach 20 Minuten erreicht. Von dieser Zeit an blieb das bodennahe nasse Blatthermometer bei geringfügigen

je Quadratmeter. Mithin gab der Hydor nahezu die gleichen Mengen ab wie die Regenkanone (Abb. 131). Die beregneten Thermometer wurden innerhalb einer Minute, während welcher das Rohr hin und her ging, nur einige Sekunden lang von den Wasserstrahlen des Hydor getroffen.

Das unterschiedliche Verhalten der verschiedenen hohen Thermometer im Beregnungsfeld läßt sich durch den Einfluß des Windes erklären. Schon an dem Verlauf der von den unberegneten Thermometern aufgezeichneten Temperaturen sind die mehr oder weniger periodischen Schwankungen der Windstärke zu erkennen. Bei starkem Wind wird das Wasser während der Beregnungspause durch die Bewegung der Blätter abgeschüttelt, so daß höhere Durchschnittstemperaturen zustande kommen. Diese Schwankungen machen sich naturgemäß an dem 50 cm hohen Blatt stärker geltend als in der windgeschützten Bodennähe, wo die Abkühlung insgesamt stärker ist.

Nach den Ergebnissen des Tagesversuchs findet also durch die Beregnung eine Abkühlung der blattähnlichen Widerstandsthermometer statt, die auch nicht annähernd bis an die Wassertemperatur herunterreicht. Obwohl das Sprühwasser beim Austritt aus den Düsen infolge der plötzlichen Druckentspannung noch einen Temperaturrückgang erfährt, nehmen die Wasserteilchen auf ihrem Weg durch die Luft bis zum Auftreten auf das Blatt wieder höhere Temperaturen an. Im vorliegenden Fall arbeitete die Beregnungsanlage mit einem atmosphärischen Überdruck von etwa 3 atü.

Entsprechend diesem Versuch mußte zunächst untersucht werden, ob in kalten Nächten, in denen das Minimum der Lufttemperatur noch oberhalb des Gefrierpunktes liegt, eine wesentliche Erwärmung der künstlichen Blätter durch die Beregnung zu erzielen sei. Die ersten Versuche in dieser Richtung wurden in der Nacht vom 27./28. Mai 1932 durchgeführt.

Im Laufe des 27. Mai 1932 war auf der Rückseite eines zentral-europäischen Tiefdruckwirbels Kaltluft in das Moselgebiet vorgedrungen, wobei die Temperatur an der benachbarten Station Trier-Berg (200 m über NN.) bis auf +8 Grad zum Abendtermin (21 Uhr 33) zurückging. Obwohl es sich um ältere arktisch-maritime Luft handelte, wurde ein Versuch für die folgende Nacht angesetzt, da ein günstigerer Fall in diesem Frühjahr kaum mehr zu erwarten war, was sich in der Folgezeit bestätigte. Trier-Berg verzeichnete in der Normal-Hütte, 2 m über Grund, eine Minimumtemperatur von +4,2 Grad in der Nacht vom 27./28. Mai. Das vorangegangene Tagesmaximum hatte nur 14,0 Grad betragen. Der Dampfdruck sank von 7,5 mm am Abend auf 6,3 mm am nächsten Morgen, war also in dieser Nacht sehr niedrig.

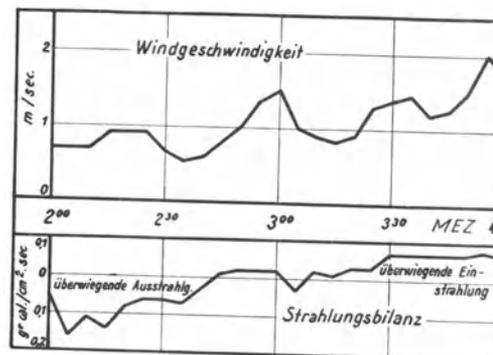


Abb. 134. Gang der Windgeschwindigkeit und der Gesamtstrahlung am 28. Mai 1932 in Trier-Olewig.

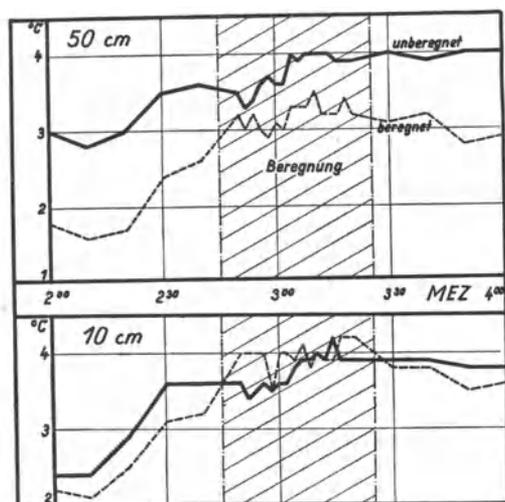


Abb. 135. Temperaturverlauf an den beregneten und unberegneten Blatt-Thermometern in 50 und 10 cm Bodenabstand, Innenzone (Hydor, 28. Mai 1932).

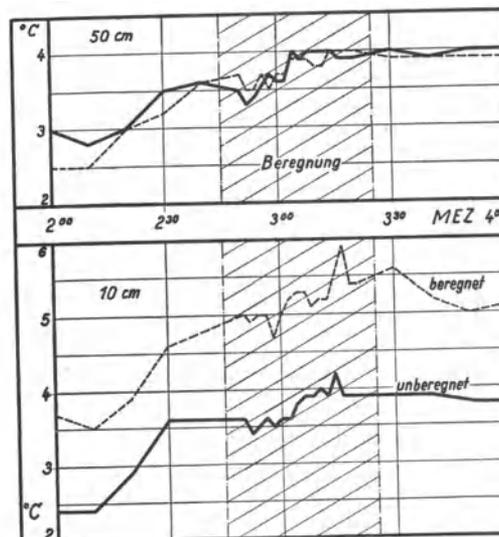


Abb. 136. Temperaturverlauf an den beregneten und unberegneten Blatt-Thermometern in 50 und 10 cm Bodenabstand, Randzone (Hydor, 28. Mai 1932).

Am 27. waren 12,7 mm Regen gefallen, der um 13 Uhr 20 aufhörte. Die Nacht war fast wolkenlos. Nach Mitternacht begann sich langsam Dunst zu bilden, der sich bis zum Morgentermin (07 Uhr 33) in dichten Nebel verwandelte. Gegen Morgen konnte stellenweise leichter Reif beobachtet werden.

Nach den Aufzeichnungen des Hütten-Thermographen hinter dem Zelt auf dem Versuchsgelände wurde das

Minimum in 15—20 cm Höhe mit +3,2 Grad um 02 Uhr 30 erreicht. Danach stieg die Lufttemperatur wieder langsam auf 3,6 und 4,0 Grad an. Die relative Feuchte betrug während der ganzen Zeit zwischen 96 und 98 %.

Die Schwarzkugel registrierte bis 02 Uhr 45 überwiegend Ausstrahlung. Dann setzte mit zunehmender Dunstbildung eine schwache Übertemperatur der Kugel gegen Luft ein. Gleichzeitig frischte der aus südöstlicher Richtung kommende Luftzug, der bis 02 Uhr 50 unter 1,0 m/sec geblieben war, allmählich bis zu 2,0 m/sec auf (Abb. 134).

Die Registrierungen der elektrischen Thermometer lassen erkennen, daß die Beregnung in der Versuchsnacht nur einen geringen Einfluß auf die Temperaturen der künstlichen Blätter ausüben vermochte. Auch die Kontrollablesungen an den Minimumthermometern, die in geringem Abstand neben den Blatthermometern standen, ergaben nur schwache Temperaturänderungen.

Tabelle 37. Mittlere Temperaturdifferenzen der beregneten und unberegneten Blatthermometer in 50 und 10 cm Blatthöhe

	Hydor				Regenkanone	
	Innenzone		Randzone		Randzone	Starkregengebiet
	50 cm	10 cm	50 cm	10 cm	10 cm	10 cm
vor der Beregnung . .	- 1,2	- 0,3	- 0,2	+ 1,1	- 0,5	- 0,3
während der Beregnung	- 0,6	+ 0,2	0,0	+ 1,4	- 0,4	- 0,4
nach der Beregnung .	- 1,0	- 0,2	- 0,1	+ 1,4	- 0,5	- 0,5
Effekt . . . . .	+ 0,6	+ 0,5	+ 0,2	+ 0,3	+ 0,1	- 0,1

Abbildung 135 gibt den Verlauf der Temperaturen an den beregneten (gestrichelt) und unberegneten Blatthermometern wieder, und zwar unten in 10 cm, oben in 50 cm Höhe. Zufälligerweise lagen die Temperaturen in dem zu beregnenden Feld von vornherein etwas tiefer als die in der Außenzone. Dies ist wohl auf kleine Geländeunterschiede zurückzuführen. In beiden Fällen tritt eine, wenn auch schwache, erwärmende Wirkung der Beregnung deutlich in Erscheinung. Kurz nach Beginn der Beregnung nähern sich die Kurven einander, da die Temperaturen im beregneten Feld nach dem Minimum schneller ansteigen als im unberegneten. Nach der Beregnung, die von 02 Uhr 45 bis 03 Uhr 25 dauerte, laufen die Kurven wieder auseinander, wobei die Temperaturen im Regenfeld wieder zu den natürlichen Werten ohne Beeinflussung zurückkehren. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Höhen ist nicht nachzuweisen; denn der Effekt beträgt einmal 0,5, das anderemal 0,6 Grad (siehe Tabelle 37).

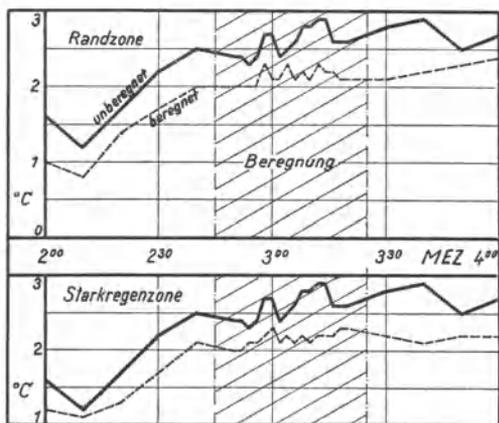


Abb. 137. Temperaturverlauf an den beregneten und unberegneten Blatt-Thermometern im Regen- gebiet und in der Randzone der Regenkanone für 10 cm Blatthöhe (28. Mai 1932).

Die nächste Abbildung 136, welche die entsprechenden Verhältnisse in der Randzone des Hydors zur Darstellung bringt, läßt kaum noch einen Einfluß der Beregnung auf die Temperaturen der künstlichen Blätter erkennen. Der Effekt beträgt 0,2 bis 0,3 Grad. In Bodennähe ist vielleicht eine gewisse Nachwirkung festzustellen. Auch im zentralen Teil und in der Randzone des Regenfeldes der Regenkanone ist kein merklicher Temperatureffekt nachzuweisen (Abb. 137).

Die Versuche des Frühjahrs 1932 haben also gezeigt, daß die Beregnung bei einer Wassertemperatur von 12—15 Grad keine nennenswerte Erwärmung der Pflanzenteile hervorzubringen vermag, wenn die Lufttemperaturen und die Temperaturen der Blätter etwas über dem Gefrierpunkt liegen. Ob die Beregnungsmethode zur Abwehr des Frostes brauchbar ist, konnte daher nur entschieden werden durch Ausdehnung

der Untersuchungen auf Beobachtungen von Vorgängen, die sich beim Unterschreiten des Gefrierpunktes abspielen. Zu solchen Versuchen boten drei Frostnächte während der beginnenden Vegetationszeit im Mai 1934 Gelegenheit.

## 2. Die Versuche im Frühjahr 1934.<sup>315\*</sup>)

Bei diesen Versuchen wurden außer den bereits beschriebenen Meßinstrumenten vergleichsweise auch Thermobatterien zur Messung der Lufttemperatur herangezogen (Abb. 203, Tafel 8). Freistehende Lötstellen dünner Drähte wurden der Lufttemperatur und den Beregnungseinflüssen ausgesetzt. Die geringe Wärmekapazität in Verbindung mit unbedeutender Wärmeleitung hatte ein rasches Einstellen auf plötzliche Temperaturschwankungen zur Folge, wodurch auch rasche Änderungen erfaßt werden konnten.

Eine solche Thermobatterie bestand aus fünf etwa 25 cm langen seidenumspunnenen Konstantandrähten und fünf ebenso langen und ebenso isolierten Manganindrähten von je 0,2 mm Durchmesser. Ihre Enden waren paarweise so aneinander gelötet, daß für die auf konstanter Temperatur zu haltenden Vergleichslötstellen fünf, für die der Lufttemperatur auszusetzenden Lötstellen vier Elemente zur Verfügung standen.

Die Drähte lagen einem Isolierstab von 5 mm Dicke an, wobei die Vergleichslötstellen an einem Ende des Stabes befestigt, während die freien Lötstellen durch einen Hartgummikopf geführt waren, aus dem sie 4—5 cm weit herausragten. Die Durchführung wurde durch Kitt gegen Feuchtigkeit abgedichtet. Der Stab war von einem wärmeisolierenden Rohr umgeben, das auf der einen Seite mit dem Hartgummikopf, auf der anderen mit einem Messingstutzen verschraubt werden konnte. Beide Verschraubungen waren durch besondere Dichtungsringe gegen das Eindringen von Wasser geschützt.

Diese Thermobatterien waren so angeordnet, daß das Ende mit dem Messingstutzen, hinter dem die Vergleichslötstellen durch Lack gegen elektrischen Kontakt geschützt lagen, in eine mit Eiswasser gefüllte Thermosflasche gesteckt wurde, während das Kopfende mit den vier freistehenden Thermoelementen und den zwei Anschlußklemmen etwa 10 cm aus dieser herausragte.

Die Registrierung erfolgte mit Hilfe eines Sechsfachschreibers der Firma Siemens & Halske. In der Mitte des Registrierstreifens entsprach 1 Grad Temperaturänderung einem Skalenintervall von 2,2 mm. Der Papiertransport wickelte sich mit einer Geschwindigkeit von 2 cm in der Stunde ab. Die Empfindlichkeit des Instruments betrug 1,5 mV für den Gesamtausschlag.

Zur Eichung an Ort und Stelle (Abb. 204, Tafel 8), wurde ein Gummitiegel mit entsprechender Ausbohrung derart über das Isolierrohr gezogen, daß die freien Lötstellen in das eingefüllte Eiswasser eintauchten. Befanden sich gleichzeitig die Vergleichslötstellen im Eiswasser der Thermosflasche, so mußte das Anzeigeelement die Nullage einnehmen. Zur Einstellung einer höheren Temperatur wurden die Meßlötstellen in ein Wasserbad von 10 oder 20 Grad gebracht. Die genaue Temperatur ließ sich mit einem geprüften Quecksilberthermometer unter Wahrung genügenden Strahlungsschutzes ermitteln. Durch Wahl geeigneter Vorschaltwiderstände konnte eine entsprechende Einstellung des Registrierinstrumentes erzielt werden.

Alle Registrierinstrumente wurden in einem besonders hergerichteten Gehäuse untergebracht (Abb. 205, Tafel 8), das im Freien stehen konnte und sich gut bewährt hat. Es bestand aus einem Holzschrank mit zwei Flügeltüren und hatte eine Höhe von 100 cm, eine Breite von 140 cm und eine Tiefe von 70 cm. Innen war er durch eine zweite Holzschicht verstärkt, außen mit Blech überzogen, das durch Anstrich mit Rostschutzfarbe, weißer Ölfarbe und Lack gegen Verwitterung geschützt war; er stand auf vier Holzklötzen von etwa 20 cm Höhe. Besondere Kabeleinführungen mit dachförmigem Vorsprung dienten zur Aufnahme der Leitungsdrähte. Die linke Seitenwand des Schrankes nahm den Zwölfachschreiber von Hartmann & Braun auf. Darunter waren die Abgleichwiderstände angebracht. Auf der gleichen Seite stand auch eine Akkumulatorenbatterie von 4 Volt zur Speisung der Widerstandsthermometer. Die rechte Innenwand trug den Sechsfachschreiber von Siemens & Halske. In der gleichen Ecke befand sich an der Rückwand die zugehörige Kontaktuhr, welche alle 20 Sekunden umschaltete, so daß jede Thermobatterie in Abständen von 2 Minuten registrierte.

Wegen der Gefahr, daß durch Kondenswasser die Instrumente Schaden litten, und zur Vermeidung übermäßiger Durchfeuchtung und Abnutzung der Farbbänder in den Registriergeräten waren im Schrank stets einige Schalen mit Chlorkalzium aufgestellt, welche die Innenluft des Schrankes verhältnismäßig trocken hielten. Um andererseits zu vermeiden, daß die Farbbänder bei großer Trockenheit versagten, wurden diese von Zeit zu Zeit mit Glycerin befeuchtet.

Wie der Lageplan (Abb. 138) zeigt, waren die beiden Beregnungsgeräte in einem Kartoffelfeld aufgestellt worden. Die Regenkanone stand in der Verlängerung des Hydorrohres. Die äußersten Ränder der Regenzone beider Geräte waren etwa 8 m voneinander entfernt. Da beide nur etwa 4 m von dem Nordostrand des Kartoffelfeldes entfernt standen, bestrichen sie auch noch einen Teil des unbepflanzten Nachbarfeldes. Auf diesem standen während der Versuchsnächte mehrere Tomaten- und Bohnenpflanzen in Töpfen.

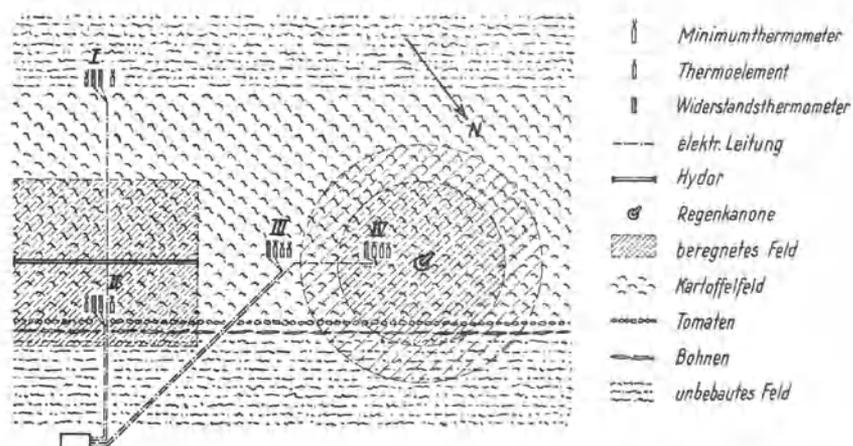


Abb. 138. Lageplan zu den Beregnungsversuchen in Trier-Olewig im Mai 1934.

Die Kartoffeln, Sorte Holländer Erstlinge, waren am 27. Januar zum Vorkeimen hergerichtet worden, während die Auspflanzung am 7. April bei einer Größe der Keime von 28—40 mm erfolgte. Die Reihen verliefen von Südost nach Nordwest in Abständen von 50 cm, während in der Reihe selbst ein Abstand von 40 cm gewählt war. Die vorgetriebenen Tomaten und Bohnen wurden am Vortage (15. Mai) des ersten Versuches ins Freie gestellt.

Von allen Pflanzen standen einige in der Einflußzone des Hydor, andere in der der Regenkanone und schließlich auch mehrere im nicht berechneten Feld.

Die Temperaturmeßgeräte waren ähnlich aufgestellt wie bei den Versuchen des Jahres 1932. Etwa 9 m vom Rand der Beregnungszone des Hydor entfernt befand sich die unbeeinflusste Außenstation I. Zu ihr gehörten zwei Minimumthermometer in Bodenabständen von 20 und 50 cm, dazu zwei Widerstandsthermometer in denselben Höhenstufen. In gleicher Weise war die Innenstation II des Hydor ausgerüstet, die  $3\frac{1}{2}$  m von der Mitte des Regenrohres entfernt stand. Station III befand sich am äußersten Rand der Einflußzone der Regenkanone und bestand aus zwei Minimumthermometern in 20 und 50 cm Höhe, einem Widerstandsthermometer in 50 cm Höhe und einer Thermobatterie in gleichem Bodenabstand. Die etwa 3 m von der Regenkanone entfernte Station IV setzte sich aus den gleichen Meßgeräten wie die Station III zusammen.

Das Versuchsfeld lag auf dem Gelände der Gemüsebauschule bei Trier, wenige Meter nordwestlich des alten Versuchsfeldes von 1932. Die freie, fast horizontale Lage des Feldes ist für die Ausbildung einer bodennahen Kaltluftschicht in klaren Nächten verhältnismäßig günstig. Das Versuchsfeld wird noch etwas berührt von dem Fallwind, der in Strahlungsnächten aus dem Oewigertal und dem Tiergartental herauskommt und sich hier als schwache Strömung aus südöstlicher Richtung bemerkbar macht. Nebel ist hier verhältnismäßig selten zu beobachten. Dieser liegt meist tiefer über der Talsohle am Weberbach oder im Trierer Talkessel.

Am 15. Mai, dem Tage vor der ersten Versuchsnacht, brachte eine nordwestliche Luftströmung unserem Gebiet arktische Luftmassen, deren rasches Zusammensinken eine Aufheiterung zur Folge hatte, so daß in der kommenden Nacht mit stärkerem Temperaturrückgang zu rechnen war. Während der Nacht vom 15./16. blieb der Himmel meist klar, nur gegen Morgen waren am Westhorizont etwa zwei Zehntel hohe Haufenwolken zu beobachten. Schwache Dunstbildung stellte sich in den Niederungen ein. Nach Messungen mit dem Aßmann'schen Aspirations-Psychrometer hatte die Lufttemperatur in dieser Nacht den Taupunkt nicht unterschritten. Die Luftbewegung war außergewöhnlich schwach und beschränkte sich fast ausschließlich auf das Abfließen der Kaltluft.

Wie verschieden die Angaben der benutzten Temperaturmeßgeräte sind, zeigt die Gegenüberstellung der mit dem Aßmann gewonnenen Werte und der korrigierten Ablesungen am Minimumthermometer sowie der Registrierungen des Thermohygrographen und des elektrischen Widerstandsthermometers im unberechneten Feld (Abb. 139). Alle Thermometer befanden sich in einer Höhe von 50 cm über dem Boden mit Ausnahme des Aspirations-Psychrometers, das in 1,50 m Bodenabstand an einem Pfahl hing.

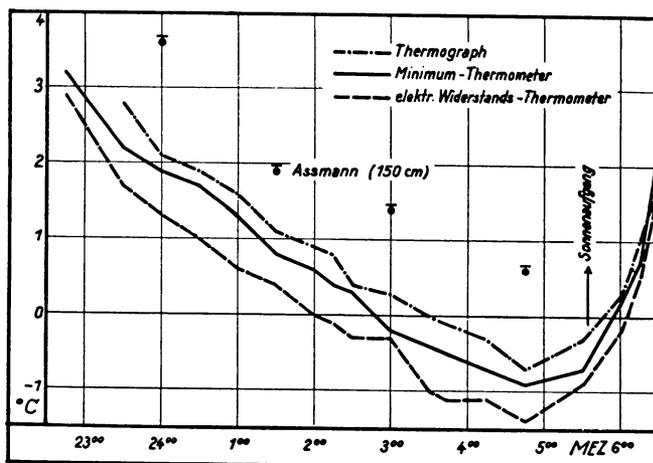


Abb. 139. Temperaturverlauf in der unberechneten Zone in 50 cm Höhe (15./16. Mai 1934).

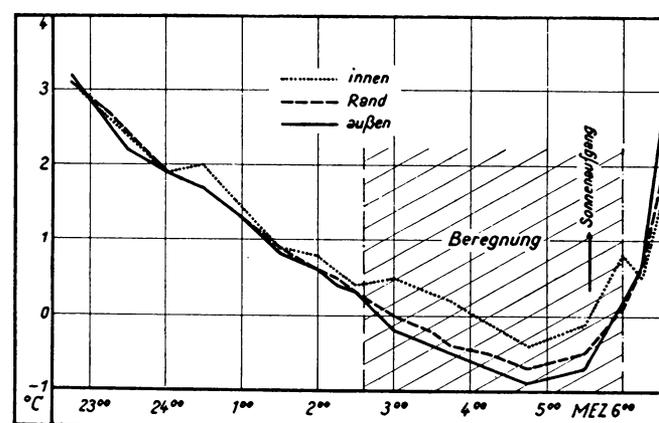


Abb. 140. Temperaturverlauf an den Alkoholthermometern in 50 cm Höhe innerhalb und außerhalb des Hydorfeldes.

Die vier Werte des hochgelegenen und gegen Ausstrahlung geschützten Aßmann liegen weit über den Angaben der anderen Thermometer. Von diesen wiederum schreibt der Thermohygrograph am höchsten. Sein temperaturempfindliches Bourdonrohr erfährt durch den darüber liegenden Schutzkorb aus Draht für das Haar des Hygrometers einen gewissen Strahlungsschutz. Die Ablesungen des Minimumthermometers liegen durchweg um

fast  $\frac{1}{2}$  Grad tiefer. Hier macht sich die Wirkung der Ausstrahlung schon stärker geltend. Den größten Ausstrahlungseffekt zeigt aber das elektrische Widerstandsthermometer, welches noch  $\frac{1}{2}$  Grad tiefer registriert als das Minimumthermometer anzeigt.

Tabelle 38. Mittlere Temperaturdifferenzen zwischen den elektr. Blatthermometern im Hydorfeld und außen

	in 50 cm Höhe	in 20 cm Höhe
vor der Beregnung . . .	+ 0,6	+ 0,2
während der Beregnung .	+ 1,3	+ 0,8
Effekt . . . . .	+ 0,7	+ 0,6

Die Abbildung 140 wurde aus den halbstündlichen Ablesungen an den 50 cm hohen Minimumthermometern der Außenstation I, der Innenstation II des Hydor und der Zwischenstation III gewonnen (Tabelle 38). Während die Werte bis 02 Uhr 30 mit nur geringen Unterschieden von ausnahmsweise 1—2 Zehntel Grad gleich-

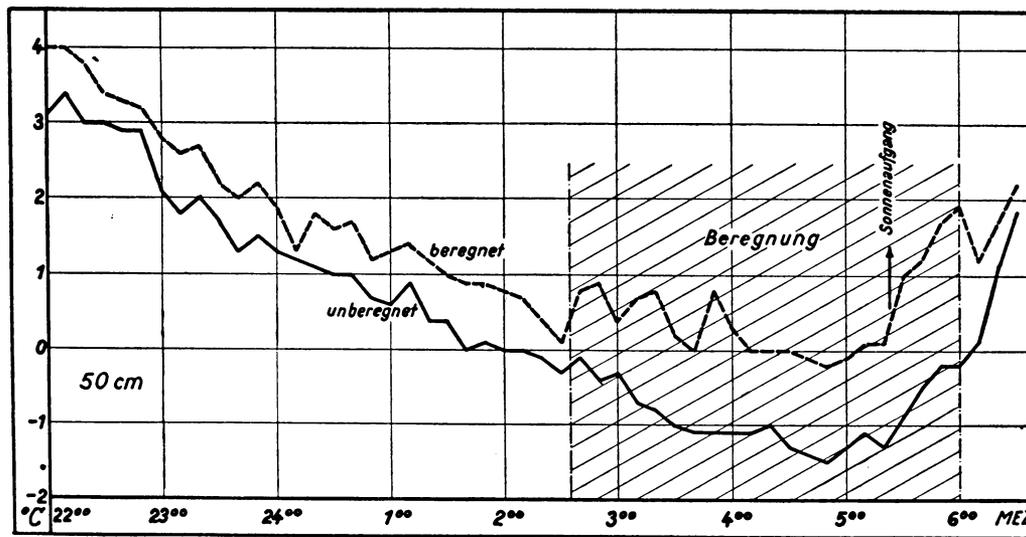


Abb. 141. Temperaturverlauf an den elektrischen Blatt-Thermometern im Hydorfeld und außen in 50 cm Höhe.

förmig absinken, beginnt bei einsetzender Beregnung um 02 Uhr 35 eine deutliche Differenzierung. Die Temperatur am beregneten Thermometer steigt zunächst etwas an, um nach einer halben Stunde in konstantem Abstand von

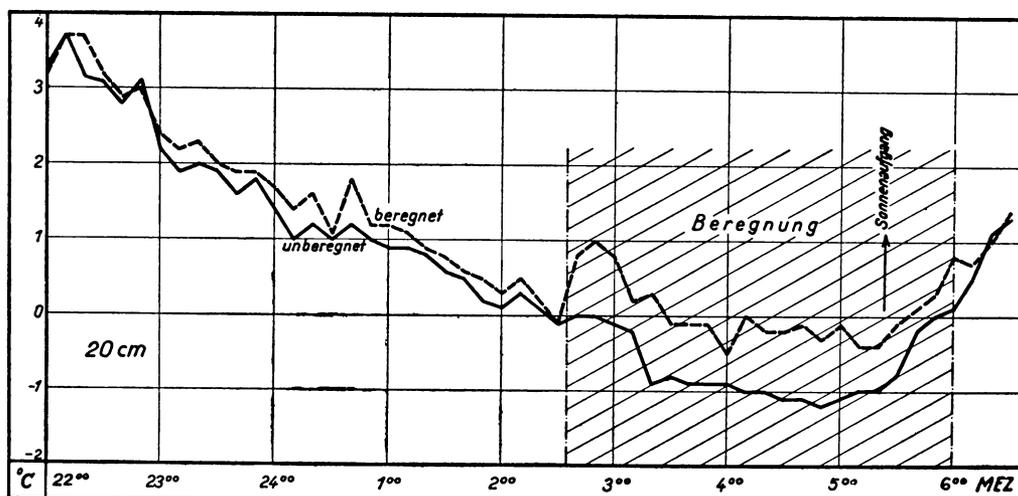


Abb. 142. Temperaturverlauf an den elektrischen Blatt-Thermometern im Hydorfeld und außen in 20 cm Höhe.

etwa 0,7 Grad über den Werten des unberegneten zu bleiben. Das Thermometer der Randzone, welches nur ganz vereinzelt einige Tropfen von der Regenkanone abbekam, verrät eine merkliche, wenn auch unbedeutende Temperatur-

erhöhung. Unmittelbar nach dem Abstellen des Regengerätes um 06 Uhr fällt die Temperatur an der Innenstation steil ab, um sich den Werten der beiden anderen Stationen anzugleichen.

Ein Vergleich zwischen den elektrischen Blatthermometern in der Außenzone und denen im Regenfeld des Hydor (Abb. 141 und 142) ergibt für beide Bodenabstände eine deutliche Beeinflussung. Mit der Beregnung wurde begonnen, nachdem das 50 cm hohe Elektrothermometer am Hydor den Nullpunkt gerade erreicht hatte. In der Folgezeit steigt dieses Thermometer zunächst rasch an, bis auf etwa 1 Grad, um dann bei unruhigem Verlauf entsprechend dem Gang des Außenthermometers langsam zu sinken. Erst nachdem die Außentemperatur so tief gesunken ist, daß das Wasser beim Auftreffen auf das künstliche Blatt sofort gefriert, bewegen sich die Temperaturen von 04 Uhr an mit geringen Schwankungen um den Nullpunkt herum. Den raschen Anstieg des Außenthermometers nach 05 Uhr 20 (Sonnenaufgang) macht auch das beregnete Thermometer mit, bis um 06 Uhr ein plötzlicher Temperaturrückgang erfolgt, der auf das Einsetzen des Abschmelzvorganges zurückzuführen ist.

Von besonderem Interesse ist die Gegenüberstellung der Registrierungen von Widerstandsthermometer und Thermobatterie im Feld der Regenkanone (Abb. 143). Zunächst laufen beide Temperaturkurven nebeneinander her.

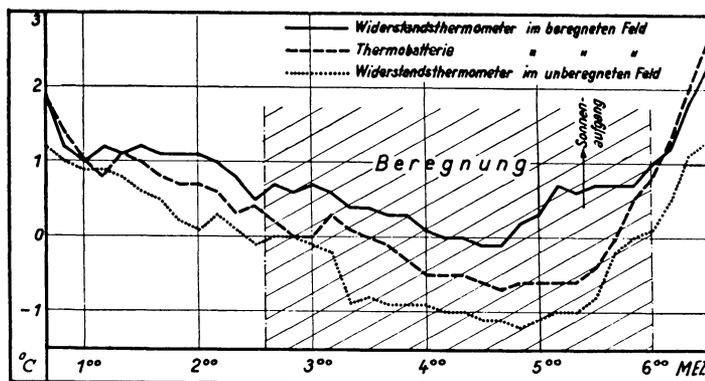


Abb. 143. Temperaturverlauf an elektrischen Blatt-Thermometern im Vergleich zu einer massearmen Thermobatterie bei Beregnung durch Regenkanone (50 cm Höhe).

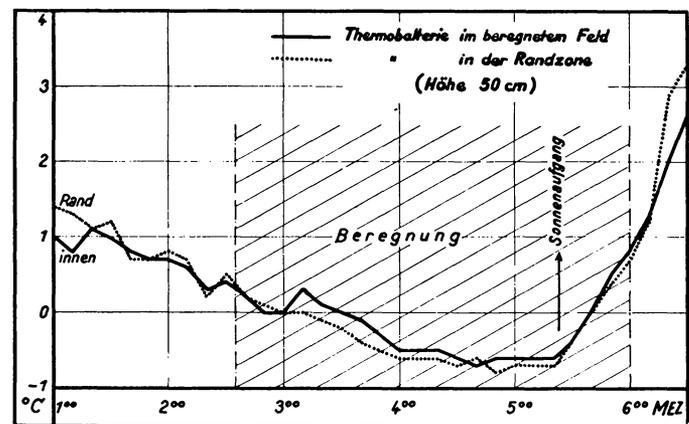


Abb. 144. Temperaturregistrierung der Thermobatterien im Innenfeld und am Rand der Regenzone der Regenkanone in 50 cm Höhe.

Bei einsetzender Beregnung wird aber das Ansteigen der Temperatur am elektrischen Widerstandsthermometer sofort spürbar, indem sich die Differenz gegen das unberegnete Thermometer vergrößert. Die nadelförmigen Elemente der Thermobatterie zeigen zunächst weiteres Sinken der Temperatur, bis auch sie bei beginnender Eisbildung kurz reagieren; dies zeigt die Spitze um 03 Uhr 10. Bald fällt jedoch die Temperatur an der Thermobatterie wieder ab, während die des Widerstandsthermometers den Gefrierpunkt kaum unterschreitet und meist wesentlich über ihm liegt. Die geringe Masse der Thermonadeln erlaubt eben nur geringen Eisansatz; somit kommen diese nur solange in den Genuß der latenten Erstarrungswärme, bis die Möglichkeit weiterer Eisbildung erschöpft ist. Die Nadeln passen sich daher der Lufttemperatur selbst im beregneten Feld weitgehend an, ihre Temperaturen liegen also wesentlich unter denen der blattähnlichen Widerstandsthermometer. Zur Erhärtung dieser Behauptung seien noch die Registrierungen der Thermobatterien im Inneren und am Rand des Feldes der Regenkanone zusammengestellt (Abb. 144), nach denen die Differenz zwischen den beiden Temperaturen nur  $-0,1$  bis  $+0,1$  Grad betrug (Tabelle 39).

Tabelle 39. Mittlere Temperaturdifferenzen zwischen Widerstandsthermometer und Thermobatterie (beide beregnet)

vor der Beregnung . . . . .	+ 0,2
während der Beregnung . . . . .	+ 0,5
nach der Beregnung . . . . .	+ 0,6

Wie weit die Registrierungen der Thermobatterien von denen der Widerstandsthermometer in der unbeeinflussten Zone abweichen, zeigt Abbildung 145, allerdings während der Beregnung nur unvollkommen, da die Thermobatterie in der Randzone nicht gänzlich frei von Einflüssen der Regentätigkeit ist. Immerhin ist deutlich zu sehen, daß das blattähnliche Widerstandsthermometer infolge der Abkühlung durch Ausstrahlung wesentlich kälter registriert.

Das beste Beobachtungsmaterial konnte in der Nacht vom 17./18. Mai 1934 gesammelt werden, welche relativ niedrige Temperaturen brachte. Auf der Rückseite eines kräftigen, über der Nordsee liegenden Tiefdruck-

wirbels war Kaltluft bis Westdeutschland vorgedrungen und hatte zum Aufbau eines Zwischenhochs Anlaß gegeben. Nach stärkerer Bewölkung am Tage mit unbedeutenden Schauerniederschlägen konnte in der Nacht nur gelegentlich hohe Bewölkung verzeichnet werden. Die Lufttemperatur in der Thermometerhütte unterschritt den Gefrierpunkt um 1 Grad, während die Blattertemperaturen bis  $-2,6$  Grad sanken.

Im unberechneten Feld liegen die Temperaturkurven der verschiedenen Meßgeräte in ähnlicher Weise übereinander wie bei dem vorigen Versuch (Abb. 146). Zunächst ist ein rasches Sinken der Temperaturen zu verzeichnen. Mit Annäherung an den Nullpunkt wird der Abfall dann stark verzögert. Als Ursache hierfür ist die Taubildung anzusprechen. Gegen 02 Uhr setzt erneut ein rascherer Temperaturfall ein. Kurz nach 04 Uhr wird plötzlich von allen Instrumenten ein deutlicher, wenn auch kurzer Temperaturanstieg angezeigt. Dieser erfolgt in dem Augenblick, in dem der Taubeschlag in Eis übergeht. Im späteren Verlauf treten Temperaturen auf, die auch ohne Störung durch die Eisbildung vorhanden gewesen wären. Der nach Sonnenaufgang um 05 Uhr 23 erfolgende rasche Anstieg tritt am deutlichsten an dem elektrischen Widerstandsthermometer in Erscheinung, das die Sonnenstrahlung am stärksten absorbiert.

Die Ablesungen an den 50 cm hohen Minimumthermometern in der unberechneten Zone und im Innern des Hydorfeldes ergeben selbst nach einsetzender Beregnung zunächst nur geringe Unterschiede (Abb. 147). Die Temperaturen des berechneten Thermometers liegen bis gegen 03 Uhr nur unbedeutend höher. Als um 02 Uhr 40 der Hydor für die Dauer einer Viertelstunde abgestellt wird, nehmen beide Thermometer wieder gleiche Temperaturen von weniger als  $-1$  Grad an. Zufällig setzt während dieser Pause plötzlich der Übergang des an den Blättern befindlichen unterkühlten Wassers in Eis ein, etwa eine Stunde früher als an den unberechneten, aber mit Tau beschlagenen Meßgeräten. Infolgedessen macht sich die freiwerdende Erstarrungswärme unmittelbar nach wieder einsetzender Beregnung um 03 Uhr 05 bemerkbar. Nach dieser Zeit bleibt die Temperatur mit kaum merklichen Schwankungen konstant auf  $-0,3$  Grad.

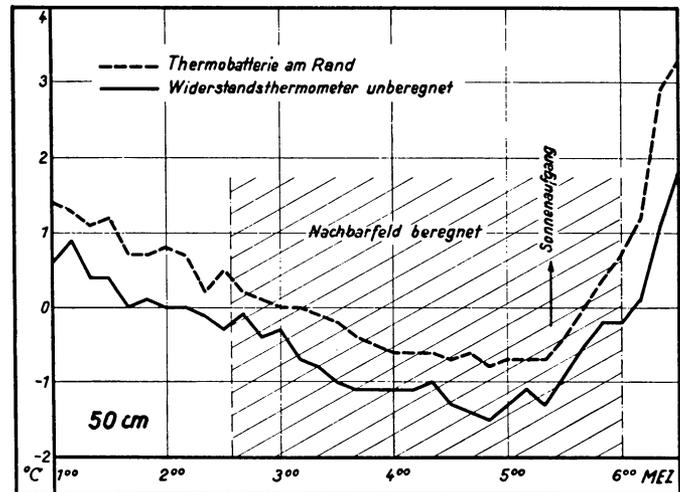


Abb. 145. Temperaturregistrierung, welche die stärkere Abkühlung der Blatt-Thermometer gegenüber der Thermobatterie zeigt.

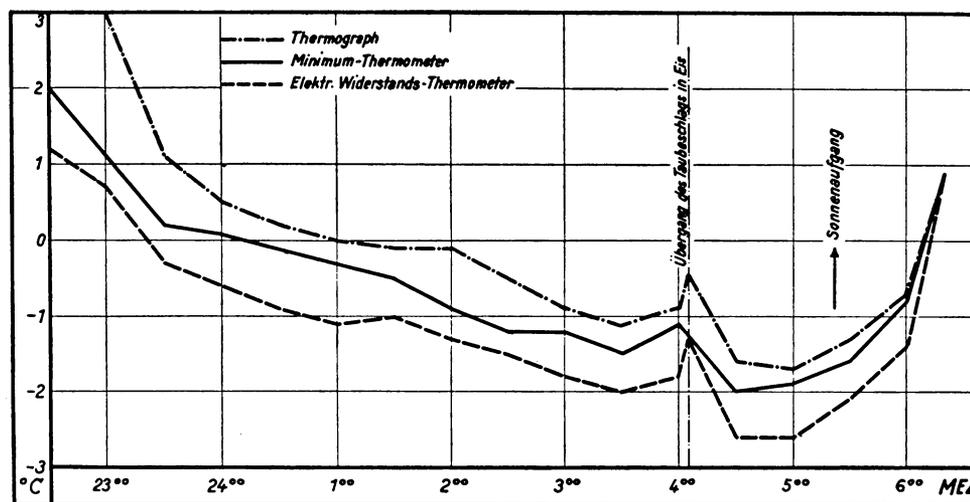


Abb. 146. Temperaturverlauf im unberechneten Feld in 50 cm Höhe (17./18. Mai 1934).

In ähnlicher Weise zeigen die in 50 cm Höhe stehenden Glasthermometer der Innen- und Randzone des Feldes der Regenkanone keine merkliche Beeinflussung bis 03 Uhr, obwohl die Regenkanone seit 23 Uhr 40 ununterbrochen in Betrieb ist und die Eisbildung an den Blättern kurz vor 03 Uhr begonnen hat (Abb. 148). Erst die Ablesung um 03 Uhr 30 zeigt einen deutlichen Temperatureffekt wie im Falle der Beregnung durch den Hydor.

Betrachten wir nun die Registrierung des elektrischen Blatthermometers in 20 cm Bodenabstand über dem berechneten Hydorfeld (Abb. 149), so kann hier der erste Einfluß der freiwerdenden Wärme bereits um 02 Uhr 35

wahrgenommen werden. Während der Unterbrechung der Beregnung zwischen 02 Uhr 40 und 03 Uhr 05 gehen die Temperaturen sofort wieder auf die Werte der Außenstation herunter, um nach Wiedereinsetzen der Beregnung

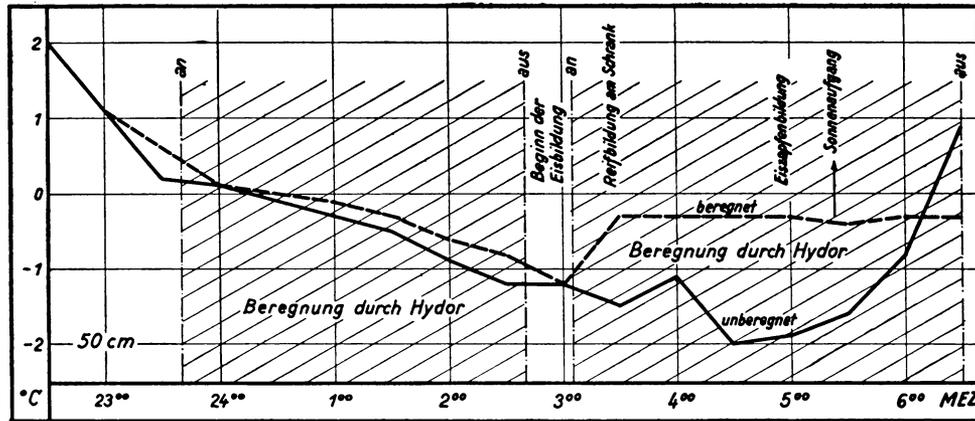


Abb. 147. Temperaturverlauf an den beregneten und nicht beregneten Alkoholthermometern in 50 cm Höhe (Hydor).

sich zwischen  $-0,5$  und  $-0,8$  Grad zu halten. Die obere Kurve gibt die Differenzen gegen die Temperaturen des gleichhohen Blatthermometers im unberegneten Feld wieder und zeigt Unterschiede bis zu 1,7 Grad. Kurz

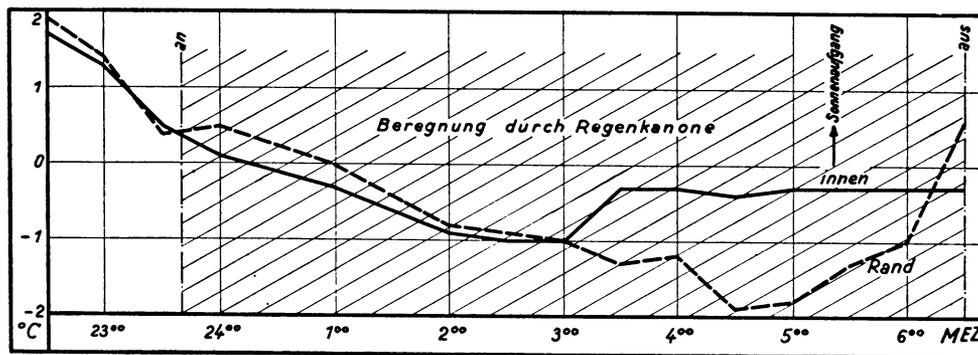


Abb. 148. Temperaturverlauf an den beregneten und nicht beregneten Alkoholthermometern in 50 cm Höhe (Regenkanone).

nach Sonnenaufgang werden die Differenzen kleiner und nehmen nach 06 Uhr sogar negative Werte an, das heißt das unberegnete Thermometer wird beträchtlich wärmer als das beregnete, da auf letzterem erhebliche Eisansätze vorhanden sind, die erst allmählich abschmelzen können, während der geringe Reifansatz des unberegneten

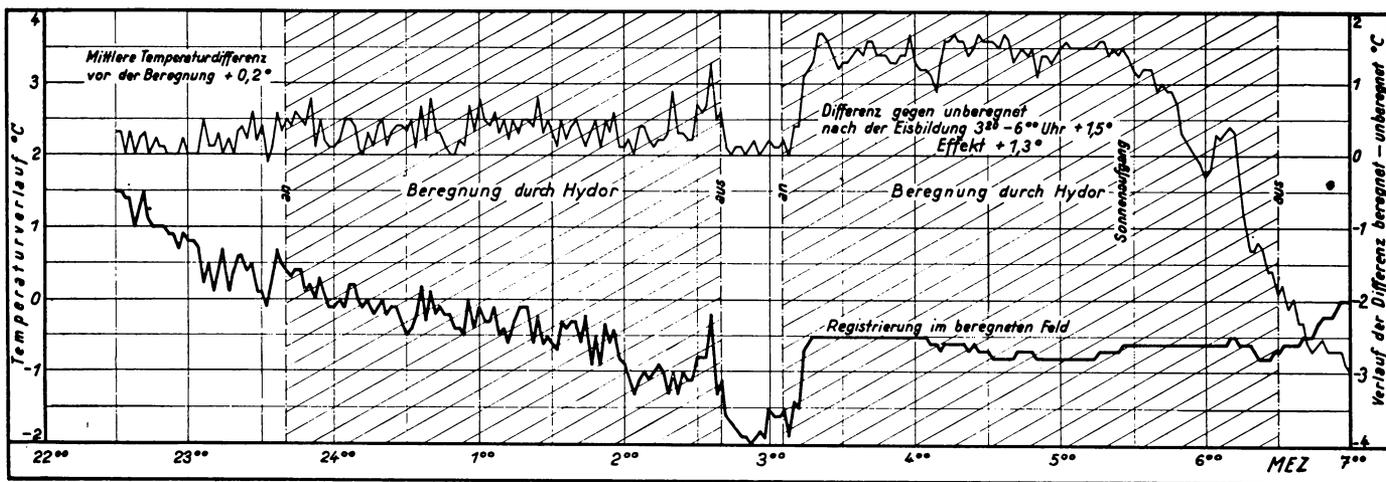


Abb. 149. Registrierter Temperaturverlauf an einem elektrischen Blatt-Thermometer in 20 cm Höhe (Hydor).

Thermometers schnell aufgetrocknet ist und das Blatthermometer die Absorption der Sonnenstrahlung durch schnellen Temperaturanstieg aufzeichnet.

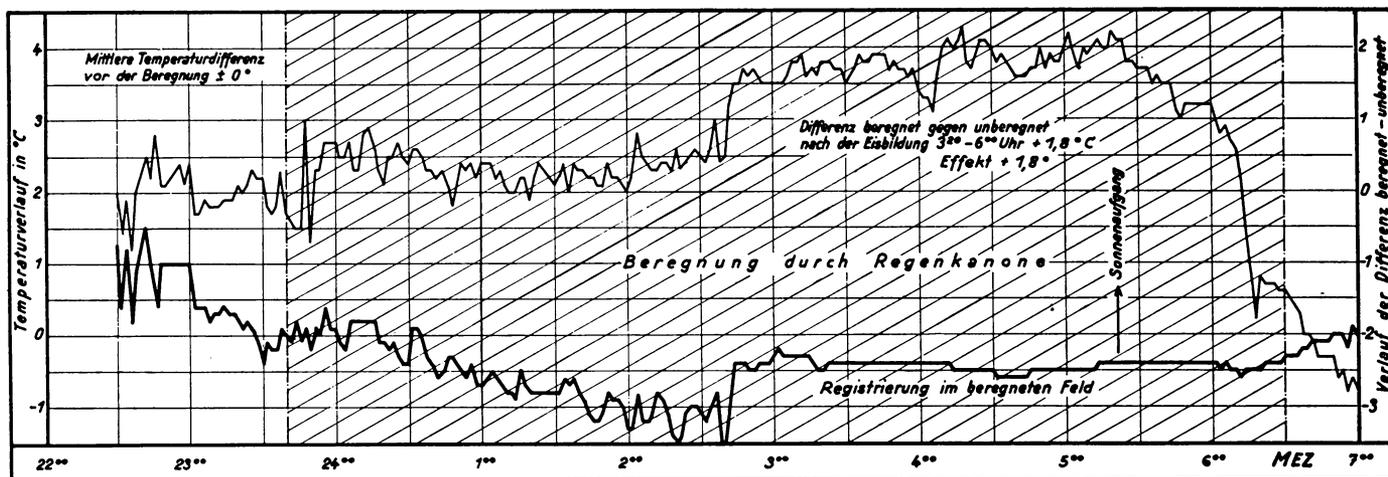


Abb. 150. Registrierter Temperaturverlauf an einem elektrischen Blatt-Thermometer in 50 cm Höhe (Regenkanone).

Die Registrierung des 50 cm hohen Blatthermometers im Felde der Regenkanone zeigt etwas deutlicher als die des Hydorfeldes eine ganz schwache Erwärmung unmittelbar nach einsetzender Beregnung (Abb. 150). Wie aus der Differenzkurve ersichtlich, setzt die Eisbildung auch hier um 02 Uhr 40 ein. Die Temperatur des beregneten Thermometers bleibt aber dann konstant auf  $-1/2$  Grad bis zum Ende der Beregnung, da hier keine Unterbrechung vorgenommen wird. Die als „Effekt“ zu bezeichnende Differenz zwischen dem Außenthermometer und dem Innenthermometer vom Augenblick der Eisbildung bis Sonnenaufgang beträgt im Mittel 1,8 Grad.

Betrachten wir nun das Verhalten der Versuchspflanzen, so muß zunächst erwähnt werden, daß weder die vorgekeimten und Anfang April ausgepflanzten Kartoffeln, noch die am Tage vor dem ersten Versuch ausgesetzten Tomaten und Bohnen vor den Versuchen eine Frostnacht zu überstehen hatten. Bei einer kalten Nacht im April waren die Kartoffeln noch nicht aufgegangen. Eine künstliche Wasserzufuhr war vor den Versuchen nicht vorgenommen worden. Der Boden hatte Volldüngung ohne Kali erhalten. Schädlinge waren nicht aufgetreten.

In der ersten Versuchsnacht wurde durch viermalige Wägung mit einer Torsionswaage festzustellen versucht, ob die Blätter während der Beregnung wesentliche Mengen von Wasser aufnehmen. Die Wägungen mehrerer Tomaten- und Bohnenblätter, von denen eine vor, zwei während und eine nach der Beregnung ausgeführt wurden, ergaben keine Gewichtszunahme, bezogen auf gleiche Oberflächen. Die oberirdischen Teile der Pflanzen waren also noch wassergesättigt, da eine Wasseraufnahme durch diese nur bei Bestehen eines Sättigungsdefizits stattfindet.

Während der zweiten Nacht konnten besonders interessante Beobachtungen an den Pflanzenteilen hinsichtlich der Vereisung gemacht werden. Als der Hydor, nachdem der Nullpunkt bereits wesentlich unterschritten war, um 02 Uhr 40 auf eine halbe Stunde abgestellt wurde, bildete sich eine glasige Eishaut auf den Blättern. Nach erneut einsetzender Beregnung bei einer Wassertemperatur von 12 Grad ging die Eisbildung zunächst wieder zurück, um später plötzlich von neuem in Erscheinung zu treten. Blätter und Stengel umgaben sich mit einer dicken Eiskruste, die stellenweise eine Stärke von  $1/2$ —1 cm annahm und infolge der schichtenweisen Überlagerung eine gewisse Trübung erfuhr (Abb. 209, Tafel 9). Bei solcher Belastung neigten sich die Pflanzen bis zum Boden. Wenn man ein Blatt abtrennte und die Eiskruste in der Hand durch Klopfen zum Zerspringen und Ablösen brachte, so konnte man das vollkommen unversehrte, elastische Blatt herausnehmen. Das Blattinnere war also nicht gefroren. Dies war ja auch nach den Angaben der künstlichen Blatthermometer, deren Temperaturen sich um  $-1/2$  Grad bewegten, zu erwarten. Denn der Zellsaft der Tomaten verliert bei dieser Temperatur noch kein Gefrierwasser. Gegen 05 Uhr kam es im beregneten Feld zu einer starken Eiszapfenbildung an den Leitungsdrähten (Abb. 206, Tafel 8).

Im unberegneten Feld zeigte sich an den mit feinem Tau beschlagenen Blättern kurz nach 04 Uhr schwache Eisbildung, die vom Rand aus nach der Mitte der Blätter vorzudringen schien.

An den Tomaten und Bohnen war in den beregneten Zonen kein Schaden wahrzunehmen. In den unberegneten Zonen waren sie dagegen sämtlich getötet (Abb. 212, Tafel 9).

Die Versuche, durch teilweise Beschattung der Pflanzen bei Sonnenaufgang in den verschiedenen Zonen Unterschiede hervorzurufen, verliefen negativ. Es handelte sich um den Vergleich beschatteter und unbeschatteter Pflanzen in den unberegneten Zonen, in einer bis 06 Uhr 30 beregneten Zone und auf einem Teil des Feldes, das bis 08 Uhr 30 beregnet wurde.

Anscheinend war auch in dieser kältesten Versuchsnacht ein Minimum erreicht worden, das die untersuchten Kartoffeln in dem vorhandenen Wachstumsstadium gerade noch ertragen können. Es lag zwischen  $-2\frac{1}{2}$  und  $-3$  Grad.

Immerhin konnten, wie Abbildung 211, Tafel 9 zeigt, vereinzelt an den Blättern der Kartoffelpflanzen Schäden festgestellt werden. Diese traten ausschließlich in der unberegneten Zone in Erscheinung. Besonders gut ließen sie sich 2—3 Tage nach der Versuchsnacht beobachten. Ganze Zweige waren vollständig vertrocknet, besonders dort, wo die Blätter über dem frisch bearbeiteten Boden einer Furche lagen.

Auffallend war die nach dem Versuch zu beobachtende Verfärbung der Kartoffelblätter. Schon am Tage nach der Hauptversuchsnacht hob sich die beregnete Fläche durch eine hellere gelbgrüne Farbe von der unberegneten Zone mit dunkelgrünem Farbton ab. Der Helligkeitsunterschied verstärkte sich noch bis zum dritten Tag und hielt sich mit geringer Änderung bis zur Ernte. Die hellgrünen Pflanzen blieben auch im Wuchs etwas zurück. Diese Wachstumsstörung läßt sich dadurch erklären, daß die starke Durchnässung eine tagelang andauernde Abkühlung des Bodens zur Folge hatte (Abb. 208, Tafel 8).

Die Wägung der Ernte ergab indessen, daß auf dem beregneten Feld eine etwas größere Erntemenge (4 dz/ha) auf der Flächeneinheit erzielt wurde als auf dem unberegneten Feld. Der Ertrag im Regenfeld belief sich auf 188, in der unberegneten Zone auf 184 kg je 100 m<sup>2</sup>. Qualitätsunterschiede ließen sich nicht feststellen.

### 3. Die Versuche im Frühjahr 1935.<sup>315a)</sup>

Bei einem Versuch in der Nacht vom 2./3. Mai 1935 wurde ein Teil der Alkohol-Thermometer und Versuchspflanzen früh, ein anderer spät beregnet. Die frühe Beregnung begann um Mitternacht, als die Temperaturen an den ungeschützten Glasthermometern bei  $+0,5$  Grad angelangt waren, also noch über dem Gefrierpunkt lagen. Die späte Beregnung setzte um 01 Uhr 15 ein, zu welcher Zeit die Instrumentaltemperaturen bis  $-1$  Grad gesunken waren.

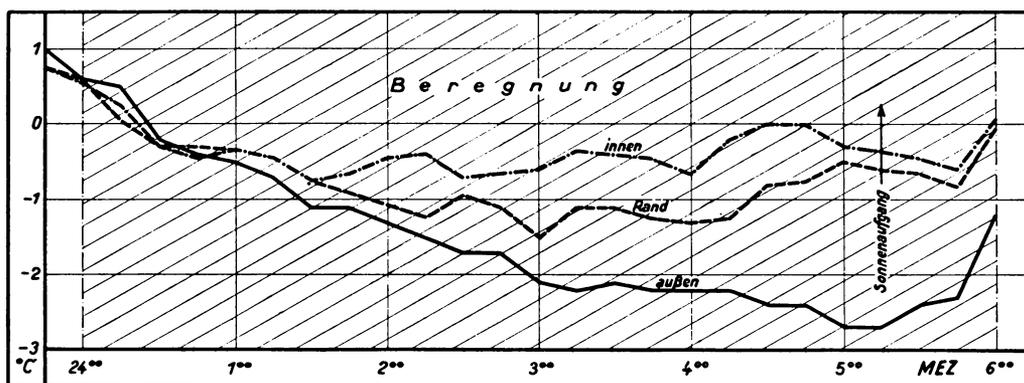


Abb. 151. Temperaturverlauf an den Alkoholthermometern im unberegneten, beregneten und Randgebiet des Hydors in 50 cm Höhe (2./3. Mai 1935); Frühberegnung vor Frosteintritt.

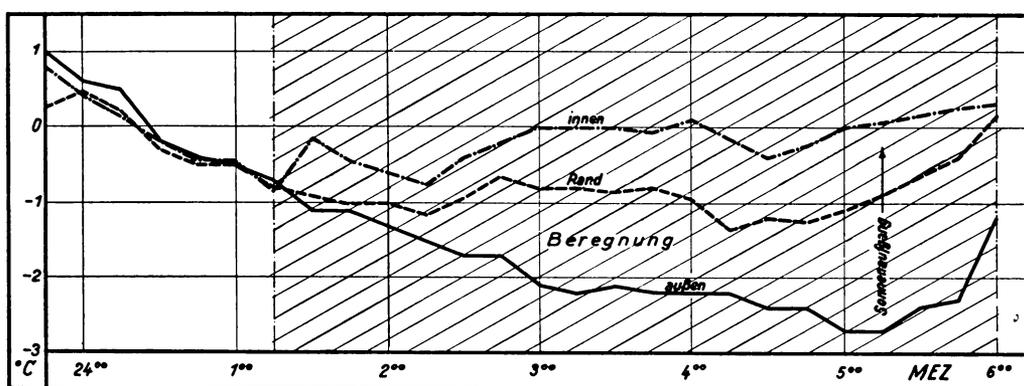


Abb. 152. Temperaturverlauf an den Alkoholthermometern im unberegneten, beregneten und Randgebiet des Hydors in 50 cm Höhe (2./3. Mai 1935); Spätberegnung nach Frosteintritt.

Die Temperaturunterschiede ändern sich nach Beginn der Frühberegung bis 01 Uhr 30 nur unwesentlich (Abb. 151). Sowohl im inneren Bereich des Regenfeldes als auch in der Randzone sinken die Werte gemäß dem Verlauf der Außenzone. Erst nach 01 Uhr 30, zu welcher Zeit auch die erste Eiskriste beobachtet wird, laufen die Kurven deutlich auseinander. Während die Außenwerte weiter stetig abnehmen, steigt die Kurve für das unberegnete Feld an und bewegt sich im allgemeinen bis zur Beendigung der Beregnung zwischen  $-1/2$  und 0 Grad. Auch die Werte der Randzone verraten einen Effekt, bleiben jedoch nicht unerheblich hinter den Werten der Zone des Starkregens zurück.

Mit dem Beginn der Spätberegung, der zeitlich mit dem Auftreten der ersten Eiskruste zusammenfällt, tritt dagegen sofort eine spürbare Erwärmung ein (Abb. 152).

Wie aus der Kurve für das unberegnete Feld hervorgeht, lag die tiefste Ablesung um 05 Uhr bei  $-2,7$  Grad. Das Thermometer zeigte aber am nächsten Morgen ein Minimum von  $-3,1$  Grad an. Hieraus ergibt sich, daß selbst bei viertelstündlicher Ablesung sich immer noch vorübergehende Tiefstände im Temperaturverlauf der Beobachtung entziehen. Eine Registrierung, welche in dieser Nacht aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden konnte, ist daher stets angebracht.

Die bei diesem Versuch ausgestellten Tomatenpflanzen hatten, soweit sie in der Regenzone standen, nicht den geringsten Schaden erlitten, obwohl sie wiederum mit stellenweise fingerdicken Eiskrusten überzogen waren (Abb. 213 und 214, Tafel 9). Die Pflanzen in der Randzone, die durch Windwirkung zeitweise gar keinen Regen abbekamen, hatten stark gelitten. Alle in der unberegneten Zone stehenden Pflanzen waren restlos erfroren.

Um 01 Uhr 30 wurden bei einem Thermometerstand von  $-1,1$  Grad einige Pflanzen aus dem beregneten Feld in das Gewächshaus gebracht, welche sich am nächsten Tag als völlig gesund erwiesen.

Aus den bisherigen Versuchen hatte sich ergeben, daß sehr bald nach dem Abstellen der Beregnung die Temperaturen auf den Stand der Außenthermometer herabsinken. Es hat sich aber auch erwiesen, daß die Menge des zur Beregnung verwendeten Wassers bei den beobachteten Minimaltemperaturen größer war als notwendig.

Der Gedanke lag daher nahe, die Beregnung nicht ständig, sondern intermittierend auszuführen. Eine geringere Dosierung der Wassermengen war jedoch mit den vorhandenen Regengeräten nicht möglich, weil diese bei schwächerem Wasserdruck entweder gar nicht mehr arbeiteten oder aber ein wesentlich kleineres Feld beregneten.

#### 4. Die Versuche im Frühjahr 1936.<sup>315a)</sup>

So wurde also während der Frostnacht vom 12./13. März 1936 die Beregnung mit periodischer Unterbrechung ausprobiert. Die Abbildung 153 gibt den Verlauf der Temperaturen im unberegneten Feld und in der Regenzone wieder. Außerdem enthält sie noch die Angaben eines geschützten Thermographen in der Trockenzone und die Differenz der Temperaturen innen gegen außen.

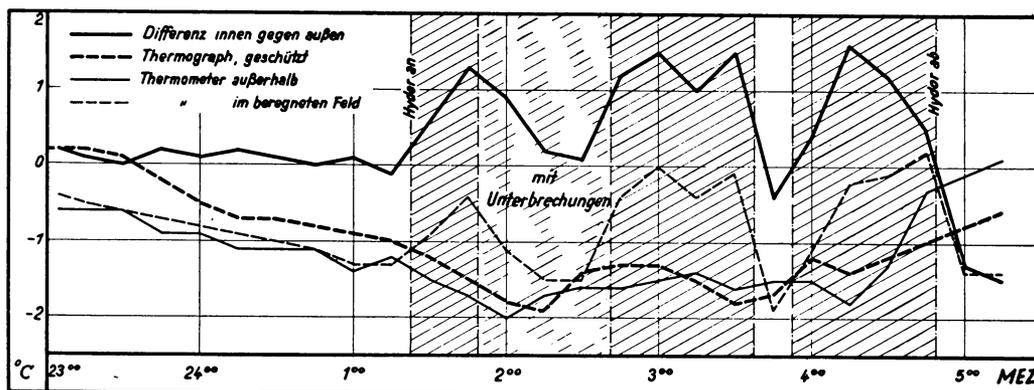


Abb. 153. Temperaturverlauf bei Beregnung mit Hydor mit Unterbrechungen (12./13. März 1936).

Ab 23 Uhr nehmen die beiden Temperaturkurven der Prüfthermometer fast den gleichen Verlauf bis 01 Uhr 25, um welche Zeit die Beregnung beginnt. Während das Außenthermometer gleichmäßig langsam weiter sinkt, steigt das Innenthermometer wie bei den vorhergehenden Versuchen sehr bald auf  $-0,4$  Grad. Um 01 Uhr 50 wurde mit der intermittierenden Beregnung begonnen. Diese wurde so ausgeführt, daß der Regner eine Minute lang arbeitete, eine Minute ruhte und dann wieder eine Minute in Tätigkeit trat. Die Unterbrechungen wurden durch einen Mann am Hydor ausgeführt. An dem Kurvenverlauf erkennt man, daß die Temperaturen im beregneten Feld während der Beregnung mit Unterbrechungen sich allmählich an die Werte des Außenthermometers an-

gleichen. Erst nach erneut einsetzender Dauerberegnung um 02 Uhr 40 steigen die Temperaturen in der Regenzone wieder bis in Gefrierpunktnähe an.

Der Versuch lehrt also, daß selbst kurze Unterbrechungen in der Beregnung den Effekt zum Verschwinden bringen.\*)

Eine völlige Unterbrechung der Beregnung zwischen 3 Uhr 40 und 03 Uhr 50 hatte einen rapiden Temperaturrückgang zur Folge. Das Innenthermometer wies während dieser kurzen Zeit sogar um einige Zehntel-Grad tiefere Temperaturen auf als das äußere Thermometer.\*\*)

Nach einer weiteren Dauerberegnung, bei der die Innentemperatur den Nullpunkt überschritt, wurde die Beregnung um 04 Uhr 50 endgültig abgestellt. Infolge starker Bewölkung war die Ausstrahlung inzwischen derart zurückgegangen, daß die Temperaturen wieder anstiegen.

Unmittelbar nach dem Ende der Beregnung fielen die Innentemperaturen so steil ab, daß sie zeitweise  $1\frac{1}{2}$  Grad unter den Außentemperaturen lagen. Dies erklärt sich aus dem starken Wärmeverbrauch beim Abschmelzen.

Zur Beurteilung der Verteilung der Wassermengen auf die Fläche des beregneten Feldes waren drei Regensmesser aufgestellt worden, die vom Hydorrohr  $\frac{1}{2}$ ,  $1\frac{1}{2}$  und 6 m entfernt waren. Nachstehende Tabelle 40 gibt für die drei Entfernungen die Gesamtwassermenge in Liter je Quadratmeter und die Stundenmenge im gleichen Maß wieder, wobei der Ausfall während der intermittierenden Beregnung und der kurzen Unterbrechung berücksichtigt ist.

Tabelle 40. Verteilung der Wassermengen auf dem beregneten Feld

Entfernung vom Rohr	Gesamtregen	In einer Stunde
0,5 m	22,4 l/m <sup>2</sup>	8,3 l/m <sup>2</sup>
1,5	15,4	5,7
6,0	12,8	4,7

Um eine Vorstellung von dem außerordentlich starken Eisansatz an den Pflanzen vermitteln zu können, wurde eine kleine Tomatenpflanze unmittelbar nach der Beregnung gewogen. Die Pflanze, die ein Eigengewicht von 15 g hatte, wog mit dem Eisüberzug 110 g, war also mit einem Eismantel von mehr als dem Sechsfachen ihres Eigengewichts umgeben.

Der Befund an den Pflanzen im unberegneten und beregneten Feld sowie in der Randzone ist in Tabelle 41 zusammengestellt. Diese Übersicht gibt außerdem Auskunft über die Beobachtungen an den Pflanzen, die zu verschiedenen Zeiten und bei verschiedener Temperatur in das Gewächshaus gebracht worden sind.

Der Befund wurde am Morgen nach der Frostnacht aufgenommen. Von den im Freien gebliebenen Pflanzen waren am Morgen diejenigen, die unter dem Einfluß der Beregnung standen, völlig unversehrt, während die der Außenzonen fast restlos erfroren waren.

Tabelle 41. Befund der Pflanzen im unberegneten und beregneten Feld

Zeitpunkt der Hereinnahme	Außentemperatur Grad C	Dauer der Aussetzung	Unberegnete Zone	Randzone	Beregnete Zone
02 Uhr	- 2,0	150 min	unbeschädigt	leicht beschädigt	unbeschädigt
03 Uhr	- 1,5	210 min	teilweise beschädigt	stark beschädigt	unbeschädigt
04 Uhr	- 1,5	270 min	teilweise beschädigt	stark beschädigt	unbeschädigt
05 Uhr	- 0,1	330 min	stark beschädigt	stark beschädigt	unbeschädigt

Während der Frostnacht vom 23./24. April 1936 wurden sowohl in der Hauptregenzone als auch in der Randzone und im unberegneten Feld jeweils mehrere Thermometer aufgestellt, um durch nachherige Mittelbildung von zufälligen Schwankungen unabhängig zu sein.

\*) Es wird daher bei der Konstruktion der Beregnungsapparate darauf Rücksicht zu nehmen sein, daß die Menge des ausgeworfenen Wassers in gewissen Grenzen regulierbar ist, wenn die Apparate zur Frostschadenverhütung eingesetzt werden sollen. Die vorigen Versuche haben überdies gezeigt, daß zu große Wassermengen auch bei dem späteren Wachstum der Pflanzen von Nachteil sein können.

\*\*) Die Tatsache eines steilen Temperaturfalles nach erfolgter Eisbildung auf nassen Pflanzen stellte auch F. D. Young fest. Er fand ferner eine Verzögerung des Temperaturabfalls, wenn in Frostnächten Regen fiel; diese Verzögerung hielt solange an, bis der größte Teil des Wassers am Boden gefroren war. Dann fiel die Temperatur erneut sehr rasch.

In Abbildung 154 sind die Temperaturgänge in den drei Zonen gemäß der durchgeführten Mittelbildung zu verfolgen. Auch hier sieht man wieder den mit der Beregnung einsetzenden Temperaturanstieg im beregneten Feld und anschließend eine annähernde Temperaturkonstanz um den Nullpunkt. Auch in der Randzone ist im großen und ganzen eine geringe Erwärmung zu erkennen, die jedoch nur dann merklich in Erscheinung tritt, wenn in diesem Gebiet infolge günstiger Windstöße größere Wassermengen fallen. Nach dem Abstellen der Beregnung sinkt die Temperatur innen unter die der Außenzone herab.

Zum Vergleich wurden in Abbildung 155 die Angaben eines Minimumthermometers ohne Schirm, eines solchen mit Budigschirm und eines elektrischen Blatthermometers, die sich alle drei nebeneinander in 50 cm Höhe über dem Boden des zentralen Regenfeldes befanden, zusammengestellt. Zunächst sieht man wieder, obwohl die Ausstrahlungsverhältnisse nicht die günstigsten waren, daß das elektrische Blatthermometer weitaus am kältesten ist; seine Temperatur liegt 1 bis 1½ Grad unter der des freistehenden Minimumthermometers. Die Angaben des Minimumthermometers mit Schirm liegen etwa ½ Grad höher als die des Thermometers ohne Schirm. Wenn die Beregnung einsetzt, nimmt das ungeschützte Thermometer sofort höhere Temperaturen an, die sich um den Gefrierpunkt herum bewegen. Auch das elektrische Blatthermometer zeigt dann Temperaturen, die nur einige wenige Zehntel Grad unter dem Nullpunkt liegen. Das Thermometer mit Schirm reagiert dagegen kaum. Es läuft mit seinen Angaben etwa parallel dem Außenthermometer, das auch ab 00 Uhr 45 einen Temperaturanstieg zeigt (Abb. 154). Aus diesem Vergleich zwischen freistrahendem und abgeschirmtem Thermometer geht also hervor, daß tatsächlich die Beregnung auf die Lufttemperatur ohne merklichen Einfluß ist und daß Temperaturanstiege nur an den Thermometern zu beobachten sind, an denen sich Eisansatz bildet. Die temperatursteigernde Wirkung des Gefriervorganges kommt bei den strahlungsgeschützten Minimumthermometern also nur dem Schirm zugute, wird aber nicht auf das dicht darunter gelegene

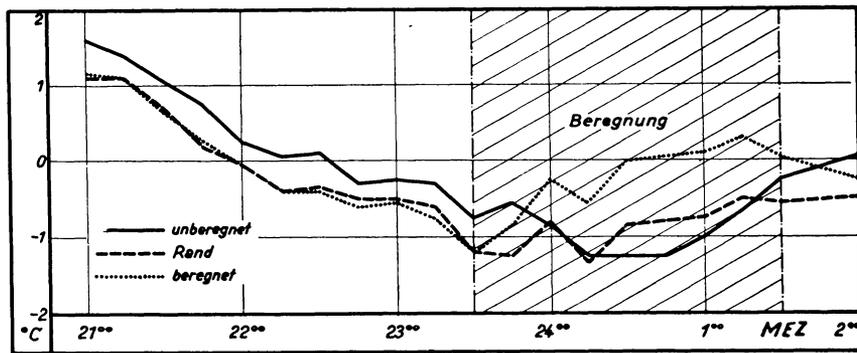


Abb. 154. Mittlerer Temperaturverlauf an den Alkoholthermometern bei dem Regenversuch im April 1936 (Hydor 50 cm Höhe).

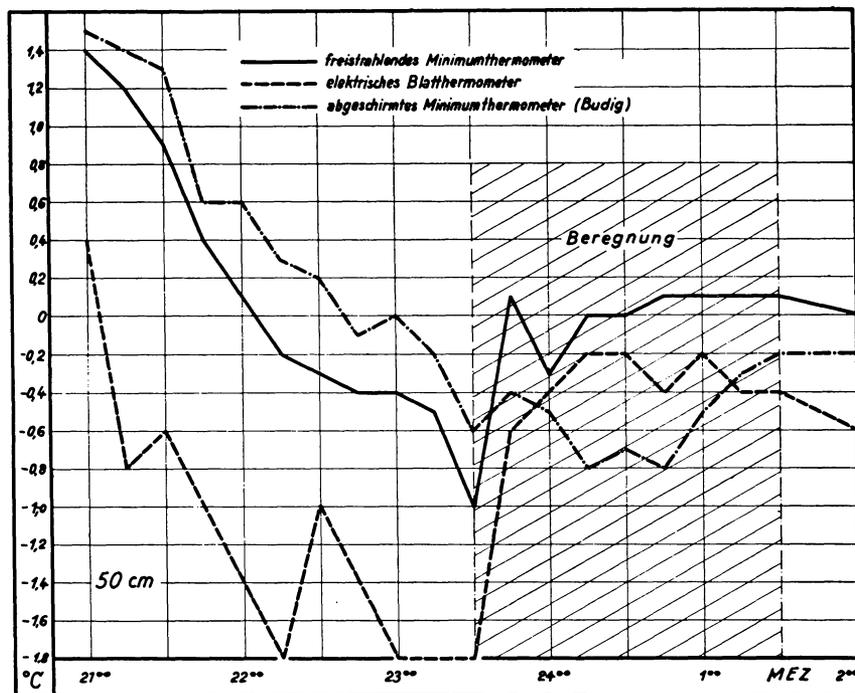


Abb. 155. Temperaturverlauf an abgeschirmtem Alkoholthermometer sowie an freistehendem Alkohol- und elektrischem Blatt-Thermometer (23./24. April 1936, Hydor).



Abb. 156. Temperaturverlauf an vier Alkoholthermometern in verschiedener Höhe (Hydor).

Thermometer übertragen. Diese Beobachtung deckt sich mit den Erfahrungen, die wir mit Hilfe der Thermobatterien gewonnen haben.

In der berechneten Zone war bei diesem Versuch überdies eine 2 m hohe Meßlatte aufgestellt, an der vier Minimumthermometer in 10, 50, 100 und 185 cm Höhe befestigt wurden (Abb. 207, Tafel 8). Die Angaben dieser vier Thermometer sind in Abbildung 156 aufgetragen. Vor der Beregnung ist die normale Temperaturschichtung in der bodennahen nächtlichen Kaltluftschicht festzustellen, wenn sich auch infolge einer schwachen Luftströmung keine absolut großen Unterschiede einstellten. Das Thermometer in 10 cm Höhe zeigt die tiefsten Werte. Nach Einsetzen der Beregnung schnellen die Angaben des tiefsten Thermometers am raschesten in die Höhe und halten sich auch während der Dauer der Beregnung am höchsten (etwas über 0 Grad).

Nur wenig darunter liegt die Temperaturkurve des 50 cm hohen Thermometers. Die Werte des 100 cm hohen Thermometers gelangen erst nach einstündiger Beregnung in die Nähe des Nullpunktes. An dem obersten Thermometer macht sich der Regeneinfluß erst ab etwa 00 Uhr 30 bemerkbar. Offensichtlich waren die beiden bodennahen Thermometer im Augenblick des Einsetzens der Beregnung bereits so kalt, daß sofort Eisansatz eintrat. Bei den beiden anderen wurde dieser Zustand erst später erreicht.

Die Außentemperatur war übrigens mittlerweile durch aufkommende Bewölkung wieder angestiegen, so daß die Werte nach 01 Uhr im Sinne der Versuchsfrage ungünstigeren Umweltbedingungen unterliegen.

### C. Anderweitige Beregnungsversuche.

#### 1. Die Versuche in Kleinbeeren.<sup>315a)</sup>

J. Grunow und F. Albrecht vom Preußischen Meteorologischen Institut haben 1932 gleichfalls mit Unterstützung der Studiengesellschaft für Feldberegnung Versuche über die Wirkung der Beregnung als Frostschutz angestellt. Die Versuche fanden in Kleinbeeren (Brandenburg) statt. Ihre Ergebnisse sind leider nicht veröffentlicht. Grunow hat jedoch im Februar 1933 vor dem Ausschuß für Klima- und Wetterkunde der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft darüber gesprochen und die Beregnung als Frostschutz als eine aussichtsreiche Methode hingestellt. Nach brieflicher Mitteilung von G. Schonopp verlief außerdem ein von ihnen eingeleiteter Versuch in Schlagenthin positiv.

Beim Versuch Kleinbeeren ist zunächst als wesentlich festzustellen, daß er leider nicht in einer Frostnacht durchgeführt wurde. Es konnte daher der wichtigste Effekt der Beregnung, nämlich die Erwärmung der Blätter durch die latente Wärme des gefrierenden Wassers nicht beobachtet werden. Dagegen wurden über die Nebenwirkungen einige wichtige Beobachtungen gemacht.

a) Die Messungen des Strahlungsumsatzes ergaben keine nennenswerte Erhöhung der atmosphärischen Gegenstrahlung. Es wurde damit die theoretische Überlegung von Foß u. a. praktisch bestätigt, daß die Zunahme des Wasserdampfgehalts der untersten Luftschichten im Strahlungshaushalt keine wesentliche Rolle gegenüber dem Gesamtwasserdampfgehalt der Atmosphäre spielt. Zudem war im unberegneten Feld bereits eine relative Feuchte zwischen 90 und 94 % vorhanden, so daß die Steigerung auf 100 % in der Regenzone nicht in die Waagschale fiel.

b) Bei den Versuchen erhöhte sich die Wärmeleitfähigkeit des ziemlich trockenen Bodens um 30 %, was die Wärmeabgabe des Bodeninnern an die abstrahlende Oberfläche begünstigte. Da in Strahlungs Nächten keine nennenswerte Verdunstung, vielmehr vorwiegend ein Wärmegewinn durch Kondensation eintritt, gibt die Durchfeuchtung des Bodens keinen Anlaß zur Abkühlung durch Verdunstungskälte. Anders war es, wenn tagsüber beregnet wurde. Um 21 Uhr war das tagsüber beregnete Gebiet in Bodennähe um fast 2 Grad, in 50 cm Höhe zwischen  $\frac{1}{2}$  bis 1 Grad kälter, und selbst um 03 Uhr, vor Beginn der Beregnung, war am Boden und in 50 cm Höhe das tagsüber beregnete Feld noch um  $\frac{1}{2}$  Grad kälter als das unberegnete. Grunow folgerte aus einem Versuchsergebnis hinsichtlich des Anstiegs der Temperatur während des Nachtversuchs über vorher beregnetem Feld gegen unberegnet, daß trockener Boden, dessen Oberflächentemperatur nicht durch Verdunstung erniedrigt wurde, Voraussetzung für eine positive Beeinflussung der Oberflächentemperatur durch Beregnung ist.

c) Die Temperatur des Beregnungswassers betrug 7,6 Grad. Die Temperatur der Blätter ist leider von Grunow nicht mitgeteilt. Er stellte jedoch fest, daß die Temperatur der Blattoberflächen durch die Beregnung um 0,7 Grad gegenüber den unberegneten anstieg. Dieser Betrag liegt in der Größenordnung unserer Meßergebnisse.

d) Der Gesamteffekt der Beregnung wird bei Temperaturen in Bodennähe von 2—3 Grad über dem Gefrierpunkt auf 1,0 bis 1,8 Grad angegeben.

#### 2. Die Beregnung als Schutz gegen Winterfröste bei immergrünen Pflanzen.

Illing<sup>171)</sup> hatte in der Praxis, besonders während des strengen Winters 1928—29, in Mitteldeutschland die Erfahrung gemacht, daß Winterfrostschäden an immergrünen Pflanzen durch Überregnen mit Wasser verhindert

werden können. Er stellte die Behauptung auf, daß es sich, im Gegensatz zu den Frostschäden im Frühjahr und Herbst an sommergrünen Pflanzen, bei dem Kältetod der immergrünen Pflanzen im Winter um einen Vertrocknungstod handle. Wenn der Boden und die Wasserleitungsbahnen in der Pflanze gefroren sind und starke Besonnung und lebhafte Belüftung mit relativ trockener Luft herrschen, dann treten fortgesetzt Wasserverluste der oberirdischen Pflanzenteile ein, die sich nicht durch nachrückendes Wasser aus dem Boden ersetzen lassen. Seine Vorschläge der Wasserzufuhr zu den Wurzeln und, da dies bei gefrorenem Boden und gefrorenem Wasserleitungssystem in der Pflanze selbst nicht wirksam wird, der Wasserzufuhr zu den oberirdischen Pflanzenteilen, sind nach O. Kessler<sup>187)</sup> die einzige Maßnahme, die als wirksam empfohlen werden kann.

Bei seinen Untersuchungen über die Ursachen der Winterfrostschäden an immergrünen Pflanzen hat Walter<sup>392, 393)</sup> Pflanzen der Rheinebene während der Kälteperiode von Januar bis März 1929 untersucht. Die Pflanzen waren Kältegraden bis zu 30 Grad unter Null ausgesetzt und hatten besonders im Februar und März sonnige Tage zu überstehen, bei denen der relative Feuchtigkeitsgehalt der Luft nur noch wenige Prozent betrug. Außerdem fehlte in den meisten Fällen eine schützende Schneedecke. Er kam zu dem Resultat, daß die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen gegen den Kältetod im Winter abhängt:

- a) von der Größe des Spielraums, der der Pflanze zwischen ihrem normalen und dem höchst zulässigen maximalen osmotischen Wert zur Verfügung steht.
- b) von der Geschwindigkeit, mit der die Wasserdefizite an den Blättern eintreten.

Da eine Wasseraufnahme während der Kälteperiode in nennenswertem Maße nicht möglich ist, so hängen die Wasserdefizite ausschließlich von der Transpirationsgröße der Pflanzen im winterlichen Zustand ab.

Demnach muß eine äußere Vereisung der oberirdischen Teile der immergrünen Pflanzen eine weitere Verdunstung von Wasser aus dem Zellsaft verhindern. Es kann infolgedessen nicht der maximal zulässige osmotische Druck unterschritten werden, so daß in dem Beregnen der immergrünen Pflanzen gegen Winterfrostschäden ein praktisch und wissenschaftlich begründeter Frostschutz zu sehen ist.

### 3. Anforderungen an Beregnungsgeräte, die zur Frostschutzberegnung eingesetzt werden.

K. L. Lanninger<sup>215)</sup> gibt einige Anregungen zur Frostschadenverhütung durch Beregnungsanlagen. Dabei geht er auf folgende Fragen ein:

- a) Sollen zur Frostbekämpfung fliegende, halbstationäre oder ganzstationäre Anlagen verwendet werden?
- b) Ist eine kontinuierliche oder eine intermittierende Beregnung anzuwenden?
- c) Welche Wassermengen reichen zur Bekämpfung eines bestimmten Frostgrades noch aus, und wie lange dürfen die Pausen bei intermittierender Beregnung sein?

Werden fliegende Anlagen zur Frostabwehr eingesetzt, so lassen sich im allgemeinen nur verhältnismäßig kleine Flächen schützen. In Kleinbetrieben aber, in denen mehrere Kulturen geringer Ausdehnung mit zeitlicher Aufeinanderfolge angepflanzt werden, können solche fliegende Anlagen mit genügender Rentabilität eingesetzt werden.

Eine kontinuierliche Beregnung kommt nur dann in Frage, wenn durch besonders feine Düsen eine gute Verteilung des Wassers erreicht werden kann. Die Gefahr des Zufrierens der Düsenöffnungen, die Lanninger durch einen Vorwärmer und entsprechende Isolation des Rohrnetzes vermeiden will, ist nach unseren Erfahrungen nur in den seltensten Fällen gegeben. (Wir haben ein Zufrieren nie beobachtet. d. V.)

Bei der intermittierenden Beregnung handelt es sich im wesentlichen darum, festzustellen, wie groß die Pausen zwischen den einzelnen Wasserspenden sein dürfen, ohne daß die Pflanzen in der Zwischenzeit erfrieren. Nach unseren Erfahrungen genügt bei stärkerem Frost schon eine Zeit von wenigen Minuten, um empfindlichere Pflanzen wie Tomaten und Bohnen erfrieren zu lassen.

Lanninger sieht für eine Fläche von 1000 m<sup>2</sup> bei kontinuierlicher Beregnung eine Wassermenge von 21 000 Liter je Stunde vor. Dies entspricht einem Niederschlag von 21 l/m<sup>2</sup>Std. oder 21 mm Regenhöhe. Das ist etwa der fünffache Betrag von der Regenmenge, die wir bei intermittierender Beregnung auf die Versuchsfläche gaben. Da schon bei unseren Versuchen erhebliche Übersättigung des Bodens auftrat, muß bei den von Lanninger angegebenen Wassermengen geradezu eine Überschwemmung stattfinden. Er gibt daher auch an, daß bei Anwendung dieses Verfahrens gleichzeitig für ausreichende Entwässerung gesorgt werden müsse.

Der Grund, weshalb Lanninger mit so großen Wassermassen rechnet, ist wohl darin zu suchen, daß er von der Vorstellung ausgeht, das Wasser bringe bei der Beregnung soviel Eigenwärme auf die Pflanzenteile, daß deren Erfrieren dadurch verhindert wird. Nach unseren Vorstellungen und Erfahrungen beruht aber die Schutzwirkung der Beregnung auf der beim Gefrieren des Wassers freiwerdenden Erstarrungswärme, die 80 gr/cal beträgt und im Augenblick der Eisbildung an die Pflanzenteile abgegeben wird. Damit erklärt sich auch die wesent-

lich geringere Wassermenge, die wir bei unseren Versuchen verbrauchten und selbst bei stärkeren Frösten noch als zu reichlich bemessen erkannten.

Im übrigen ist zu den von ihm vorgebrachten Ausführungen über die Fragen einer intermittierenden Beregnung, der erwünschten Regendichte und der Leistung geeigneter Geräte zu sagen, daß es sich um die in einem Rundschreiben des R.K.T.L. an Firmen der Beregnungsindustrie aufgestellten Forderungen handelt. Es steht fest, daß ein wirklich für die Frostschutzberegnung geeignetes Gerät heute noch nicht auf dem Markt ist.

#### D. Zusammenfassung.

##### 1. Worin besteht die Wirkung der Beregnung als Frostschutz?

Wie bei allen anderen Frostschutzmaßnahmen ist die Wirkung auch hier nicht mit einem einzigen Faktor zu erfassen. Es handelt sich vielmehr um einen Komplex mehr oder weniger stark einwirkender Faktoren.

a) Ausstrahlungsschutz. Solange die Beregnung andauert, beträgt der relative Feuchtigkeitsgehalt der bodennahen Luftschichten etwa 100 %. Sowohl theoretische Überlegungen als auch praktische Messungen haben ergeben, daß ein merklicher Rückgang der effektiven Ausstrahlung durch die Beregnung nicht verursacht wird, da der geringe Anstieg der Luftfeuchte von 90 auf 100 % in der bodennahen Luftschicht im Verhältnis zu dem Wasserdampfgehalt der gesamtwirksamen Luftmasse keine Rolle spielt.

b) Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens. Handelt es sich um trockenen Boden, der beregnet wird, dann wird die Wärmeleitfähigkeit des Bodens erhöht. In dem Versuch Kleinbeeren betrug die Erhöhung 30 %. Es erfolgt dadurch eine stärkere Wärmeabgabe des Bodeninnern an die abstrahlende Oberfläche. In manchen Böden, z. B. in trockenen Torfböden, ist der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens durch die Beregnung ein beachtlicher Anteil an der Frostschutzwirkung zuzuschreiben, während sie bei dichten und bei nassen Böden kaum spürbar ist.

c) Wärmezufuhr durch warmes Beregnungswasser. Bei einer Temperaturdifferenz von 5 bis 9 Grad zwischen beregneten Pflanzen und Beregnungswasser betrug der Effekt durch Wärmezufuhr aus dem Beregnungswasser allein 0,5—0,7 Grad. Er ist einerseits abhängig von der Temperaturdifferenz, andererseits aber auch von der gegebenen Regenmenge in der Zeiteinheit (diese war bei den Versuchen in Kleinbeeren und Trier recht verschieden).

d) Abstoppen des Temperaturrückgangs infolge freiwerdender Erstarrungswärme. Hierbei ist ein Schutz bis zu einer Temperatur von —3 Grad absolut sicher festgestellt. Es ist aus den Überlegungen über die Ursachen dieses Frostschutzes ohne weiteres anzunehmen, daß er auch noch bei weit tieferen Temperaturen ausreicht. Mitteilungen aus der Praxis bestätigen diese Annahme. Der Stadtgärtner in Kulmbach behauptet, am 1. Mai 1935 bei einer Außentemperatur von —7 Grad seine beregneten Pflanzen restlos geschützt zu haben, während die nichtberegneten restlos erfroren.

Die Messungen in Trier ergaben, daß sich die Temperatur der beregneten Pflanzen konstant bei etwa —0,5 Grad hielt. Im Augenblick der Eisbildung wird latente Erstarrungswärme frei, die je Gramm Wasser 80 kleine Kalorien beträgt. Da nun das gefrierende Wasser stets eine äquivalente Wärmemenge frei macht, wird, wenn die Wasserzufuhr ausreichend ist und nicht unterbrochen wird, das weitere Sinken der Pflanzentemperatur praktisch in jedem Fall abgestoppt.

##### 2. Wie lange wird beregnet?

Erst wenn die Blattertemperaturen —1 Grad erreichen, muß die Beregnung in Gang gesetzt werden, da selbst die empfindlichsten der bei uns heimischen Kulturpflanzen bei dieser Temperatur noch keinen Schaden nehmen.\*)

Die Beregnung darf erst abgestellt werden, nachdem die Außentemperatur den Nullpunkt merklich überschritten hat. Nach Beendigung der Beregnung setzt nämlich ein starker Temperatursturz ein, wenn die Abstellung vor dem Auftauen erfolgt.

##### 3. Welche Wassermengen müssen gegeben werden (Regenhöhe, Regendichte)?

Die in Trier benutzten Regengeräte, nämlich die Regenanlage Hydor sowie die Regenanlage RK 18, hatten eine mittlere Regenhöhe von 4—5 l/m<sup>2</sup>/Std. Der in Kleinbeeren benutzte Weitstrahlregner lieferte sogar mehr als 6 l/m<sup>2</sup>/Std. In beiden Fällen wurde weit mehr Regen gegeben als erwünscht war. Wenn auch bei unseren Ver-

\*) Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Lufttemperatur bis zu einigen Graden höher liegen kann.

suchen die vorhandenen Regengeräte eine geringere Dosierung nicht zuließen, so scheinen doch Wassermengen von 1—2 l/m<sup>2</sup>/Std. auszureichen. Eine knappe Dosierung ist deswegen anzustreben, weil das stundenlang anhaltende Beregnen den Boden versumpft. Ein Unterbrechen der Beregnung zur Verringerung der Wassermengen ist durchaus verfehlt. Die Versuche ergaben, daß innerhalb weniger Minuten ein Temperatursturz an den beregneten Blättern eintritt, der zum Frosttod führen kann.

#### 4. Welche Kulturen lassen sich schützen?

Die in unseren Versuchen verwendeten Pflanzen, nämlich Erdbeeren in Blüte, Tomaten, Bohnen, Frühkartoffeln und Weinreben sind sämtlich gleichmäßig geschützt worden. Aus weiteren Versuchen wissen wir von Schutzwirkungen bei blühenden Dahlien. Es kann ohne weiteres angenommen werden, daß auch andere Kulturen durch diese Methode vor Frostschaden bewahrt werden können.

#### 5. Können Pflanzen durch Überbrausen geschützt werden?

Hierbei ist zu unterscheiden zwischen der Bekämpfung von Winterfrostschäden bei immergrünen Pflanzen und der Frostschäden während der Vegetationszeit bei nicht ausdauernden Pflanzen. Im ersten Fall schützt die Überbrausung infolge der Eisbildung auf den Blättern die Pflanzen vor dem Vertrocknungstode. Im zweiten Fall dagegen können Erfolge und Mißerfolge eintreten. Die Erfahrungen der Praxis melden sowohl gelungenen Schutz als auch völligen Mißerfolg, ja gelegentlich Zunahme der Schäden nach dem Überbrausen. Aus unseren Versuchen geht die Begründung der verschiedenen Erfolge deutlich hervor.

- a) Sind die Pflanzen zur Zeit der Beregnung bereits erfroren, so nutzt die Überbrausung nichts, und beregnete wie unberegnete Kulturen sind in gleichem Maß geschädigt.
- b) Sind die Pflanzen im Augenblick der Überbrausung noch nicht erfroren, so kann eine Schutzwirkung dann eintreten, wenn die Überbrausung im Augenblick des niedrigsten Temperaturstandes erfolgte und ein weiteres Sinken der Außentemperaturen nachher nicht mehr eintrat.

In diesem Fall werden die überbrausten Pflanzen über die Minimumspitze hinweggebracht und können gerettet werden. War jedoch das Überbrausen schon erfolgt, wenn anschließend die Lufttemperatur weiter zurückging, so können entweder überbrauste und nicht überbrauste Pflanzen gleichmäßig erfroren sein oder auch die überbrausten stärker, weil aus unseren Versuchen hervorgeht, daß nach dem Aufhören der Wasserzufuhr, wenn nicht ein allgemeiner Temperaturanstieg erfolgt, die überbrausten Blätter und Thermometer einen Temperatursturz erleiden, der zu Temperaturen führt, die erheblich unter denen der Außentemperaturen liegen können.

#### 6. Offene Fragen der Frostschutzberegnung.

In Zusammenarbeit mit dem Reichskuratorium für Technik in der Landwirtschaft laufen augenblicklich in Trier weitere Versuche zur Klärung folgender Fragen:

- a) Bis zu welchen Frostgraden ist die Frostschutzberegnung noch wirksam?
- b) Welche Regendichte muß mindestens gefordert werden?
- c) Welche Beregnungsgeräte und Bauarten eignen sich für die verschiedenartigen Aufgaben der Frostschutzberegnung?
- d) Gelingt es, durch die Frostschutzberegnung einen indirekten Frostschutz zu erzielen, indem nicht die zu schützenden Pflanzen selbst beregnet, sondern Kaltluftansammlungen eines Tales oder einer Mulde durch die Beregnung beseitigt werden?

## XI. Das Unterwassersetzen von Pflanzen und Berieseln des Bodens zur Frostschadenverhütung.

### A. Das Überfluten der Pflanzen.

Das Unterwassersetzen von Pflanzen, insbesondere der Reben zum Schutz gegen die Frühjahrsfröste scheint zum erstenmal in Frankreich gegen Ende des vorigen Jahrhunderts angewendet worden zu sein. Dieses Verfahren, ursprünglich zur Bekämpfung der Reblaus gedacht, war zunächst zur Erhöhung der Bodenfeuchtigkeit bei sandigen Böden benutzt worden. Außer in Frankreich, von wo nur spärliche Berichte, in keinem Fall jedoch wissenschaftliche Untersuchungen vorliegen, kam das Verfahren auch noch in den Vereinigten Staaten von Nordamerika in

größerem Ausmaß zur Anwendung. Aber auch von dort besitzen wir nur allgemeine Angaben, die über den Grad der Wirkung kaum einen Schluß zulassen.

Beim Überfluten oder Unterwassersetzen kommen die Pflanzen ganz oder wenigstens größtenteils unter Wasser zu liegen. Diese Methode ist aber nur bestimmten Kulturen wie z. B. bei Preiselbeeren anwendbar. Widerstandskraft und Alter der Pflanzen spielen eine erhebliche Rolle, denn nicht jede Pflanze hält eine so lange Bewässerung aus, wie sie manchmal erforderlich ist. Wasser muß in ausreichendem Maße bei geringen Kosten zur Verfügung stehen. Es ist wichtig, daß die Überflutung in kürzester Zeit erfolgen kann. In den Vereinigten Staaten entnimmt man das Wasser häufig artesischen Brunnen. Auf diese Weise ist man dann in Frostzeiten im Besitze von verhältnismäßig warmem Wasser.

Zur Vermeidung der Nachteile der Überflutungsmethode ist man vielfach dazu übergegangen, die Felder lediglich zu berieseln, wobei man gleichfalls nach Möglichkeit warmes Wasser benutzte, teilweise das Wasser sogar vorwärmte.

Die Ansichten über den Nutzeffekt von Unterwassersetzen und Berieseln gehen meist dahin, daß in nicht zu kalten Nächten und bei Verwendung von warmem Wasser ganz gute Erfolge zu erzielen seien. Die Wirtschaftlichkeit der Methoden hängt natürlich von den betreffenden Örtlichkeiten ab und von der Möglichkeit, das Wasser bequem zuzuführen.

Humphreys<sup>166)</sup> bezeichnet die Überflutungsmethode als ein zweischneidiges Schwert. Denn nasser Boden erwärmt sich schwer und langsam und kühlt sich vor allem bei aufkommendem Wind rasch ab. Dadurch ist das überschwemmt gewesene Gebiet unter Umständen später besonders frostgefährdet. Die anderen amerikanischen Berichterstatter sprechen jedoch dem Unterwassersetzen an sich eine gute Frostschutzwirkung zu.

Bei der Berieselung soll der Gebrauch von kälterem Wasser praktisch keine Änderung der Lufttemperatur und damit keine Frostschutzwirkung bedingen. Nach einer Angabe von Young wurde in Californien bei der Berieselung mit Wasser, dessen Temperatur an der Ausflußstelle 22 Grad C betrug, eine Temperaturerhöhung der Luft von noch nicht 1 Grad C erzielt. Daraus will er schließen, daß diese Methode bei strengen Frösten versagen muß. Seine Ansicht bezieht sich jedoch auf Winterfröste, denn er fährt fort: Ein häufiges warmes Berieseln während des Winters hat aber weiterhin noch zur Folge, daß die Kulturen frühzeitig zu neuem Wachstum angetrieben werden, wodurch wiederum die Widerstandskraft gegen Frost stark herabgesetzt wird. Jedoch hat Hamrick<sup>143, 144)</sup> auf eine andere, recht günstige Auswirkung hingewiesen, die die künstliche Bewässerung in Grand Valley in Colorado verursachte. Seit Einführung der künstlichen Bewässerung soll die relative Feuchtigkeit über weiten Gebieten stark gestiegen sein, was auf die örtliche Nebel- und Wolkenbildung von großem Einfluß gewesen sei.

Die Frostschutzwirkung der eben besprochenen Methoden beruht auf der hohen spezifischen Wärme des Wassers. Durch diese ist der Temperaturfall im Wasser selbst gegenüber dem Rückgang im Freien stark verlangsamt. In Frostnächten ist also eine geringere Abkühlung zu verzeichnen. Bei schweren Frösten wird es zwar zur Bildung einer Eisdecke an der Wasseroberfläche kommen; unter dem Eis, das ein schlechter Wärmeleiter ist, bleiben aber die untergetauchten Pflanzen vor Frost geschützt, weil beim Gefrieren freiwerdende Wärme dem Restwasser zugute kommt.

### B. Das Berieseln des Bodens.

Bei der Berieselung gibt das Wasser, besonders wenn es warm ist, zwar recht ansehnliche Wärmemengen an die Luft ab, erhöht aber deren Temperatur nicht beträchtlich, da schon beim Auftreten geringer Differenzen der Lufttemperatur Austauschströmungen verursacht werden. Des weiteren durchfeuchtet das Wasser den Boden. Nun ist aber die Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens neben seiner Dichte und seinem Bearbeitungszustand von seiner Feuchte abhängig. Ein Boden, der viel Luft enthält, also locker ist, weist eine geringe Leitfähigkeit auf, da Luft ein schlechter Wärmeleiter ist. Wasser leitet bei weitem besser, daher steigt die Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens mit zunehmendem Wassergehalt. Das bedingt aber einen ausgeglichenen täglichen Temperaturgang, d. h. nachts wird die Abkühlung der Bodenoberfläche weniger stark sein, dafür wird allerdings tagsüber nur eine geringe Erwärmung eintreten. Dazu kommt, daß gegen Morgen über dem feuchten Gebiet häufig Nebelbildung einsetzt, wodurch einmal Kondensationswärme frei und ferner die effektive Ausstrahlung herabgesetzt wird. Dagegen wirkt die stärkere Verdunstung tagsüber temperaturerniedrigend und kann die Kulturen nachteilig beeinflussen, weil das überschwemmt gewesene Gebiet bei späteren Kälterückfällen gefährdeter ist.

Das Unterwassersetzen und die Berieselung haben beide den Nachteil, daß durch die ausgiebige Wässerung die notwendige Bodendurchlüftung unter Umständen auf zu lange Zeit herabgesetzt wird. Die Anwendung dieser Verfahren wird sich daher vorwiegend auf Gebiete mit sehr leichten, lockeren und durchlässigen Böden beschränken müssen.

### C. Das Auffüllen von Wassergräben während der Frostzeit.

In anderer Weise wurde wieder die Benutzung der wärmeausgleichenden Wirkung des Wassers und zwar bereits 1895 vorgeschlagen. H. J. Webber empfahl, neben Obstbäume große Wasserbehälter zu setzen, die in ihrer nächsten Umgebung Schutz bieten sollen. Er rechnete mit der beim Gefrieren von Wasser freiwerdenden Erstarrungswärme. Bei hinreichend vorhandenen Wasservorräten und günstiger Verteilung auf den Flächen mag tatsächlich hierin ein gewisser Schutz zu suchen sein, allerdings nur, wenn die Temperatur nach dem Gefrieren nicht weiter abnimmt. In der Praxis könnte man dieses Verfahren vergleichen mit den Wassergräben im Obstbaugebiet der Alten Lande nordwestlich Hamburg. Der Obstbau wird dort im Flachland auf Dämmen getrieben, die durch breite Wassergräben voneinander getrennt sind. Sind diese Wassergräben zur Zeit der Frühjahrsfröste mit Wasser gefüllt, so wird hierin infolge der temperatenausgleichenden Wirkung des Wassers zweifelsohne eine Milderung der Kaltluftansammlung in Bodennähe erfolgen, jedoch nur dann, wenn das Verhältnis Wasser zu festem Boden sich innerhalb der gleichen Größenordnung, also etwa noch 1:10 bewegt. Das langsam fließende Wasser friert nicht so leicht zu, sondern schafft aus seiner Wärmekapazität mit der ihm aufliegenden Kaltluft einen Temperatenausgleich, der einen Frostschaden wohl zu verhindern imstande ist. Springbrunnen in Gärten wirken ebenfalls recht günstig, einmal weil das Wasser ständig Wärme abgibt, dann aber auch dadurch, daß sie die unter Umständen sich bildende Eisdecke, aus der ihrerseits wieder Erstarrungswärme frei geworden ist, weiter mit Wasser überzieht, das dann wieder gefriert usf.

## XII. Weitere Vorschläge zur Verhütung von Frostschäden.

### A. Das Versuchswesen zur Frostschadenverhütung wurde auch mit abwegigen Verfahren befaßt.

Der Reichsausschuß für Frostabwehr im deutschen Weinbau und die Agrarmeteorologische Forschungsstelle Trier hatten nicht nur die Aufgabe, wirkungsvolle und in der Praxis wirtschaftliche Methoden zur Verhütung von Frostschäden auszuarbeiten, sondern auch allen Vorschlägen nachzugehen, selbst wenn sie aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen zunächst abwegig erschienen. Der Bericht über die Frostschadenverhütung wäre daher nicht vollständig, wollte man nicht auch auf eine Reihe von solchen Vorschlägen eingehen, die teils in der Idee richtig, in der Praxis jedoch entweder nicht oder nur in bestimmten Fällen durchführbar sind, oder solche, deren Verwirklichung von vorneherein aussichtslos erscheint.

Da die Vorschläge, die in diesen Verfahren stecken, auf den verschiedensten Überlegungen beruhen, ließen sie sich nicht ohne weiteres immer in die vorher besprochenen Abschnitte eingliedern. Sie sind deshalb herausgenommen worden und werden hier getrennt besprochen.

Noch 1834 gab es eigenartige Vorstellungen von der Möglichkeit, Frostschäden zu verhüten. Der „Allgemeine Volkskalender“<sup>(13)</sup> gibt folgendes Mittel an:

„Der Stamm des blühenden oder knospenden Baumes wird mit einem Stroh- oder Hanfseile von oben nach unten schlangenförmig und in dichten Lagen umwunden um das Ende dieses Strohconductors, an einem Steine befestigt, in einiger Entfernung von dem zu schützenden Baume in ein Gefäß mit Wasser eingelegt. Man kann so auf eine leichte Art mehrere Bäume miteinander in Verbindung setzen und zuletzt das beschwerte Ende in den Wasserbehälter einsenken. Der Frost übt durch diese Vorrichtung seine ganze Wirkung auf das Wasser aus, und die Blüten bleiben unbeschädigt.“ Man sieht, daß die Verfahren selbst manchmal gänzlich abwegig sind, daß aber doch eine richtige Einzelbeobachtung darin vorhanden sein kann, denn mehrere große Wasserbehälter können in einem von besonderem Kaltluftzufluß durch Wände getrennten Garten ohne Zweifel schon frostmindernd wirken.

### B. Vorschläge zur Geländeheizung.

Mehrfach wurde der Vorschlag gemacht, in die gefährdeten Geländestellen ein Rohrnetz zu legen, in dieses Rohrnetz Heißdampf hineinzudrücken und den Dampf aus kleinen Düsen austreten zu lassen. Es besteht kein Zweifel, daß hierin eine Möglichkeit der Frostbekämpfung theoretisch besteht. Praktisch hält jedoch ein solches Verfahren wegen der großen Anlagekosten und der betrieblichen Schwierigkeiten keinen Vergleich mit anderen Heizmethoden aus. Bei einer Vorführung, die im Jahre 1930 in Ruwer bei Trier stattfand, wurde dem Reichsausschuß für Frostabwehr das Verfahren in praktischer Durchführung zum erstenmal gezeigt. Auf einer Fläche von mehreren Hundert Quadratmetern befand sich ein Rohrnetz aus zusammengeschweißten Heizungsrohren von 1 Zoll Durchmesser. In Abständen von etwa 2 m waren Löcher eingebohrt. Das Rohrnetz war an die Dampfmaschine eines Sägewerkes angeschlossen. Bei Inbetriebnahme strömte aus den Öffnungen Heißdampf heraus, der beim Auf-

treffen auf die Pflanzen Schädigungen hervorrufen mußte. Dort, wo die Löcher zur Erde zeigten und die heraus-sprühenden heißen Wassertröpfchen nicht unmittelbar auf die Pflanzen auftrafen, waren Schädigungen nicht zu befürchten. Die Temperatur des beim Austritt wieder kondensierten Dampfes wurde auf 80—90 Grad C geschätzt. Der Versuch dauerte nur drei Minuten, da dann kein Dampfvorrat mehr in der Dampfmaschine vorhanden war. Es müßten also besondere Heizer zur Lieferung so großer Dampfmen gen gebaut werden. Die Verwendung alter Lokomotiven, Dreschmaschinen usw. fällt wegen der geringen Dampfmen gen, die sie liefern können, aus.

Der gleiche Erfinder (Reis) machte den Vorschlag, in Geländestellen mit Gefälle in offenen Rinnen brennendes Öl fließen zu lassen, das in bestimmten Abständen in Sammelbehältern aufgefangen wird. In die Praxis wurde der Vorschlag nicht umgesetzt.

### C. Elektrizität gegen Frost.

Die deutschen Tageszeitungen brachten 1934 Abbildungen aus Nordamerika von hohen Holztürmen. Auf diesen waren Geräte aufgestellt, die in der Lage seien, durch Aussendung elektrischer Energien Nebel und Frost zu verhindern! Nähere Angaben über die Technik des Verfahrens fehlen. Wir können uns nicht vorstellen, welche physikalischen Grundsätze hierbei Anwendung finden sollen.

Dr. Ing. Schwab hat ein Verfahren schützen lassen, den Frostschaden im Freiland zu verhüten durch elektrische Bodenheizung. Theoretisch sowie technisch scheint die Durchführung möglich. Die Praxis hat wegen des hohen Kapitalbedarfs sich bisher ablehnend verhalten. Auch gegen die in einigen Versuchen von der Forschungsstelle Trier durchgeführte Luftbeheizung durch elektrische Widerstandsdrähte hat die Praxis die gleichen Bedenken erhoben.

Die Wetterdienststelle Hamburg<sup>294)</sup> berichtete über einen Versuch mit elektrischen Heizsonnen, der bei entsprechender Häufung der Apparate eine bemerkbare Erwärmung des Geländes hervorgerufen habe. Den gleichen Versuch führte Weinbauoberlehrer Schönhals in Bingen mit Unterstützung der Reichsbahndirektion Mainz durch, welche die Geräte stellte. Die Heizsonnen bestehen aus elektrischen Widerstandsdrähten, die zum Glühen gebracht werden und vor einem Reflektor angeordnet sind. Die Wirtschaftlichkeit dieser Beheizung wird angezweifelt.

### D. Frostschadenverhütung durch Ventilation.

Dem Reichsausschuß für Frostabwehr wurde im Jahre 1930 ein Vorschlag von Kohlfürst, dessen Abdeckungsverfahren an anderer Stelle beschrieben ist, gemacht, die Kaltluftansammlung in Mulden und auf Talsohlen durch Explosionen zu zerstören. Gegebenenfalls sollte man seitlich mit Raketen in die Kaltluftanhäufungen hineinschießen. Eine rechnerische Überlegung hat dazu geführt, daß der Vorschlag nicht in das Versuchswesen mit aufgenommen wurde, weil die Fälle abflußloser Mulden von geringem Luftinhalt (Dolinenform) in der Praxis an sich selten sind und weil sich nach ganz kurzer Zeit bei ruhender Luft die alte Schichtung wieder einstellen muß, so daß die Explosionen in mehr oder weniger großen Abständen aufeinander dauernd folgen müßten.

Aus Norwegen (Foß<sup>108)</sup> wird berichtet, daß man den zur Zeit der Blüte frostempfindlichen Roggen in Mooregebieten dadurch vor Schaden zu schützen versucht, daß man gespannte Seile über die Ähren hinweg gleiten läßt und sie dadurch bewegt. Diese Bewegung sei manchmal ausreichend, um Schaden zu verhüten. Es ist denkbar, daß durch die Bewegung der Ähren erstens die Ausbildung einer besonderen Kaltfluthaut über dem ausstrahlenden Ährenfeld verhindert oder eine vorhandene geschwächt wird und daß ferner die eigene Abkühlung des Roggens gegenüber Luft geringer wird, wenn der Kontakt mit der Luft größer wird (siehe Seite 208).

### E. Frostschutz der Pflanzen durch Bedecken mit aufgetragenen Mitteln.

Die Firma Seitz-Werke, Bad Kreuznach, brachten etwa 1932 auf Anregung des Weingutsbesitzers Voigtländer ein Material heraus, das auf die Pflanzen aufgestäubt werden sollte. Bei der Untersuchung des Materials stellte es sich heraus, daß es sich um faseriges Asbestpulver handelte. Die Idee, die der Erfinder damit verfolgte, ist in dem Motto zu sehen, mit dem er seine Werbeschriften überschrieb: „Wenn mich friert, ziehe ich eine warme Jacke an.“ Er glaubt also, daß gewissermaßen durch das Überziehen der Blätter mit einer Asbeststaubschicht eine Abkühlung der Blätter unter den Gefrierpunkt und damit ein Schaden nicht mehr eintreten werde. Das Verfahren hat sich als nicht brauchbar erwiesen. Erstens war es nicht möglich, auf den Blättern und Pflanzenteilen einen einigermaßen gleichmäßigen und haftfähigen Überzug herzustellen. Zweitens zeigten die Blätter, auf welchen einige Tage lang das Asbestpulver aufgetragen war, Verätzungserscheinungen, was auf die Bildung von Säuren schließen ließ. Drittens zeigten die mit dem Pulver gleichmäßig bestreuten Thermometer gegenüber solcher ohne Bestäubungsmaterial keine Temperaturveränderung, wenn man sie Frosttemperaturen aussetzte.

Zur gleichen Zeit brachte die Firma Schanze in Mußbach in der Pfalz ein Bestäubungspulver heraus,

das hauptsächlich aus gemahlenden Korkabfällen bestand. Hinsichtlich der Haftfähigkeit und der thermischen Wirkung ist das gleiche negative Resultat zu verzeichnen, das für das Seitz'sche Mittel festgestellt wurde.

Diese beiden Mittel, sowie eine Reihe von anderen Bestäubungsmaterialien wurden außerdem durch Professor G. Gaßner in der Botanischen Versuchsstation Gliesmarode bei Braunschweig geprüft, da dort Gefriereinrichtungen vorhanden waren, und abgelehnt.

Zu den Bestäubungs- und Bespritzungsverfahren mit der Absicht, einen schützenden Überzug über die gefährdeten Pflanzen zu erzielen, die in mehr als 20 verschiedenen Vorschlägen der Versuchsstelle zur Prüfung eingereicht wurden, ist in jedem Falle zu sagen, daß weder Kalkmilch, noch Lehm, noch beigemengte Salze irgendeinen Einfluß in der gewünschten Hinsicht hatten, so daß diese Verfahren als nicht brauchbar abgelehnt werden müssen.

Im Weinbau suchte man gelegentlich dem Draht, der zum Anbinden des Rebholzes Verwendung findet, eine Vermehrung der Frostgefahr zuzuschreiben. Es wurde behauptet, daß der Draht „den Frost anziehe“. Daher machten Firmen den Vorschlag, entweder den Blankdraht zu ersetzen durch Draht, welcher mittels Pappe oder Gummi isoliert ist, oder eine Auflage von kleinen Holzlatten auf den Draht zu machen. Die Firma Meyer & Weigand in Nördlingen brachte Rebenschutzstäbe heraus, welche über den Draht gebunden werden sollten, damit die jungen Triebe nicht durch Kontakt mit dem Eisendraht erfrieren sollten. Die Beobachtung der Forschungsstelle Trier und der Weinbauversuchsstationen ergab aus einem Material von Tausenden von Fällen, daß der Draht ohne Einfluß auf eine erhöhte Frostgefährdung ist, so daß die durch die neuen Mittel beabsichtigte Wirkung hinfällig ist.

#### F. Bespritzungsverfahren zur physiologischen Beeinflussung der Pflanzen.

Gaßner machte dem Reichsausschuß für Frostabwehr den Vorschlag, die grünen Blätter frostgefährdeter Pflanzen mit verdünnter Zuckerlösung zu bespritzen. Er ging von dem Gesichtspunkt aus, daß im Zellsaft gelöster Zucker zur Erhöhung der Konzentration des Zellsaftes und damit zur Erniedrigung des Gefrierpunktes des Zellsaftes beiträgt, da ja Zucker mit Wasser eine wahre Lösung bildet. Bekanntlich sind die Pflanzen unter gewissen Umständen imstande, erhebliche Mengen Wasser durch ihre oberirdischen Organe aufzunehmen (O. Kessler<sup>187</sup>). Daher glaubte er, daß durch das Aufspritzen von Zuckerlösungen Zucker in den Zellsaft eindringe. Die Versuche wurden durch die Versuchsstelle in Trier nur in geringem Umfange durchgeführt. Bei stärkeren Konzentrationen zeigten sich große abgestorbene Flecken auf den Blättern, die auf Plasmolyse zurückgeführt werden müssen. Die Wirkung verschiedener Konzentrationen sollte in Braunschweig beurteilt werden. Da eine Mitteilung über den Ausgang der Versuche nicht bekannt wurde, ist anzunehmen, daß keine positiven Ergebnisse herauskamen. Die Idee ist jedoch wert, weiter verfolgt zu werden, sehen wir doch immer wieder Unterschiede im Frostschaden auf kleinstem Raum, ja selbst an der gleichen Pflanze, die nur auf physiologische Unterschiede, keineswegs aber auf meteorologische zurückgeführt werden können.

#### G. Vorschläge zur Verzögerung des Austriebs der Pflanzen.

Humphrey<sup>166</sup>) empfiehlt, den Austrieb frostgefährdeter Pflanzen im Frühjahr dadurch zurückzuhalten, daß auf den Boden Eis aufgebracht wird. Die Abkühlung des Wurzelwerkes verzögere den Austrieb. Pflanzen, die in gewissen Entwicklungsstadien besonders frostgefährdet sind, z. B. während der Blüte, kämen durch eine Verzögerung des Austriebs mit dem Blütebeginn in eine Zeit, in der die Gefahr schon etwas geringer ist.

Young<sup>414</sup>) will den Austrieb der Pflanzen zurückhalten durch Umwickeln mit Stroh und durch Kalkanstrich. Der Anstrich der Holzteile mit Kalk veranlasse eine Reflexion der Sonnenstrahlen, während das Holz sonst in beachtlichem Maße die Strahlung absorbiere. Je weniger Strahlung absorbiert wird, um so weniger erwärme sich das Holz, daher erfolge der Austrieb um so später.

Es ist bisher nicht exakt versucht worden, den klaren Beweis für die austriebsverzögernde Wirkung des Kalkes auf Obstbäume zu führen. Die Meinungen widersprechen sich sehr. Jedoch ist die Mehrzahl der Obstbau praktiker davon überzeugt, daß tatsächlich eine Austriebsverzögerung von wenigstens mehreren Tagen eintritt.

Allerdings besteht hierin kein voll wirksamer Schutz, da ja die Frostgefährdung wenigstens in den gemäßigten Breiten Europas wochenlang anhält. Die Maßnahme, die schon aus Gründen der Schädlingsbekämpfung eingeführt wurde, ist übrigens in Deutschland sehr verbreitet.

Neuerdings versucht H. Schandlerl durch Bestreichen der noch nicht ausgetriebenen Äste eine Austriebsverzögerung zu erzwingen. Darüber, ob man es tatsächlich in der Hand hat, mit Materialien von bestimmter Konzentration eine berechenbare Austriebsverzögerung ohne Schädigung der Pflanzen zu erzielen, und darüber, ob in der Austriebsverzögerung ein brauchbares Verfahren zur Verhütung von Frostschäden zu sehen ist, kann bisher noch nichts ausgesagt werden.

### XIII. Betriebsmaßnahmen zur Verminderung der Frostschäden.

#### A. Die Bodenbearbeitung.

Ein Boden von guter Wärmeleitfähigkeit ist in viel geringerem Maße an der Entstehung von Kaltluft beteiligt als ein Boden mit schlechter Wärmeleitfähigkeit. Das Ackern, Grubbern und Eggen führt zu einer Lockerung der oberen Bodenschichten und damit zur Verminderung der Wärmeleitfähigkeit. In den oberen Bodenschichten bilden sich kleine Luftpöcher. Da Luft ein weit schlechterer Wärmeleiter ist als Wasser und fester Boden, bedingt jedes der genannten Bodenbearbeitungsverfahren eine Vermehrung der Kaltluftbildung in Frostnächten. Das Unterlassen der Bodenbearbeitung führt normalerweise zu einer Unkrautdecke. Diese ist gleichfalls als ungünstige Bodenoberfläche zu bezeichnen, da sie einerseits ein wärmeisolierendes Polster gegen das Bodennere bildet und andererseits durch die vermehrte Oberfläche bessere Kontaktmöglichkeiten mit der vorbeigleitenden Luft bildet. Stroh- und Mistdecken wirken in gleichem Sinne wie Rasenpolster. Auch sie sollen in frostgefährdeten Lagen zur Frostzeit nicht die Bodendecke bilden. Die Bodenbearbeitung hat daher auf frostgefährdeten Flächen nicht zu unterbleiben, sie ist aber so rechtzeitig vor Beginn der Frostperiode durchzuführen, daß bis dahin durch Niederschläge wieder Bodenschluß herbeigeführt ist. In versumpften Böden wird der größte Teil der tagsüber eingestrahlt Energie zur Verdunstung von Wasser verbraucht. Diese Böden erwärmen sich sehr schwer. Zu Beginn der Ausstrahlung haben sie daher einen weit geringeren Wärmeverrat als trockene Böden mit gutem Bodenschluß. Versumpfte Böden sind daher trocken zu legen. Bei Moorböden ist darauf zu achten, daß ein trocken gelegtes Moor ungünstigere Verhältnisse als ein durchfeuchteter Moorboden aufweist. Zur Erzielung einer besseren Wärmeleitfähigkeit müssen die trockengelegten Moorböden angewalzt werden. Dieses Anwalzen ist gleichfalls für alle Bodenflächen zu empfehlen, die man wegen der Unterbringung von Dünger und der Beseitigung der Unkrautdecke frisch bearbeiten mußte. Homén hat vorbildliche Untersuchungen des Einflusses der verschiedenen Bodenarten auf den Wärmeumsatz der darüber liegenden Luftschicht gemacht.<sup>159)</sup>

#### B. Die Einflüsse der Pflanzenernährung.

In dem Abschnitt „Frost und Pflanze“ sind die physiologischen Fragen bereits besprochen, so daß hier nur kurz auf die praktische Seite eingegangen werden muß. Einseitig ernährte Pflanzen sind stärker frostgefährdet als vollgedüngte. Besonders ist eine einseitige Stickstoffernährung ungünstig, da sie zu frühen und mastigen Austrieb anregt. Starke Kalidüngung scheint günstig zu wirken (Kessler<sup>190, 192</sup>), zumal auf kalkhaltigen Böden. In besonderen Frostlagen ist der Stickstoffdünger möglichst erst nach Beendigung der Frostgefahr als Kopfdünger zu geben.

#### C. Die Maßnahmen, die bei der Pflanzung zu beachten sind.

Rechtzeitiges Säen oder Pflanzen ermöglicht es, die besondere Frostperiode des Frühjahrs zu umgehen. Geeignete Sortenwahl kann durch den Anbau resistenter Pflanzen ebenso nützen wie durch den Anbau von Sorten mit eingengter Vegetationsspanne. Bei Holzgewächsen bringt ein später Schnitt, wenn die Knospen schon im Schwellen sind, eine Austriebsverzögerung. Darin kann ein, wenn auch minimaler, Frostschutz zu erblicken sein. Reben werden in manchen Gegenden Deutschlands in frostgefährdeten Lagen erst nach beendeter Frostperiode nach unten gebogen. Sie ragen dadurch aus der frostgefährdetsten bodennahen Luftschicht heraus und der Austrieb erfolgt am stärksten in den letzten Augen. Die anderen, näher am Altholz liegenden Augen, erfahren eine Austriebsverlangsamung und damit wiederum einen gewissen Schutz.

In der Erziehungsart der Pflanzen besteht ein sehr beachtlicher Frostschutz, sofern es sich um die Ebene handelt. Die Abbildung 4 a zeigt, daß man mit Hochstammerziehung häufig der Kaltfluthaut, welche die Ebene überzieht, mit dem oberen Teile der Bäume ausweichen kann. Demnach ist in der Ebene der Hochstamm dem Buschstamm oder gar dem tiefer liegenden Horizontalkordon überlegen. In den Rebplantagen der flachen Lagen von Rheinhessen geht man teilweise mit dem gleichen Verfahren der besonders abgekühlten bodennächsten Schicht aus dem Wege. Die Reben werden in der Niederung von Oppenheim als Lauben gezogen, so daß die grünen Triebe sich beim Austrieb mehr als 2 m, statt normalerweise etwa 50 cm über dem Boden befinden. Bei der in der Ebene meist stärkeren Schichtung der Luft kann dies eine Temperaturdifferenz von 2—3 Grad bedeuten zugunsten der höher gezogenen Reben! Weinbauinspektor K. Willig hat auf Grund seiner praktischen Beobachtungen in hunderten von Fällen bei der Neuanlage von Weinbergen in Frostlagen möglichst hohe Erziehungsart vorgeschlagen und durchgeführt. Dadurch hat er nicht nur die Frostsicherheit gefördert, sondern gleichzeitig beachtliche Quantitätszunahmen erreicht. Ein Erfolg in Fallwindlagen und im Kaltluftsee eines Tales ist naturgemäß nicht in gleichem Maße zu erwarten, da man hier durch Höherziehen der Pflanzen kaum der Gefahrzone ausweichen kann.

Auch bei der Bepflanzung der Felder ist auf die vorhandene Frostursache Rücksicht zu nehmen. Wenn man zum Beispiel Reben an einem flach geneigten Hang anlegt in Form von Drahtanlagen, so sollte man nicht die Zeilen quer zum Gefälle ziehen, da dadurch der Abfluß der Kaltluft infolge Verweilens in dem Weinberg verzögert wird. Laufen dagegen die Rebzeilen mit dem Gefälle, so ist eine günstige Luftdrainage vorhanden und eine Minderung der Kaltluftansammlung zu beobachten. Der vielfach im deutschen Weinbau aufgetretene Streit, ob Draht- oder Pfahlerziehung der Reben eine stärkere Frostgefährdung bedingt, wurde von oberflächlichen Beobachtern mehrfach zu Ungunsten der Drahterziehung zu lösen versucht. Es stellte sich bei der Nachprüfung aber gewöhnlich heraus, daß die Vergleichsverhältnisse nicht korrekt waren. Allerdings, wenn man bei der Drahterziehung mit den grünen Trieben durch eine zu niedrige Erziehungsart nahe an die Bodenoberfläche herangeht, dann vermehrt man zweifelsohne die Frostgefahr. Bei der Pfahlerziehung bleibt man in einem größeren Bodenabstand als bei manchen niedrigen Drahterziehungen. Die Drahtanlagen bilden außerdem für abströmende Kaltluft dann ein Hindernis, wenn sie quer zum Gefälle verlaufen. Bei den Pfahlanlagen kann die Luft in jeder Richtung glatt abziehen. Legt man jedoch die Drahtanlagen nach dem Gesichtspunkt der günstigen Luftdrainage an und wählt man die gleichen Bodenabstände, so treten Unterschiede zwischen Draht- und Pfahlerziehung nicht auf.

### Schlußwort.

Als 1929 von uns das Versuchswesen auf dem Gebiet der Frostschadenverhütung aufgegriffen wurde, hatte man bei der Sichtung der Literatur auf diesem Gebiete den Eindruck, daß schon außerordentlich viel erdacht und versucht worden war. Immer wieder aber mußten wir bemerken, daß den Folgerungen aus den Versuchen wenig Beweiskraft zugerechnet werden konnte. Die Vergleiche lassen sich gerade bei der Frostbekämpfung wegen der auf kurze Entfernung stark wechselnden Einflüsse der Umgebung nicht so leicht durchführen wie bei Düngungsversuchen. Hier kann man unter gleich gehaltenen Bedingungen die Pflanzen mit und ohne den in der Prüfung stehenden Pflanzennährstoff ziehen. Bei der Frostbekämpfung ist es aber sehr schwer, gleichartig zu wertende Flächen zu finden, auf denen man verschiedene Verfahren in Vergleich setzen kann. Weitaus den meisten Versuchsanstellern genügte z. B. die Tatsache, daß die Reben in dem einen Fall frostgeschädigt, in dem anderen Fall gesund geblieben waren, um das Verfahren als restlos befriedigend zu bezeichnen. Nach unseren Erfahrungen ist damit jedoch keine Bewertung eines Verfahrens in Bezug auf seine Sicherheit gegen Frostschaden gegeben. Als Beispiel können wir hunderte von Fällen anführen, wo frisch gehackte Weinberge restlos erfroren waren und die nicht gehackten Nachbarweinberge gesund blieben. Es wird jedoch niemand auf dem Standpunkt stehen, daß das Unterlassen der Bodenbearbeitung allein ein ausreichender Frostschutz sei. Es ist ganz klar, daß in diesen Fällen die allgemeinen meteorologischen Außenbedingungen ein Absinken der Blattemperaturen gerade bis zur Erträglichkeitsgrenze gebracht hatten. Die geringen Unterschiede der Kaltluftbildung über frisch gehackten Böden gegenüber unbearbeiteten, die sich in einer Größenordnung von Zehntel Grad Celsius bewegen, hatten ausgereicht, um in jenen Fällen schwerste Frostschäden zu erreichen. Es gehört daher in allen Fällen zu einer beweiskräftigen Beurteilung der Güte von Frostschadenverhütungsmaßnahmen der Versuch einer kritischen zahlenmäßigen Bewertung.

Schriftennachweis.<sup>1)</sup>

1. Adamson, J. E., Fighting Frost. M.W.R. 1911.
2. — Pacific Rural Press, Jan. 1912.
3. — M.W.R. 1913.
4. — Fighting the big freeze. M.W.R. 1913.
5. Akerman, A., Botaniska Notiser 1919.
6. — Veröff. d. Knut. u. Alice Wallenberg-Stiftung, 10. Lund 1927.
7. Albrecht, F., Über Zusammenhang zwischen täglichen Temperaturen und Strahlungshaushalt. Gerl. Beitr. Geophys. 1930.
8. — Eine einfache, annähernd wetterbeständige Schwärzung für Strahlungsmeßgeräte. Meteor. Z. 1931.
9. — Das quantentheoretisch gegebene Wasserdampfspektrum und seine Bedeutung für die Untersuchungen über den Wärmeumsatz strahlender Luftschichten. Meteor. Z. 1931.
10. — Theoretische Untersuchungen über den Strahlungsumsatz in Wolken. Meteor. Z. 1933.
11. — Über die Einwirkung der Strahlung auf frei aufgestellte elektrische Thermometer. Ber. Tätigkeit Preuß. Met. Inst. i. J. 1933. Berlin 1934.
12. Allen, C. C., The fruit-frost work of the weather Bureau in the upper San Joaquin Valley. M.W.R. 1929.
13. Allgemeiner Volkskalender, erschienen bei Ferdinand Rubach, Magdeburg und Salzwedel. 1834.
14. Almstedt, K., Die Kälterückfälle im Mai und Juni. Diss. Göttingen 1913.
15. Alt, E., Die mittlere Temperaturverteilung in Süddeutschland. München 1921.
16. Alter, J. C., Does frost fighting pay in Utah? M.W.R. 1912.
17. — Forecasting minimum temperatures in Utah. M.W.R. Supplement 16. 1920.
18. André, Ökonomische Neuigkeiten. 1824.
19. Ångström, A., Studies of the frost problem I. Geograf. Ann. 1920.
20. — Studies of the frost problem II. Geograf. Ann. 1921.
21. — Einige Bemerkungen zu meinen Studien zum Frostproblem, mit besonderer Berücksichtigung eines Referats von W. Schmidt. Meteor. Z. 1922.
22. — Studies of the frost problem III. Geograf. Ann. 1923.
23. — Über die Anwendung der elektrischen Kompensationsmethode zur Bestimmung der nächtlichen Ausstrahlung. Nova acta reg. soc. scient. Upsal. Ser. IV, vol. 1, 2. 1905.
24. Apelt, A., Cohns Beitr. z. Biol. d. Pflz. 9, 215. 1907.
25. — Neue Untersuchungen über den Kältetod der Kartoffel. Diss. Halle-Wittenberg 1907.
26. Asiatic Petroleum Co. Ltd., Orchard and vineyard heating. Fuel Oil General Dept. Report No. 67. 1931.
27. Askénasy, E., Ber. d. D. bot. Ges. 8, 61. 1890.
28. Aßmann, R., Die Nachtfröste des Monat Mai. Halle 1885.
29. Aujészky, L., Über die Abwehr der Spätfröste. Az Időjárás 1928.
30. — Über Physik der Frostflächen. Mezőgazdasági Kutatások. 1931.
31. Babo, Weinlaube 1882.
32. Babo-Mach, Handbuch des Weinbaues und der Kellerwirtschaft. Berlin 1923.
33. Balde, H., Vergleichende chemische und refraktometrische Untersuchungen an Weizenkeimlingen unter Berücksichtigung der Frosthärte der untersuchten Sorten. Diss. Braunschweig 1929.
34. Baker, Cl. E., Orchard heating experience in Indiana. American Fruit Grower Magazine, Jan. 1928.
35. Barney, F. E., Practicability of orchard heating with coal. Better fruit 5, No. 4, 1910.
36. Bartetzko, H., Jahrb. wiss. Bot. 47, 57, 1910.
37. Barthen, Mitteilungen über Weinbau und Kellerwirtschaft 1906.
38. Baur und Philipps, Gerl. Beitr. Geophys. 42, 160, 1934.
39. Beals, E. A., Forecasting frost in the north pacific states. U. S. Dept. of Agriculture. Bulletin No. 41. Washington 1912.
40. — Frost forecasts and protection in Oregon. Washington and Idaho. M.W.R. 1914.
41. Becquerel, Compt. rend. 15, 1437 und 148, 1052. 1910.
42. Bělehrádek, J., Protopl. 3, 317. 1928.
43. — Arch. int. Physiol. 30, 205. 1928.
44. — Protopl. 12, 406. 1931.
45. — C. r. S. B. 107, 727. 1931.
46. — C. r. S. B. 107, 730. 1931.
47. — Arch. int. Physiol. 35, 1. 1932.
48. — Protopl. 16, 102. 1932.
49. — Temperature and living matter. Berlin 1935.
50. Bender, C., Die Frühjahrsfröste im Unterelbebezirk und ihre Bekämpfung. Wetter 1932.
51. — Die Frühjahrsfröste an der Unterelbe und ihre Bekämpfung. Kleinklimatologie und Nachtfrostschutz 1930—1933. Öffentliche Wetterdienststelle Hamburg.
52. — Die Frühjahrsfröste an der Unterelbe und ihre Bekämpfung. Kleinklimatologie und Nachtfrostschutz 1933—1934.

<sup>1)</sup> Abkürzungen: Meteor. Z. = Meteorologische Zeitschrift.  
M.W.R. = Monthly Weather Review USA.  
Wetter = Das Wetter, Zeitschrift für angewandte Meteorologie.

53. Bonecke, W. und L. Jost, Pflanzenphysiologie, Bd. I. Jena. 1924.
54. — Pflanzenphysiologie, Bd. II. Jena 1923.
55. Bennett, W. J., Predicting minimum temperatures. M.W.R. 1923.
56. Bezold, v., W., Zeitschr. f. Luftsch. 1894.
57. — Die Kälterückfälle im Mai. Abhandl. k. Bayer. Akad. Wiss. Kl. 2, Bd. 14, 1883.
58. Bliß, G. S., Forecasting minimum temperatures for the cranberry bogs of New Jersey. M.W.R. 1922.
59. Bonnet, W. E., Frost fighting in California vineyards. M.W.R. 1911.
60. Brackett, G. B., Prevention of frost injury to fruit crops. U. S. Dept. Agr. Yearbook 1909, sowie Better fruit 5, No. 1, 1910.
61. Brøhm, Ein neues Frostschutzverfahren. Deutsche landw. Presse. Jahrg. 62, Nr. 17, 1935.
- 61a. Breuer, E., Das Klima des Niederrheins und seiner Umgebung. Diss. Aachen 1929.
62. Briggs, R. R., Frost protection in Arizona. M.W.R. 1914.
63. Brown, H. T. and F. Escombe, Proc. Roy. Soc. London 62, 160. 1898.
64. Büdel, A., Der Strahlungsschutz am Thermometer. Wetter 1933.
65. Budig, W., Ergebnisse der meteorologischen Beobachtungen in Potsdam im Jahre 1915. Berlin 1917.
66. Carpenter, F. A., Utilization of frost warnings in the citrus region near Los Angeles, Cal. M.W.R. 1914.
67. Carpenter, F. A. and J. W. Garthwaite, Memorandum on air drainage in the vicinity of the Corona district. Cal. M.W.R. 1914.
68. Chandon de Briailles, Revue de viticulture 1896.
69. — Revue de viticulture 1898.
70. Chanzy, Revue de viticulture 1898.
71. Church, J. E. and S. P. Fergusson, Avoidance and prevention of frost in the fruit belts of Nevada. Nevada agr. exp. stat. Bull. 79. 1912.
72. Cline, J. L., Frost protection by irrigation in southern Texas. M.W.R. 1914.
73. Coit, J. E., The protection of citrus fruit against frost. Citrus protective league of California. Los Angeles 1912.
74. — Citrus fruits. New York 1915.
75. Constantinescu, E., Untersuchungen über die Kältefestigkeit der Wintergerste. Diss. Halle 1933. Planta, Bd. 21. 1933.
76. — Winterfestigkeitsbestimmungen an rumänischen Winterweizen. Pflanzenbau, Jahrg. 10, Heft 6. 1933.
77. Cook, A. W., The protection of strawberries from frost through artificial heating. M.W.R. 1927.
78. Cox, H. J., Frost and temperature conditions in the cranberry marches of Wisconsin. M. S. Weather Bur. Bull. 1910.
79. Culberstone, J. D., Frost protection in the Limoneira lemon orchards. California State bom. Hort. M. Bull. 3. 1914.
80. Dabney, T. G., Science, Mai 1919.
81. Dague, Ch. I., Report of temperature Survey and Fruit-Frost Investigations, San Gabriel Valley District, Southern California. Special Report on file in Division of Agriculture Meteorology, Washington.
82. Dalmer, M., Über Eisbildung in Pflanzen mit Rücksicht auf die anatomische Beschaffenheit derselben. Flora, Heft 2. 1895.
83. Daniel, Weinlaube 1874.
84. Davenport, Ch. B., Experimental Morphology. New York 1897/99.
85. Defant, A., Die nächtliche Abkühlung der unteren Luftschichten und der Erdoberfläche in Abhängigkeit vom Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, math.-naturwiss. Kl., 125. Bd., 1537. 1916.
86. De Jong, D. A., Arch. néerl. de Physiol. 7, 588. 1923.
87. Dexter, S. T., W. E. Tottingham and L. F. Graber, Plant Physiol. 5, 215, 1930.
88. — Plant Physiol. 7, 63. 1932.
89. Dieckmann, A., Der Frost in Württemberg und Baden. Öhringen 1937.
90. Dörscheid, O., Die mittlere Dauer des Frostes auf der Erde. Diss. Halle. Meteor. Z. Heft 1, 2. 1907.
91. Dove, H. W., Über die Rückfälle der Kälte im Mai. Aus Abhandl. Kgl. Akad. Wiss. Berlin 1856.
92. Dubois, P., Effektive nächtliche Strahlung. Gerl. Beitr. Geophys. 1929.
93. — Ein Ferneffektiv-Aktinometer. Meteor. Z. 1932.
94. Dunn, S. and A. L. Bakke, Plant Physiol. 1, 165. 1926.
95. Ellison, E. S., A critique on the construction and use of minimum-temperature formulas. M.W.R. 1928.
96. Estreicher-Kiersnowska, Bot. Cbl. 134, 244.
97. Ewart, A. J., Ill. Linn. Soc. Lond., Bot. 31, 364. 1896.
98. Ext, W., Phytotoxische Versuche mit neuartigen künstlichen Nebeln, sog. Säurenebeln, zur Abwehr von Nachtfrostschäden in Baumschulen, Weinbergen und sonstigen gärtnerischen Kulturen. Angewandte Botanik 1931.
99. — Neue Erfahrungen über die Verwendung von Säurenebeln zur Frostschadenverhütung. Nachrichtenblatt für den Deutschen Pflanzenschutzdienst, Nr. 10. 1931.
100. Falckenberg, G., Absorptionskonstanten einiger meteorologisch wichtiger Körper für infrarote Wellen. Meteor. Z. 1928.
101. — Experimentelles zur Absorption dünner Luftschichten für infrarote Strahlung. Meteor. Z. 1936.
102. Faes, H.: La Défense contre les gelées des printemps. Chronique viticole. 1937.
103. Filz, Verhandlungen d. Sektionsvers. d. Wein- u. Obstproduzenten in Trier. 1874.
104. Fiolle de, O., Revue de viticulture. 1897.
105. Fischer, H. W., Beitr. z. Biol. d. Pfl. 10, 133. 1911.
106. — Versuche über Frostbeschädigungen an Getreide und Hülsenfrüchten. Jahresber. Vereinig. angew. Bot., Jahrg. 13, T. 2. 1915.
107. Foex, Revue de viticulture. 1902.
108. Foß, H., Nachtfroste, Ursachen und Bekämpfung. Bericht der norwegischen Versuchstation für Pflanzenzüchtung. 1928 (norwegisch).
109. — Nattefrost. Naturen 1930.
110. Franklin, T. B., The cooling of the soil at night, with special reference to late spring frosts. Proc. Roy. Soc. Edinburgh. 39 (II), 120, 1918/19; 40 (I), 10, 1919/20.
111. Frazer, C., The frost problem up to date. Country gentleman 79. 1914.

112. Fröckmann, Können wir die Frostschäden auf unseren Mooren vermindern oder gar verhüten? Mitt. Ver. Förd. Moorkultur im Deutschen Reiche. H. 9, 10. 1934.
113. Fueß, J., Über Wirkungen und Schäden der Maifröste 1934 an Kober 5 BB-Reben. Die Gartenbauwissenschaft, Bd. 9, H. 5. 1935.
114. Garrett, Ch. C., Predicting minimum temperatures in the vicinity of Walla Walla, Wash. M.W.R. 1922.
115. Garriot, E. B., Notes on frost. Farmers Bulletin Nr. 104. U.S. Department of Agriculture. Washington 1899 und 1911.
116. Garthwaite, J. W., Letter on frost and frost prevention. M.W.R. 1914.
117. Gassies, J. P., Une expérience de protection contre la gelée. La Météorologie. T. VIII. 1932.
118. Gaßner, G., Über die Durchführung der Frosthärteprüfungen von Getreidezuchtstämmen. Der Züchter, H. 9. 1931.
119. Gautier, Praktische Verwendung des künstlichen Nebels im Frieden. Luftschutz und Frostschutz. Gasschutz und Luftschutz. 1933.
120. Geiger, R., Das Stationsnetz zur Untersuchung der bodennahen Luftschichten. Deutsches Met. Jahrb. Bayern. Dritter Jahresber. 1925. München 1926.
121. — Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig 1927.
122. — Vom Frostschutzversuchsfeld des Landesverbandes. Der Wegweiser im Obst- und Gartenbau, H. 24. 1929.
123. — Höhenlage und Spätfrostgefährdung. Forstwissenschaftliches Centralblatt, Jahrg. 55, H. 17, 21. 1933.
124. — Sollen wir etwas gegen den Spätfrost tun? Der Wegweiser im Obst- und Gartenbau, H. 8. 1931.
125. Gerlach, W., Ann. Phys. 50, 259. 1916.
126. Göppert, H. R., Wärmeentwicklung in den Pflanzen. Breslau 1880.
127. — Über das Gefrieren und Erfrieren der Pflanzen. Stuttgart 1883.
128. Gordon, J. H., Temperature Survey of the Salt River Valley, Ariz. M.W.R. 1921.
129. Gorke, H., Landw. Versuchsstat. 65, 149. 1906.
130. — Über chemische Vorgänge beim Erfrieren der Pflanzen. Die landw. Versuchs-Stationen 1906.
131. Greathouse, G. A., Plant Physiol. 7, 349. 1932.
132. Grøene, L., Orchard heating. Jowa agr. exp. stat. Bull. 129. 1912.
133. Grimsehl, E., Lehrbuch der Physik, Bd. 1. 1923.
134. Grubb, E. H., Orchard heating. Oregon Short Line R. R. Co. Salt Lake City, Utah 1912.
135. Gruß, E. W., Protection against frost. M.W.R. 1911.
136. — Protecting truck against frost. M.W.R. 1911.
137. Haberlandt, F., Landw. Versuchsstat. 17, 104. 1874.
138. Hagerup, H., Räucherversuch gegen Frost auf Maeresmyren im Herbst 1928 (norwegisch).
139. Haines, E. H., Influence of varying soil conditions on night air temperatures. M.W.R. 1922.
140. Hallenbeck, C., Night-temperature studies in the Roswell fruit district. M.W.R. 1918.
141. — Frost-fighting in the Pecos valley, M.W.R. 1923.
142. Hällström, Om Nattfroster i Finland 1804 in Kongl. Finska Hushållningssällskapets Handlingar T II s. 75, 1807 (cit. nach Homén).
143. Hamrick, A. N., Fruit-frost work in the Grand Valley of Colorado. M.W.R. 1921.
144. — Frost fighting in the Grand Valley in Colorado. M.W.R. 1921.
145. Hannig, E., Über hygroskopische Bewegungen lebender Blätter bei Eintritt von Frost und Tauwetter. Ber. Dt. Botan. Ges., 26 a. H. 2. 1908.
146. Hann-Süring, Lehrbuch der Meteorologie. Leipzig 1937.
147. Harvey, R. B., Ill. of Agric. Res. 15, 83. 1918.
148. — Amer. J. Bot. 17, 212. 1930.
149. Haude, W., Temperatur und Austausch der bodennahen Luft über einer Wüste. Beitr. Phys. fr. Atm. 21. 1934.
150. Heilbrunn, L. V., Amer. Ill. of Physiol. 68, 645. 1924.
151. Herisson, Revue de viticulture. 1904.
152. Herrik, R. S., Orchard heating and frost prevention. Portland Oreg. Pazific horticultural correspondence school. 1913.
153. Herrmann, v., Ch. F., Protection against frost in Georgia. M.W.R. 1914.
154. Hertzog, Weinbau und Weinhandel. 1901.
155. Hessische Chemische Prüfungsstation für die Gewerbe. Berichte vom 30. April 1929.
156. Hettner, Ann. Phys. 55. 1918.
157. Hoffman, A. H., Laboratory tests of orchard heaters. University of California, College of Agriculture, Agr. exp. stat. Berkely California, Bull. 442. 1927.
158. Hollrung, M., Die Mittel zur Bekämpfung der Pflanzenkrankheiten. 1923.
159. Homén, Th., Bodenphysikalische und meteorologische Beobachtungen mit besonderer Berücksichtigung des Nachtfrostphänomens. Berlin 1894.
160. Honigmann, L., Forstverneblungsversuch in den Kassedorfer Tannen bei Eutin. 1930. Prospekt.
161. Hooker, H. D., Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 204, 1920.
162. Hörmann, Zeitschr. d. D. u. Ö. Alpenvereines. 1907.
163. Hörstadius, S., Biol. Gen. 1, 522. 1925.
164. Howard, R. F., Protection of orchards from frost. Better fruit 6, Nr. 5. 1911.
165. Howard, W. L., Protecting orchards against frosts and freezes. Missouri agr. exp. stat. bur. of inform. 35. 1909.
166. Humphreys, W. J., Frost protection. M.W.R. 1914.
167. Hüthwohl, Ph., Eine Neuerung im Weinbau, insbesondere bei der Jungfelderaufzucht. Der deutsche Weinbau. 1929.
168. Ihne, E., Die Frühfröste (Herbstfröste) des Jahres 1918, 21, 22, 27, 28 in Hessen. Hess. landw. Zeitschr.
169. — Die Spätfroste (Frühjahrsfröste) des Jahres 1928 in Hessen. Hess. landw. Zeitschr. Nr. 32. 1928.
170. — Die Spätfroste (Frühjahrsfröste) der Jahre 1924 und 25 und die Frühfröste (Herbstfröste) des Jahres 1924. Hess. landw. Zeitschr. Nr. 35. 1925.

171. Illing, Wenn wir langen Frost haben. Gartenbauwirtschaft 1933.
172. Internationale agrartechnische Rundschau. Der Frostschutz der Obst- und Gemüsegärten in den Vereinigten Staaten. Berlin 1916.
173. Ivanov, S., Trudy prikl. Bot. 27, 283. 1931.
174. Jahn, Die Frostschadenverhütung durch Geländeheizöfen. Rhein. Monatsschrift für Obst-, Garten- und Gemüsebau. 1936.
175. Kaempfert, W., Über die Durchlässigkeit von Strahlungsfilttern. Gerl. Beitr. Geophys. 1929.
176. Kammormann, A., Die Vorausbestimmung des nächtlichen Temperaturminimums. Meteor. Z. 1886.
177. Kellermann, K. F., Suggestions for frost protection. Journ. Washington acad. sci. 3, 53/55. 1913.
178. Keßler, O. W., Fröste und Frostbekämpfung im Weinbau. Mitteilungen der hess. Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau. Oppenheim 1927.
179. — Die Frostabwehr und ihre Organisation. Mitt. über Weinbau, Obstbau und Landwirtschaft Nr. 11, 1927.
180. — Einige praktische Winke zur Verminderung der Frostgefahr im deutschen Weinbau. Der Deutsche Weinbau 1928.
181. — Fröste und Frostbekämpfung im Weinbau. Heft II. Oppenheim 1928. Auch in: Der Deutsche Weinbau 1928.
182. — Ist eine Frostversicherung entsprechend den bestehenden Hagelversicherungen für den deutschen Weinbau angebracht? Hess. Weinbaublatt, Nr. 9. 1928.
183. — Fröste und Frostbekämpfung im Weinbau, Heft III. Oppenheim 1929. Auch in: Der deutsche Weinbau. 1929.
184. — Berichte des Reichsausschusses für Frostabwehr im deutschen Weinbau. 1929. Manuskript.
185. — Der Stand der Frostbekämpfungsversuche im Frühjahr 1930. Der Deutsche Weinbau, Jahrg. 9, Nr. 18.
186. — Über Frostschadenverhütung im Hausgarten.
187. — Die Wasseraufnahme der Pflanzen durch die Blätter und ihre Bedeutung für die Feldberegnung. Die Feldberegnung, II. Folge. Heft 38 d. Schriftenreihe d. RKTL. Berlin 1933.
188. — Winterfrostschäden an immergrünen Pflanzen. Gartenbauwirtschaft 1934.
189. — Die Bekämpfung von Frostschäden. Der Obst- und Gemüsebau, H. 4. 1934.
190. — Beeinflussen wir durch Düngungsmaßnahmen die Frostschäden? Der Deutsche Weinbau 1935.
191. — Frostschadenbekämpfung. Bericht über den Stand des Versuchswesens im Frühjahr 1935. Der Deutsche Weinbau 1935.
192. — Kalidüngung als Frostschutz bei Reben. Wein und Rebe, H. 9, 1935.
193. — Bericht über Zweede, A. K., Der Stand der Frostschadenbekämpfung in den Niederlanden. Der Obst- und Gemüsebau, H. 8. 1935.
194. — Keine Frostschäden im Wein- und Obstbau. Rhein. Monatsschr. für Obst-, Garten- und Gemüsebau 1936.
195. Keßler, Wolfg., Über die inneren Ursachen der Kälteresistenz der Pflanzen. Planta 24, 312. 1935.
196. Keyser, E. M., Damaging Temperatures and their Calculation in Advance by simple arithmetic. Proc. Washington State Horticultural Association 1922. Olympia, Wash.
197. — Calculating temperature extremes in Spokane county, Wash. M.W.R. 1922.
198. Kieranowsky, B., Zur Frage über die Vorausbestimmung des Temperaturminimums. Wilds. Rep. für Meteorologie, Bd. 11, Nr. 6. Petersburg 1887.
199. — Über die Vorausbestimmung des nächtlichen Temperaturminimums. Wilds. Rep. für Meteorologie, Bd. 13, Nr. 10. Petersburg 1890.
200. Kimball, H. H. and B. G. McIntire, Efficiency of smoke screens as a protection from frost. M.W.R. 1923.
201. Kimball, H. H. and F. D. Young, Smudging as a protection from frost. M.W.R. 1920.
202. Kinzel, W., Zeitschr. f. Bot. 3, 772. 1911.
203. Klemm, P., Jahrb. wiss. Bot. 28, 627. 1895.
204. Klinkowski, M., Beobachtungen über Kälteschäden bei verschiedenen Luzerneherkünften. Der Züchter 7, 10. 1935.
205. Knoch, K., Die Eintrittszeiten der Spät- und Frühfröste in Norddeutschland. Veröff. Preuß. Meteorol. Inst., Abhandlungen, Bd. VIII, Nr. 10. 1927.
206. Knoche, W., Archiv der deutschen Seewarte 1905, Nr. 2.
207. Koenig, Die Pyromotoren und selbsttätigen Zündapparate zur Herstellung künstlicher Wolken. Kolmar 1888.
208. Köhler, H., Die Fabrikation des Rußes und der Schwärze. Braunschweig 1912.
209. Kohlrausch, F., Lehrbuch der praktischen Physik. Tabelle 26. 1923.
210. Krauth, J., Einiges zur Bekämpfung von Frostschäden. Karlsruhe.
- 210a. Kremser, Beiträge zur Frage der Kälterückfälle im Mai. Meteor. Z. 1900.
- 210b. Krüglor, F., Nächtliche Wärmehaushaltmessungen an der Oberfläche einer grasbewachsenen Ebene.
211. Kühne, W., Untersuchungen über das Protoplasma und die Kontractilität. Leipzig 1864, 1869.
212. Kunisch, H., Über die tödliche Einwirkung niederer Temperaturen auf die Pflanzen. Diss. Breslau 1880.
213. Landsberg, H. und H. Müller, Versuche zur Frostbekämpfung im Rheingau. Wein und Rebe. 1934.
214. Lang, C., Die Vorausbestimmung des Nachtfrostes. Wetter. 1887.
215. Lanninger, K. L., Berechnungstechnik zur Sicherung der Volksernährung. 1937.
- 215a. Lehmann, P., Kulturtechnische Maßnahmen des Vegetationsklimas. Der Kulturtechniker 1934/1.
216. Lelong, B. M., Culture of the citrus in California. Sacramento 1902.
217. Lemström, On night-frosts and the means of preventing their ravages. Act soc. Scient. Fennicae 20, 3.
218. Leutner, J., R. Schober und W. Hacklaender, Bericht über Versuche mit Geländeheizung in den Städtischen Rebanlagen Wiener-Neustadt. Das Weinland 1935.
219. Lewis, C. J. and F. R. Brown, Preliminary frost fighting studies in the Rogue River Valley, Oregon. Oregon agr. exp. stat. Bull. 110. 1911.
220. Lidforß, B., Lunds Univ. Arsskrift, N. F. 2, 1907.
221. Linke, F., Das Prött-Theorem. Meteor. Z. 1922.
222. — Die Übertemperatur einer frei aufgestellten schwarzen Kugel. Meteor. Z. 1926.
223. Löschnig, J., Frostschäden im Weinbau. Die Landwirtschaft. 1928.

224. Löschnig, J., Frostschäden und Frostschutz in der Landwirtschaft mit besonderer Berücksichtigung des Weinbaues. Wien 1928.
225. Ludwigs, Frühere Ernten durch Anwendung von Frostschuttpapierhauben. Gartenbauwirtschaft, Nr. 15. 1931.
226. Lüstner, G. und E. Molz, Schutz der Weinrebe gegen Frühjahrsfröste. Stuttgart 1909.
227. Mader, Wiener Landw. Zeitung 1879.
228. Maier-Bode, H., Frostabwehr durch Rauch und künstliche Nebel. Zeitschr. angew. Chemie. Nr. 44. 1931.
229. Malone, R. E., Smudging an orchard with native material in Alabama. Alabama Tuskegee agr. exp. stat. Bull. 28. 1915.
230. Marten, W., Über die Kälterückfälle im Juni. Diss. Berlin 1902.
231. Martin, I. H., J. Agricult. Res. 35, 493. 1927.
232. Marvin, Ch. F., Air drainage. M.W.R. 1914.
233. — Historical Note. M.W.R. 1917.
234. Matruchot, L. et M. Molliard, Rev. Gén. Bot. 14, 401. 463, 522. 1902.
235. Matson, H. Cl., Pacific Rural Press, 13. January 1911.
236. Maximow, N. A., Ber. D. bot. Ges. 30, 52, 293, 504. 1912.
237. — Jahrb. wiss. Bot. 53, 327. 1914.
238. Mc Adie, A. G., The climatology of California. M. S. Weather Bur. Bull. 1903.
239. — Frost damage prevented by covers. M.W.R. 1909.
240. — Experiments in frost protection. M.W.R. 1910.
241. — Work of the Weather Bureau in protecting fruit; especially frost protection. M.W.R. 1911.
242. — Straw as protection against frost. M.W.R. 1911.
243. — Frost cartridges. M.W.R. 1911.
244. — Protection against frost — frost candles. M.W.R. 1911.
245. — Protecting the California orange crop from frost. M.W.R. 1911.
246. — Covering almonds trees for frost protection. M.W.R. 1912.
247. — New heater and vaporizer for frost protection. M.W.R. 1912.
248. — Studies in frost protection — effect of mixing the air. M.W.R. 1912.
249. — Report on recent destructive frosts in California. M.W.R. 1913.
250. Mead, Th. L., A frost proof orange orchard. Country life in America. 1905.
251. Medicus, Obstgarten 1880. (Siehe auch Just's Bot. Jahresbericht 1880.)
252. Merrill, G. E., The freeze and frost fighting. California cultivator 40. 1913.
253. Meyer, A. G., The radiation and absorption of heat by leaves. Amer. J. Sc. ser. XLV. 1893.
254. Meyer, B. S., Amer. Ill. Bot. 15, 449. 1928.
255. — Bot. Gaz. 94, 297. 1932.
256. Meyer, L., Orchard heating in Grand Valley, Colorado. Better fruit 5, No. 4. 1910.
257. Mez, K., Neue Untersuchungen über das Erfrieren eisbeständiger Pflanzen. Flora 94, 89. 1905.
258. Mitchell, A. J., Effects of low temperatures on citrus trees and fruits. M.W.R. 1910.
259. — Frost and frost protection in Florida. M.W.R. 1914.
260. Möbius, M., Ber. D. Bot. Ges. 25, 67. 1907.
261. Moder, A., Protopl. 16, 1. 1932.
262. Molisch, H., Untersuchungen über das Erfrieren der Pflanzen. Jena, Fischer 1897.
263. — Pflanzenphysiologie als Theorie der Gärtnerei. Jena 1921.
264. Moser, L., Mit Flugzeugpropeller gegen Maifröste. Das Weinland 1934.
265. Mudra, A., Planta 18, 435. 1932.
266. Mueller, E., Abwehr von Frostgefahr in Weinbergen durch Elektrowärme. Elektrowärme, H. 8. 1935.
267. Müller-Thurgau, H., Landw. Jahrb. 9, 133. 1880.
268. — Landw. Jahrb. 11, 751. 1882.
269. — Landw. Jahrb. 15, 453. 1886.
270. — Schweizer Z. Obst- u. Weinbau. 1894.
271. Nägeli, C., Beitr. wiss. Bot. II, 77. 1860.
272. Némec, B., Jahrb. wiss. Bot. 36, 80. 1901.
273. Neßler, Wochenbl. Landw. Vereins Großh. Baden. 1876.
274. Newton, R., Univ. of Alberta, Coll. of Agric. Res. Bull. 1, 1. 1923.
275. — Ill. Agr. Sci. 14, II, 178. 1924.
276. Nichols, E. S., Predicting minimum temperatures in Grand Valley, Col. M.W.R. 1918.
277. — Notes on damage to fruit by low temperatures, prediction of minimum temperatures. M.W.R. Supplement 16. 1920.
278. — Notes on formulas for use in forecasting minimum temperatures. M.W.R. 1926.
279. Nieriker, Bericht über ein im Frühjahr 1893 im Wettinger Rebberg durchgeführtes Experiment. Baden 1893.
280. NN., Betreff: Die Sicherung der Weinberge gegen die Nachfröste im Frühjahr durch Rauchfeuer. Regierungsblatt für die Kur-bayerischen Fürstentümer in Franken. 1803.
281. NN., Verordnung der Churfürstlichen Landesdirektion. Würzburger Intelligenzblatt. 1804.
282. NN., Der Elektrotechniker. 1884.
283. NN., Weinbau und Weinhandel. 1892.
284. NN., Feuille vinicole de la Gironde. 1902.
285. NN., Le vigneron champenois. Revue de viticulture.
286. NN., M.W.R. May 1910.
287. NN., M.W.R. 1919, S. 849.
288. NN., Frostbekämpfungsversuch an der Mosel. Der Deutsche Weinbau. 1929.

289. NN., Neue Frostbekämpfungsversuche mit Braunkohlebriketts an der Saar. Der Deutsche Weinbau. 1929.
290. NN., Fagonit-Weinbergbriketts. Der Deutsche Weinbau 1929.
291. NN., Interessante Frostschutzverordnung aus dem Jahre 1803. Der Deutsche Weinbau. 1929.
292. NN., Motor-Driven Blower. New enemy to „Jack“ frost. Electrical World 1932.
293. Noak, Jahrb. wiss. Bot. 51, 593. 1912.
294. Öffentliche Wetterdienststelle Hamburg. Kleinklimatologische Untersuchungen und Nachtfrostschutz im Unterelbegebiet. Zur Sitzung des Sonderausschusses f. Klima und Wetterkunde. D.L.G. 1. Februar 1933 in Berlin.
295. O'Gara, P. J., Farmers Bulletin 401. U.S. Dept. of Agriculture. Washington 1910.
296. — Frost prevention work in the Roger River Valley, Oreg., during the spring of 1910. M.W.R. 110.
297. — Frost injury prevention methods in Rogue River Valley. Better fruit 6, No. 5. 1911.
298. — A comparative test of fuel oils and appliances used in orchard heating to prevent frost injury. Off. Pathologist local U.S. Weather. Bur. stat. for Rogue River Valley. Bull. 6. 1912.
299. Paddock, W. and O. B. Whipple, Fruit growing in arid regions. New York 1910.
300. Pantanelli, E., Atti r. Acad. Lincei, Ser. 5, 27/I, 126, 148. 1918.
301. — Atti r. Accad. Lincei, Ser. 5, 28/I, 205. 1919.
302. — Atti r. Accad. Lincei, Ser. 5, 29, 66. 1920.
303. Pauck, P., Witterungsschutz, frühere Ernten . . . durch Gebrauch von Papierhauben. Märkischer Landwirt, Nr. 4, 1932.
304. Payne, N. M., Ecology 11, 500. 1930.
305. Pfeffer, W., Pflanzenphysiologie. Leipzig 1901—04.
306. Pickel, Die diesjährigen Wetterbeobachtungen im Früh- und Spätjahre in Bezug auf die allenfalls nötige Räucherung und Schützung der Weinberge gegen den verheerenden Frost. Bamberg und Würzburg 1804.
307. — Wochenbl. d. landw. Vereines in Bayern. 1816.
308. Pissarjewski, L., Z. physik. Chem. 63, 457. 1908.
309. Poeteren, van, N., Proefnemingen met rook, ter bescherming van gewassen tegen nachtvorsten. Wageningen 1920.
310. Pollack, H., Über die räumliche Entwicklung der Spät- und Frühfröste in Norddeutschland in Abhängigkeit von der Wetterlage. Diss. Berlin 1930.
311. Popp, F., Fagonit, Weinberg-Briketts. Bernkastel 1929.
312. Pütter, A., In Bethes Hdb. d. norm. und path. Physiol. I, 322. 1927.
313. Rahm, P. G., Verh. D. Zool. Ges. 106. 1924.
314. Rood, W. G., Practical hint in forecasting minimum temperatures. M.W.R. 1917.
315. Reeder, G., M.W.R., May 1910.
- 315a. Reichskuratorium für Technik in der Landwirtschaft. Tätigkeitsberichte 1932—37.
316. Reichwein, Versuche mit „Hinsbergs Frühkultur“. Ober-Rosbach 1927.
317. Rein, R., Untersuchungen über den Kältetod der Pflanzen. Diss. Halle 1908. Auch in Z. Naturwiss. 80, 1. 1908.
318. Rixford, G. P., Preserving mamme caprifigs from frost. M.W.R. 1912.
319. Robin, Revue de viticulture. 1903.
- 319a. Rödiger, G., Der europäische Monsun. Veröff. Geoph. Inst. Leipzig, 2. Serie, Bd. IV, 3, 1929.
320. Roemer, Rudolf und Lueg, Fortschr. Landw. 3. 1928.
321. Rosa, J. T., Aroc. Am. Soc. Hort. Sci. 1920, 207. 1921.
322. — Missouri Agr. Exp. Stat. Res. Bull. 48. 1921.
323. Rothe, G., Die Wirkung des Frostes in der Nacht vom 1. zum 2. Mai 1935 auf die Kirschenernte im Alten Lande. Zeitschr. f. Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, II. 3. 1937.
324. Sachs, J., Landw. Versuchsstat. 2, 167. 1860.
325. — Flora N. R. 22, 497. 1864.
326. — Ges. Abh. Pflanzenphysiologie I. Leipzig 1892.
327. Schaefer, C. und F. Matossi, Das ultrarote Spektrum. Berlin 1930.
328. Schaffnit, E., Z. allg. Physiol. 12, 323. 1911.
329. Schaffnit, E. und A. F. Wilhelm, Phytop. Z. 5, 505. 1933.
330. Schädler, A., A. Angström, Studien über das Frostproblem. Ref. in Meteor. Z. 1921.
331. Schellenberg, A., Die Frühjahrs- und Winterfrostschäden in den zürcherischen Rebbergen der Jahre 1926—29. Landw. Jahrb. Schweiz. 1930.
332. — Erfahrungen mit der Verwendung der Frostschirme im Kanton Zürich anlässlich des Spätfrostes vom 23./24. April 1933. Schweiz. Z. Obst- und Weinbau. Wädenswil 1934.
333. — Der Frostschirm hat sich im Kanton Zürich bewährt. Schweiz. Z. 1934.
334. — Frostschäden in zürcherischen Weinbergen im Herbst 1936. Schweizer Z. Obst- und Weinbau. Wädenswil 1937.
335. Schöu, Mein Winzerbuch. Reichsnährstandsverlag 1936.
336. Schlenz, P., Frostschäden im Obstbau. Wiesbaden, Bechtold 1935.
337. Schmidt, W., Studien zum nächtlichen Temperaturgang. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, math.-naturwiss. Kl., 118, Bd. 293. 1909.
338. — J. W. Smith und andere. Vorhersage von Minimumtemperaturen aus Feuchtigkeitsangaben. Ref. in Meteor. Z. 1922.
339. — Anders Angström, Studien zum Frostproblem, I und II. Ref. in Meteor. Z. 1922.
340. — Bemerkungen zu A. Angströms Bemerkungen. Meteor. Z. 1922.
341. — T. Bedford Franklin, Über die nächtliche Abkühlung mit besonderer Berücksichtigung der Spätfroste. Ref. in Meteor. Z. 1923.
342. — Meteorologische Feldversuche über Frostabwehrmittel. Jahrb. Zentralanstalt Met. u. Geodyn. Wien, Anhang 1927, Publ. Nr. 135. Wien 1929.
343. — Die Temperatur unter Frostschirmen. Die Landwirtschaft 1929.
- 343a. — Die tiefsten Minimumtemperaturen in Mitteleuropa. Naturwissensch. 18, 17, 1.

344. Schomerus, J., Die Bodenbedeckung, ein wertvolles Kulturverfahren. 1934.
- 344a. Schonhopp, G., „Der Umgang mit Beregnungsanlagen.“ Die Feldberegnung. Zweite Folge, II. 38 der RKTL.-Schriften, Parey-Berlin 1933.
345. Schoonover, W. R. and R. W. Hodgson, Orchard heating in California. University of California, College of Agriculture. Agr. exp. stat. Berkeley, California. Bull. No. 398. 1925.
346. Schroeder, P., Über die vertikale Verteilung der Temperaturschwankungen um den Frostpunkt in Mitteleuropa. Leipzig, Frankenstein und Wagner 1912.
347. Schubert, J., Über Maifröste in Eberswalde und deren Vorhersage mit Hilfe des Psychrometers. Z. Forst- u. Jagdw. 1915.
348. Schulte, Weinbau und Weinhandel. 1901.
349. Schumacher, Sitzungsber. k. k. Akad. Wiss. Wien 70 (I), 157. 1874.
350. Schwalbe, G., Über die Temperaturminima in 5 cm über dem Erdboden. Meteor. Z. 1922.
351. Sellschop, J. P. F. and S. C. Salmon, III. Agric. Res. 37, 315. 1928.
352. Seufferheld, Weinlaube 1905.
353. Shelford, V. E., Illin. State Nat. Hist. Survey. Bull. 16, 307. 1927.
354. Shell Company Ltd., Prevention of damage by frost. 1934.
355. Slataper, D. L., Value of windbreaks and smoke. Gulf coast citrus fruit grower, 1, No. 6. 1911.
356. Smith, J. W., Frost warnings and orchard heating in Ohio. M.W.R. 1914.
357. — Predicting minimum temperatures. M.W.R. 1917 und 1919.
358. — Agricultural Meteorology. The effect of weather on crops. 1920.
359. — M.W.R. 1922.
360. Smith, J. W. and others. Predicting minimum temperatures from hygrometric Data. M.W.R. Supplement 16. 1920.
361. Sorauer, P., Über das Erfrieren der Gewächse. Pflanzenkrankheiten. Berlin 1874.
362. — Gesamtübersicht über die Ergebnisse der Umfrage über die Frostschäden an den Wintersaaten des Jahres 1901. Arbeit 62.
363. — Die mechanischen Wirkungen des Frostes. Ber. D. Bot. Ges., H. 1. 1906.
364. — Altes und Neues über die mechanischen Frostbeschädigungen. Z. Pflanzenkrankheiten, H. 2. 1914.
365. — Hdb. Pflanzenkrankheiten, I. Bd. Berlin 1924.
366. — Ist es wahr, daß unsere Obstbäume jetzt mehr von Frostschäden leiden als früher?
367. Sprague, M., Frosts and frost protection in Texas. M.W.R. 1914.
368. Steglich, Sitzungsber. u. Abhandl. d. „Flora“. 1896—1897.
369. Stevens, N. E., Amer. Ill. Bot. 4, 1. 1917.
370. Steward, F. C., Protopl. 15, 29. 1932.
371. Stiles, W., Protopl. 9, 459. 1930.
372. Stoklasa, J., Die Beschädigungen der Vegetation durch Rauchgase und Fabrikexhalationen. Berlin und Wien 1923.
373. — Die Erhöhung d. physiol. Verbrennung b. Vorhandensein v. Kalium i. d. Zelle u. Verhinderung d. Erfrierens d. Pflanze. Die Ernährung der Pflanze, H. 2. 1936.
374. Strasburger, E., Fr. Noll, H. Schenk, A. F. W. Schimper, Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Jena 1928.
375. Stummer, A., Schutz der Weingärten gegen Frühjahrsfröste. Wein und Rebe 1929.
376. Sullivan, R. H., Smudge pots for the prevention of frosts. M.W.R. 1910.
377. Thalheim, Der Kulturtechniker, 35, 388. 1932.
378. Thiessen, A. H., Smudge pot test at Salt Lake City. M.W.R. 1909.
379. — Orchard heating. M.W.R. 1911.
380. — Protection from frost in Utah. M.W.R. 1914.
381. Trabert, W., Die Bekämpfung der Frostgefahr. Meteor. Z. 1899.
382. Treibmann, W., Die Frostbekämpfung mit Ölofenheizung nach dem Verfahren Thielmann. Der Deutsche Weinbau 1931.
383. Treichel, O., Verneblungsanlagen für Friedenzwecke. Gasschutz und Luftschutz. 1933.
384. Tumanow, J. J. und I. N. Borodin, Phytopath. Z. 1, 575. 1930.
385. University of California, Agr. exp. stat., Praktische Winke für die Farmer, No. 113. 1915 (amerikanisch).
386. Untersuchungen (Kleinklimatologische) und Nachtfrostschutz im Unterelbegebiet. Hamburg 1932. Vgl. 294.
387. Voigtlaender, Cohns Beitr. Biol. 9, 359. 1909.
388. Voorhees, J. F., Notes on frost protection in the vicinity of Knoxville, Tenn. M.W.R. 1914.
389. Voß, R., Bericht über einen Frostschutzversuch mit Räuchermittel Höchst 1928. Manuskript bei den Akten der Provinzial-Lehranstalt in Trier.
390. Walker, T. J., An orange man's dream. California cultivator 1914.
391. Wallmann, Jahrb. Österr. Alpenvereins, Bd. IV. 1870.
392. Walter, H., Die Winterfrostschäden an unsern immergrünen Pflanzen während der Kälteperiode Januar bis März 1929 und ihre Ursachen. Ber. D. Bot. Ges. 1929.
393. — Die osmotischen Werte und die Kälteschäden unserer wintergrünen Pflanzen während der Winterperiode 1929. Ber. D. Bot. Ges., H. 5. 1929.
394. Walton, W. M., Orchard heating in Indiana. M.W.R. 1911.
395. Weber, F., Protopl. 15, 517. 1932.
396. Weber, F. und G. Weber, Ber. D. Bot. Ges. 34, 836. 1916.
397. Weitz, M., Chilisalpeter als Schutzmittel gegen Frostgefahr, Pflanzenschädlinge und Pilzkrankheiten. (Weitz: Der Chilisalpeter als Düngemittel. Um 1905.)
398. Weldon, G., Apple growing in California. California State hom. Hort. Sacramento. 1914.
399. Wells, Versuch über den Tau und einige damit verbundene Erscheinungen. Zürich 1821.

400. Wells, E. L., Report on Fruit-Frost-Work in Southern Idaho. Special report on file in Division of Agricultural Meteorology, Wash. 1910.
401. — Frost fighting in the Boise valley. M.W.R. 1910.
402. Whitten, J. Ch., Das Verhältnis der Farbe zur Tötung von Pfirsichknospen durch den Winterfrost. Diss. Halle 1902.
403. Wiesner, J., Über Frostlaubfall nebst Bemerkungen über die Mechanik der Blattablösung. Ber. D. Bot. Ges., 23. 1905.
404. Wilhelm, A. F., Experimentelle Untersuchungen über die Kälteresistenz von Reben und Obstgehölzen. Die Gartenbauwissenschaft, 8, H. 1 sowie Berlin, Springer 1933.
405. Winkler, A., Über den Einfluß der Außenbedingungen auf die Kälteresistenz ausdauernder Gewächse. Diss. Leipzig 1913.
406. Whipple, O. W., Protection of fruit crops from frost injury. Better fruit, 5, No. 4. 1910.
407. Wolf, H., Die Behandlung der frostbeschädigten Reben. Der Deutsche Weinbau 1928.
408. — Die Frühjahrsarbeiten in Weinbau unter Berücksichtigung der Frostgefahr. Der deutsche Weinbau 1929.
409. Wollaber, A. B., M.W.R., July 1910.
410. — The severe cold of december 25—26, 1911, in the citrus districts of southern California, and methods adopted for fruit protection. M.W.R. 1912.
411. Wood, W., Cost and result of frost firing. California cultivator 40. 1913.
412. Woodbridge, T. R., Smudging costs. Pacific rural press 85. 1913.
413. Woodbury, C. G. and J. W. Wellington, Orchard heating. Indiana agr. exp. stat. Bull. 154. 1911.
414. Young, F. D., Report on the Frost Warning Service in the Rogue River Valley, Oreg., for the Spring of 1917. Special report on file in Division of Agricultural Meteorology, Wash. D. C.
415. — Influence of cover crops on orchard temperatures. M.W.R. 1922.
416. — Notes on the 1922 freeze in southern California. M.W.R. 1923.
417. — Substitution of fruit temperatures for air temperatures in regulating orchard heating for oranges. M.W.R. 1924.
418. — Development and present status of frost-fighting devices. M.W.R. 1925.
419. — Value of smudge-pots in preventing frost in cranberry bogs. M.W.R. 1925.
420. — A further study of the relation between cover crops and orchard temperatures. M.W.R. 1925.
421. — Orchard Heating Statistics for Southern California. The California Citrograph, No. 11. 1927.
422. — Frost and the prevention of frost damage. U.S. Department of Agriculture. Farmers Bulletin, No. 1588. Washington 1929.
423. Young, F. D. and C. C. Cate, Damaging temperatures and orchard heating in the Rogue river valley, Oregon. M.W.R. 1923.
424. Zacharowa, T. M., Jahrb. wiss. Bot. 65, 61, 1925.
425. Zahn, H., Untersuchungen über Spätfrostschäden an der Rebe. Berlin, Springer um 1928.
426. — Untersuchungen über Spätfrostschäden an der Rebe. Die Gartenbauwissenschaft 6, H. 4.
427. — Über die Kälteverstandsfähigkeit unserer Obstsorten. Der Obst- und Gemüsebau, 80, H. 4. 1934.
428. Ziegler, A., Untersuchung der Nachtfrostprognose nach Kammermann, Salle 1903.
429. Zillig und Niemeyer, Weinbau und Kellerwirtschaft, 8, 1929.
430. Zweifler, Mitteilungen über Weinbau und Kellerwirtschaft. 1895.
431. — Mitteilungen über Weinbau und Kellerwirtschaft. 1899.
-

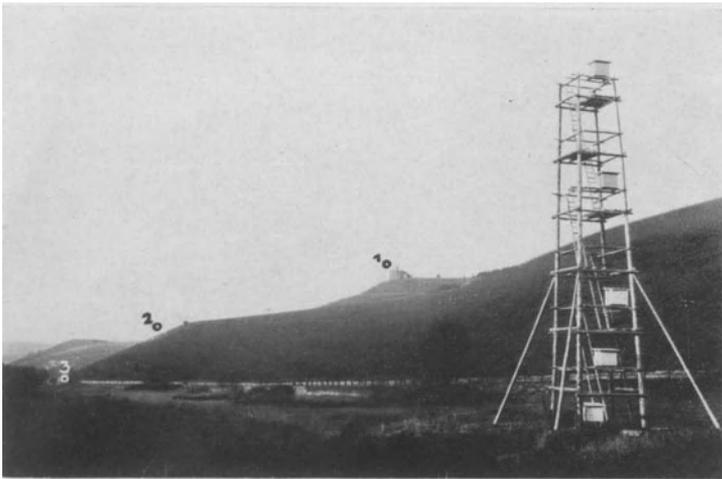


Abb. 157. Aufstellung der Hütten mit Thermohygrographen im Avelertal bei Trier.

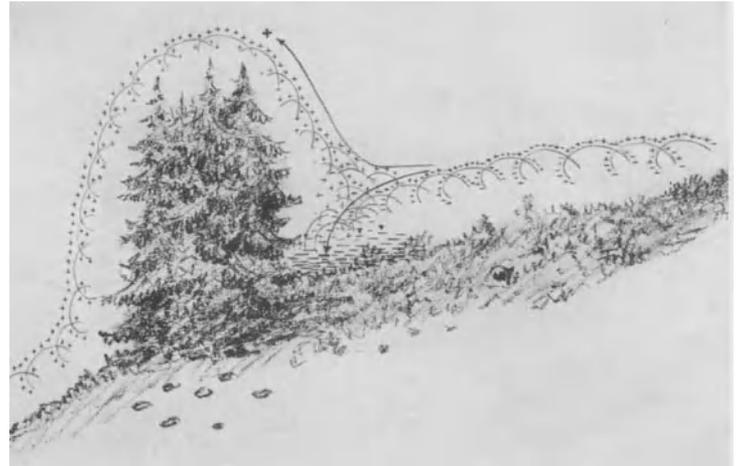


Abb. 158. Wirkungsweise der Windschutzstreifen.

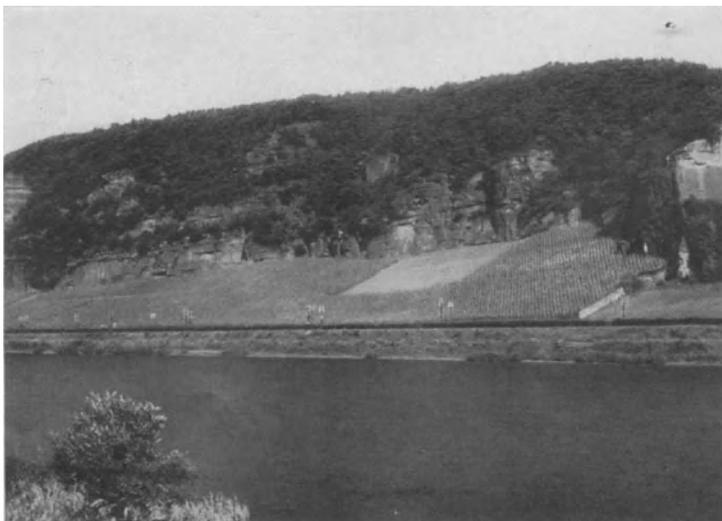


Abb. 159. Frostfreie Lage (Augenscheiner bei Trier.)



Abb. 160. Frostlage (Staatsweingut Avelsbach bei Trier.)

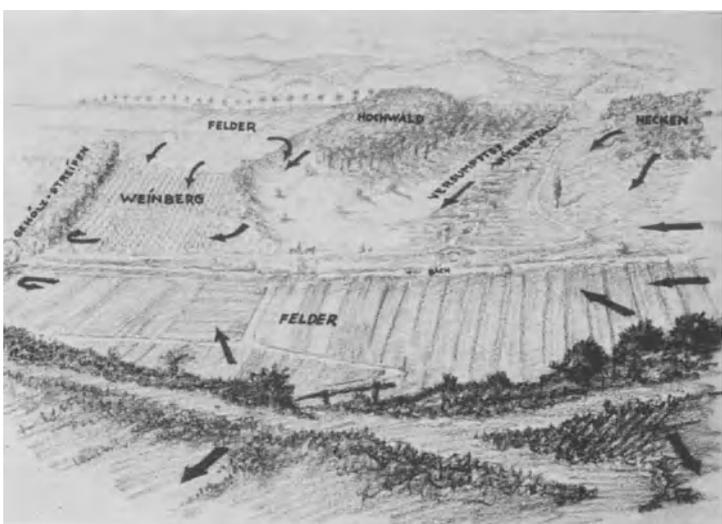


Abb. 161. Idealgelände vor natürlicher Klimaverbesserung.



Abb. 162. Idealgelände nach natürlicher Klimaverbesserung.



Abb. 163. Blankenhornsberg. Riesling, gepfl. 1878, phot. 1929.  
Links Volldüngung mit 50%igem Kalisalz, rechts ungedüngt.



Abb. 164. Blankenhornsberg. Links Volldüngung mit 50%igem Kalisalz, rechts Phosphorsäure und Stickstoffdüngung ohne Kali.



Abb. 165. Wachenheim. Sylvaner, gepfl. 1925, phot. 1929. Im Vordergrund Volldünger mit 50%igem Kalidüngersalz, im Hintergrund ohne Kali.



Abb. 166. Wachenheim. Im Vordergrund ohne Kali, hinter Tafel NPK Volldüngung mit schwefelsaurem Kali.

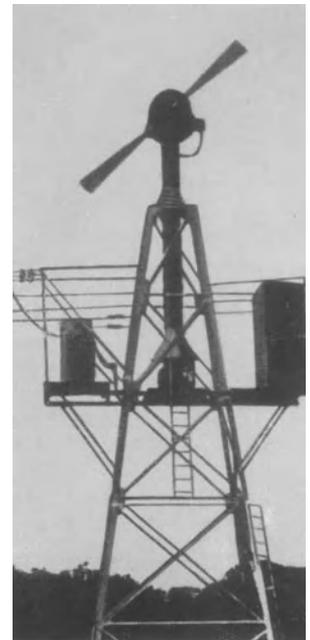


Abb. 167. Aladin-Gartenprotector.

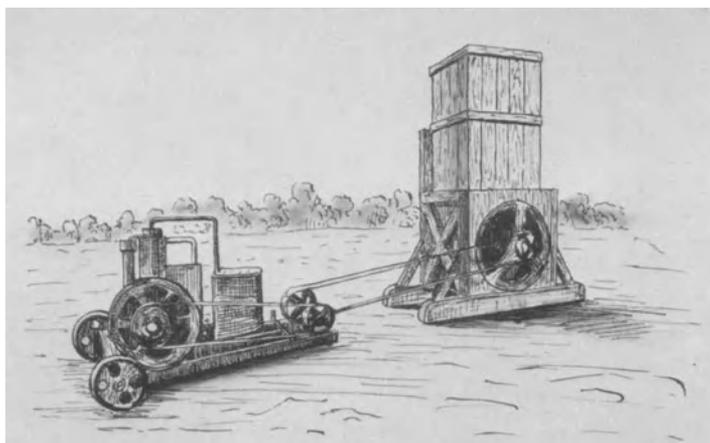


Abb. 168. Aufstellung eines Gebläses zur Luftdurchmischung nach Löschnig.

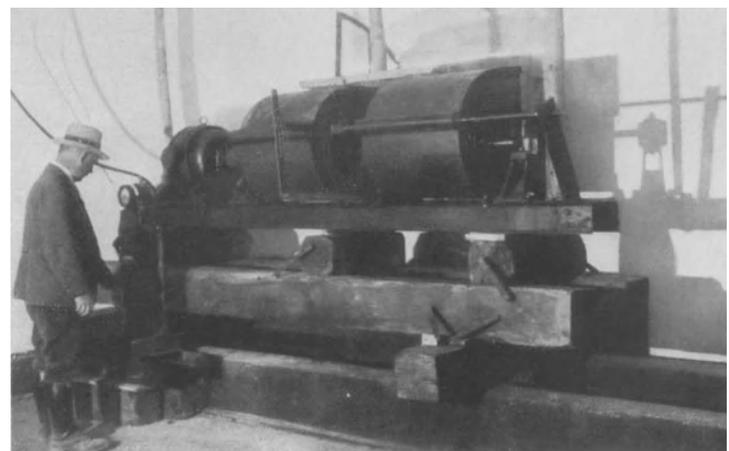


Abb. 169. Elektrisch betriebenes Gebläse zur Luftdurchmischung. Trier 1936.

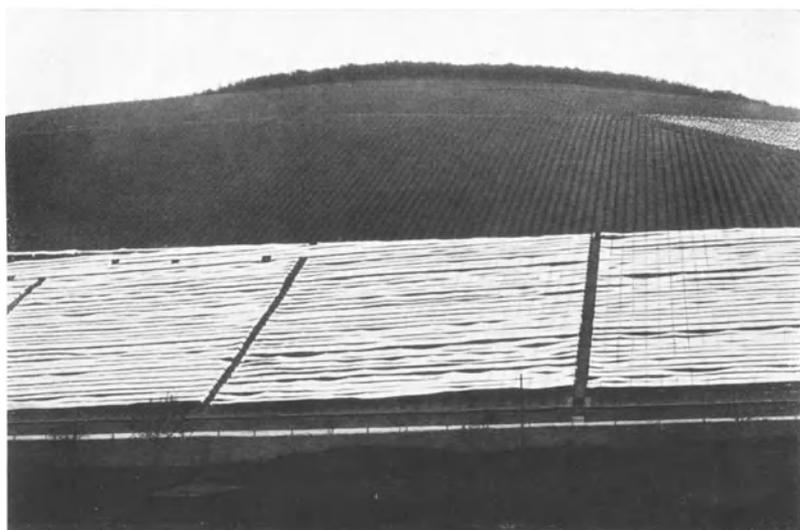


Abb. 170. Überspannung mit Nesseltüchern nach Hoopp.  
Trier-Avelsbach um 1910. Rechts oben Einzelschutz.



Abb. 171. Gewächshaus aus Bizella von Calle & Co., Wiesbaden.  
Oppenheim 1929.



Abb. 172. Versuchsfeld Heiligenborn-Serrig.  
Links horizontale, rechts einseitige Bedeckung von Osten.

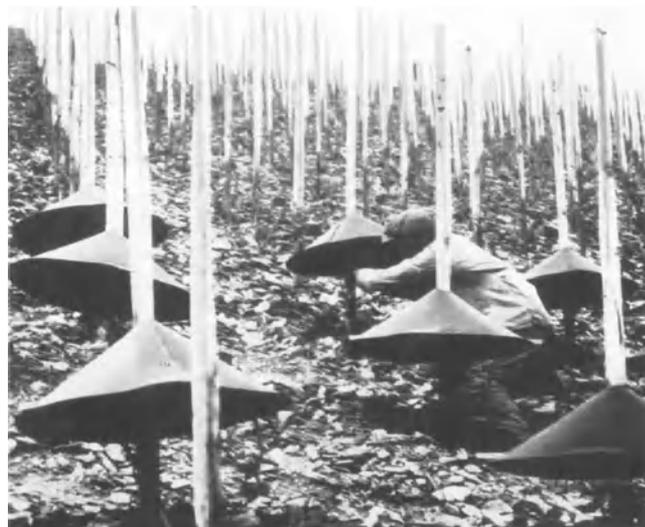


Abb. 173. Versuchsfeld Vogelsang-Serrig.  
Anbringen der Schirme „Winzerheil“.



Abb. 174. Versuchsfeld Oranienstein.

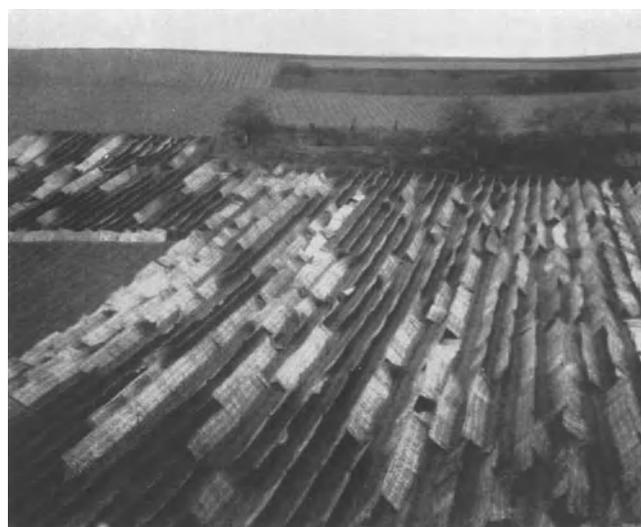


Abb. 175. Durch Wind umgeworfene Strohmaten. Ruwertal.



Abb. 176. Abbrennen einer Büchse mit Zinknebel.

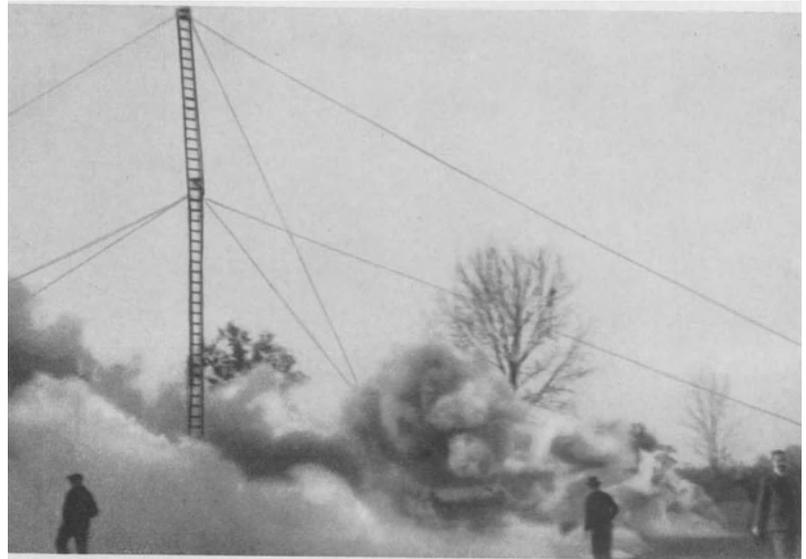


Abb. 177. Ausbreitung von Zinknebel.



Abb. 178. Ausbreitung von Phosphornebel.



Abb. 179. Nebelsprühapparat Minimax.

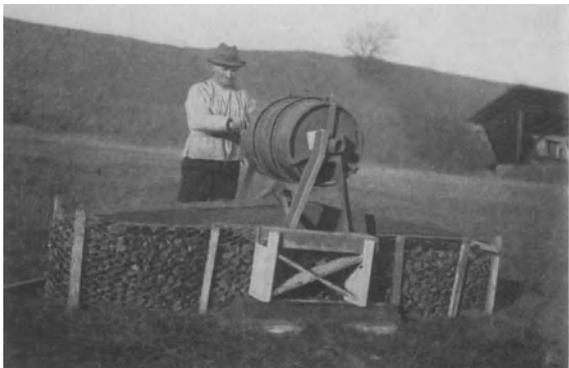


Abb. 180a. Erste Ausführung der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft. Säurefaß, Eisenrinne und gebrannter Kalk.



Abb. 180b. Die Säure tropft auf den Kalk.



Abb. 181. Ausbreitung des Säurenebels, neueres Verfahren der Hanseatischen Apparatebaugesellschaft.



Abb. 182. Luftbild der Versuchsfelder Saarstein.  
Weiße Punkte: Hauptstationen. [Freigegeben durch R.L.M. Nr. 2325,371.]



Abb. 183. Blick von der Saar in das Saarsteiner Tälchen.

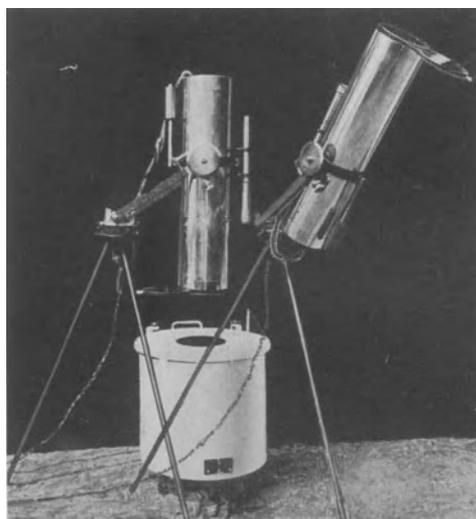


Abb. 184. Ferneffektivaktinometer Dubois.  
Links in Eichstellung, rechts in Meßstellung.

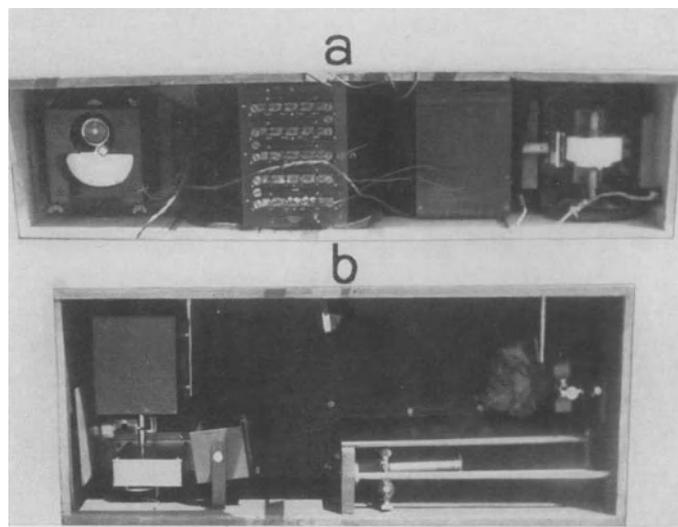


Abb. 185. Zusatzapparatur zum Ferneffektivaktinometer.  
a) Brückenschaltung zur Temperaturbestimmung — b) Galvanometer mit fotogr. Registriereinrichtung.

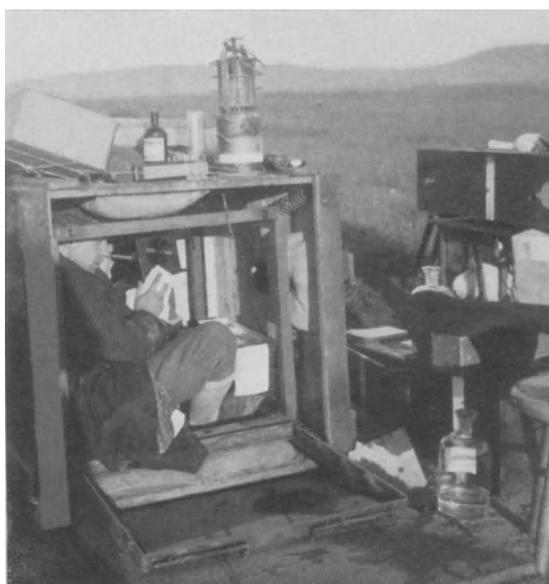


Abb. 186. Dunkelkammer für Feldgebrauch.



Abb. 187. Hauptbeobachtungsstelle  
auf dem Versuchsfeld bei Föhren.

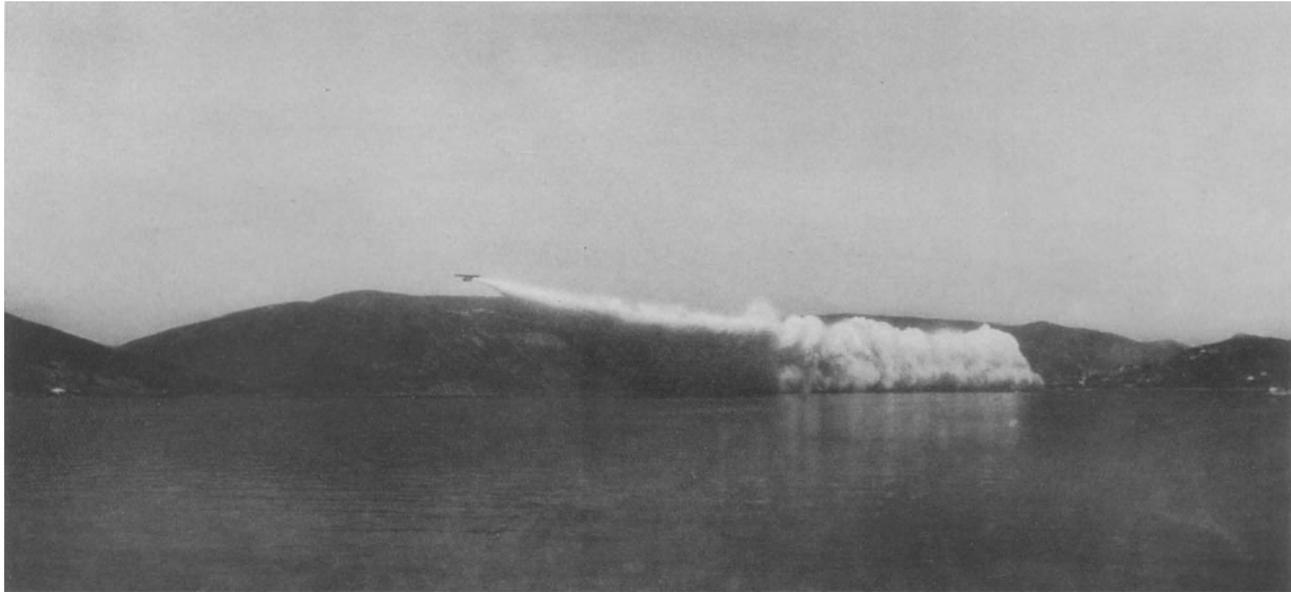


Abb. 188. Vernebelung durch Flugzeuge.

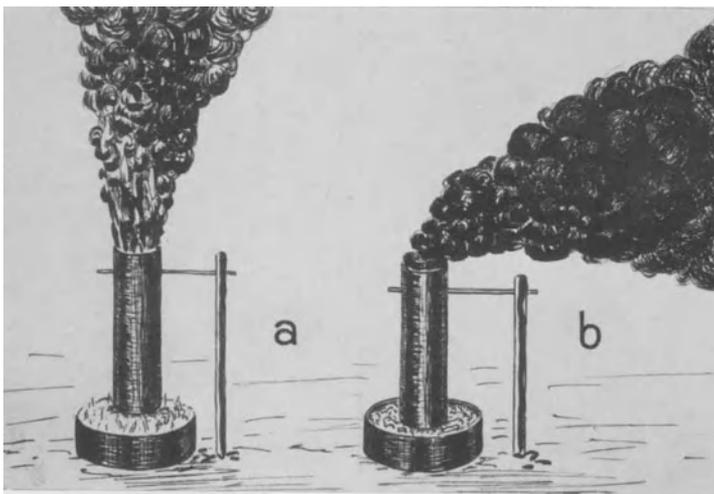


Abb. 189. Räucherrohr Oppenheim, verwendet 1927 und 1928.  
a Rohr zu hoch (zu wenig Ruß), b Rohr hängt richtig.



Abb. 190. Räucherapparat Maurer. Links außer Tätigkeit — Mitte auf Rauchwirkung — rechts auf Heizung eingestellt. (Ahrweiler 1930).



Abb. 191. Transportabler Räucherofen aus Rheinessen.

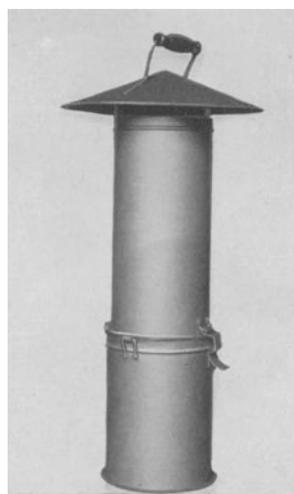
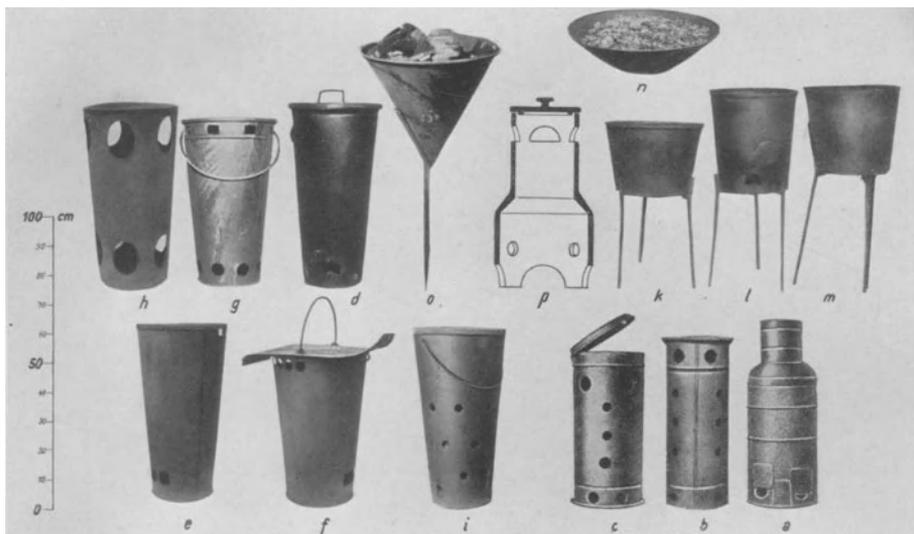


Abb. 192. Räucherofen. Waas, Geisenheim.



Abb. 193. Ahrweiler 1930. An der Bunten Kuh sind noch 40 der 400 Apparate in Tätigkeit.



Tafel 194. Heizofen-Typen für Kohle- und Brikettfeuerung. a—c Amerikanische. d—e Erstlingsöfen in Deutschland. — f Versuchsofen des Rhein.-Westf. Braunkohlensyndikats. — g Normalofen „Monos“. — h Ofen für grobes Brennmaterial. — i Versuchsofen der Preuß. Weinbaudomänen. — k—m Öfen auf Gestell, z. T. mit Rost. — n Pfanne für Naphtalin oder Anthrazen. — o Holzkohleofen. — p Längsschnitt durch einen Steingut-Heizofen (Avelsbach 3. 5. 1937).



Abb. 195. Offen ausgelegte Braunkohlebriketts, unmittelbar nach dem Anzünden im Weinberg.



Abb. 197. Versuchsfeld am Falkensteinerhof. (Bei Trier.)

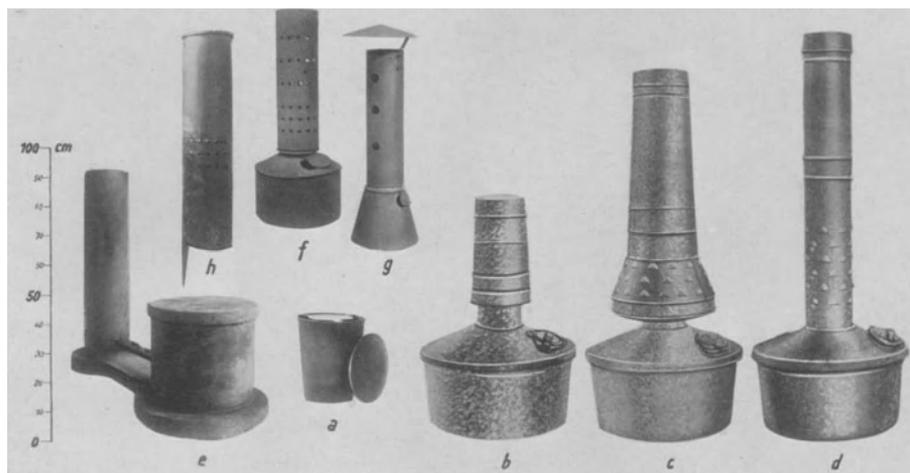


Abb. 196. Ölheizertypen. a Amerikanischer Schmalzeimerofen mit „Spinne“. — b—d Destillierende Ölheizertypen mit Schornstein. — e Nichtdestillierender Ölheizertyp. — f Deutscher Ölheizertyp, System „Maurer“. — g System „Thielmann“. — h Einfacher Heizertyp für Öl und Naphtalin.



Abb. 198. Aufstellung der Brikettheizofen im Weinberg (kurz nach dem Anzünden).

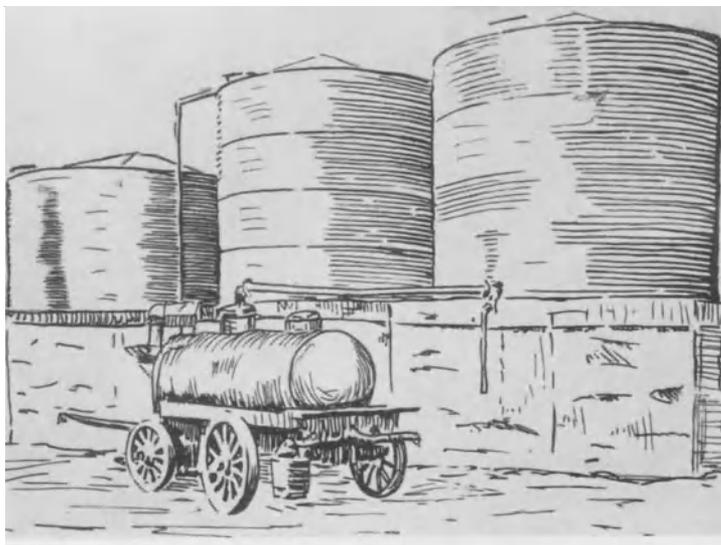


Abb. 199. Öltanks der kalifornischen Obstzüchter.

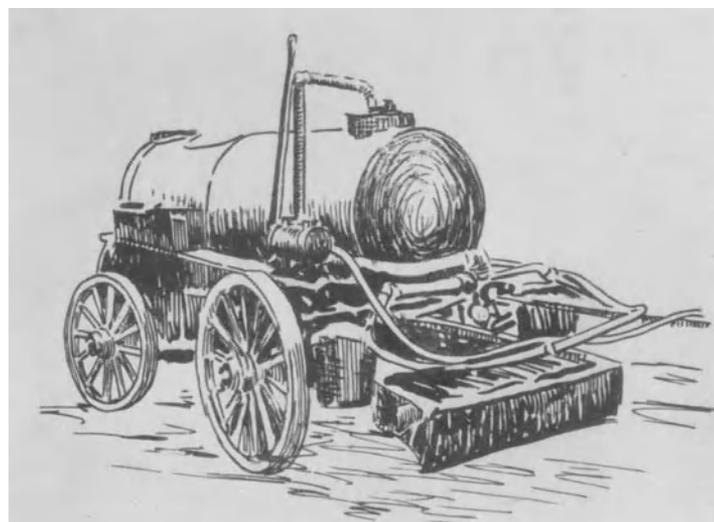


Abb. 200. Amerikanischer Tankwagen zur Füllung der Ölheizertypen im Gelände.



Abb. 201. Schwenkregner „Hydor“ in Tätigkeit.



Abb. 202. Regenkanone von Siemens in Tätigkeit.



Abb. 203. Meßstelle mit zwei Glasthermometern, einem elektrischen Widerstandsthermometer und einer Thermobatterie.



Abb. 204. Eichvorrichtung für Thermobatterien.



Abb. 205. Schutzschrank mit Registriergeräten.



Abb. 206. Eiszapfenbildung an Erziehungs- und Leitungsdrähten (Mai 1934).



Abb. 207. Blick auf die Innenstation unmittelbar nach der Beregnung.



Abb. 208. Versumpfung des Kartoffelfeldes zur Zeit der Dämmerung während der Beregnung.

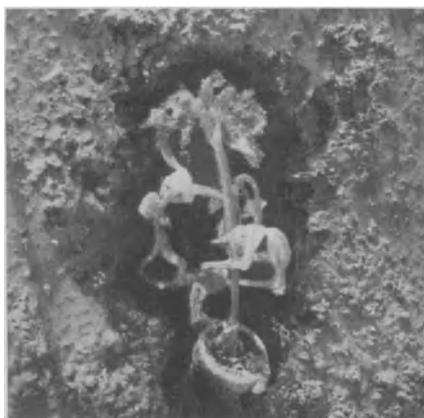


Abb. 209. Tomaten-Topfpflanze mit Eispanzer nach Beregnung.



Abb. 210. Schwarzkuugel nach Linke zur Registrierung der Gesamtstrahlung, Blankkugel nach Dubois zur Registrierung geringer Windstärken.



Abb. 211. Erfrorene Kartoffelblätter über Ackerfurchen.

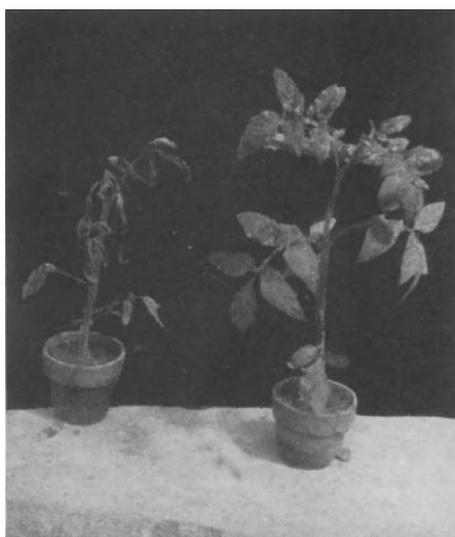


Abb. 212. Tomatenpflanzen nach dem Auftauen. Links erfroren (unberegnet), rechts gesund (beregnet).

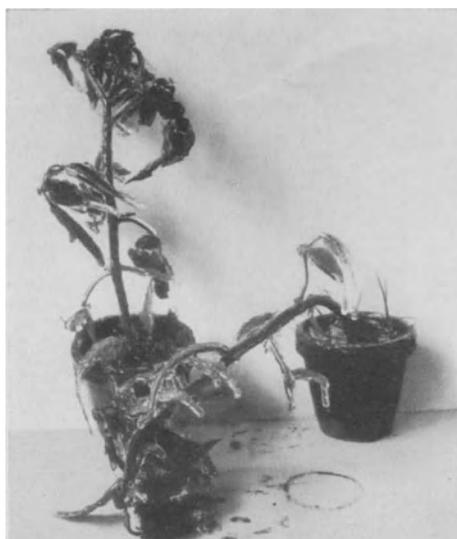


Abb. 213. Zwei Tomatenpflanzen mit Eispanzer unmittelbar nach der Beregnung.



Abb. 214. Dieselben Pflanzen wie in Abb. 213 nach Auftauen des Eises.

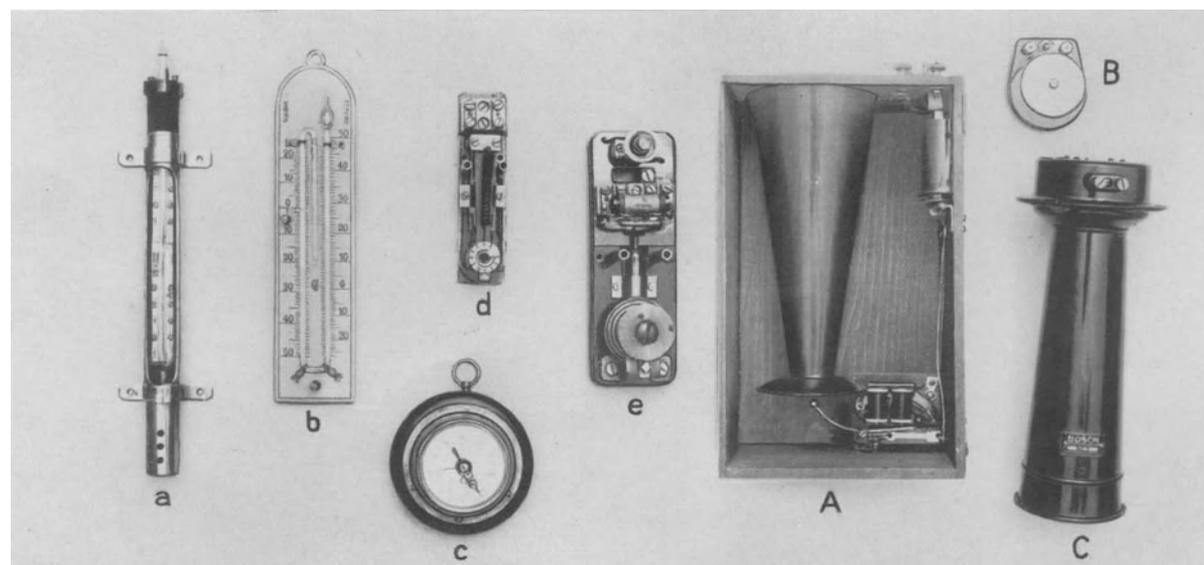


Abb. 215. Frostanzeigergerät. I. Geber: a Voltex-Thermometer mit variabler Einstellung. — b Maximum- und Minimumthermometer nach Six mit konstanter Einstellung ( $+1^{\circ}\text{C}$ ). — c Therminde mit beweglichen Kontakten. — d Flächenregler von Siemens & Halske. — e Raumregler von Siemens & Halske. — II. Empfänger: A Selbstgebauter Klopper. — B Klingel. — C Boschhorn für Stark- oder Schwachstrom.