

Aus dem Institut für physikalische Chemie der Universität  
Freiburg i. Br.

---

---

# Über die Ausnutzung des Sonnen- lichtes beim Wachstum der grünen Pflanzen

---

## Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Naturwissenschaftlich-Mathematischen Fakultät

der

Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg i. Br.

vorgelegt von

**Josef Komor**

aus Friedland/Oberschlesien

**D 25**

---

---

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH  
1940

Dekan: Prof. Dr. W. S ü ß  
Referent: Prof. Dr. W. N o d d a c k  
Korreferent: Prof. Dr. R. M e c k e

Dissertation der Naturwissenschaftlich-Mathematischen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg im Breisgau, erschienen in: Biochem. Zeitschrift Bd. 305, 5.—6. Heft, S. 381, 1940.

ISBN 978-3-662-28109-3

ISBN 978-3-662-29617-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-29617-2

# Über die Ausnutzung des Sonnenlichtes beim Wachstum der grünen Pflanzen.

Von  
**J. Komor.**

(Aus dem Institut für physikalische Chemie der Universität Freiburg i. Br.)  
(Eingegangen am 15. Mai 1940.)

Mit 2 Abbildungen im Text.

## I. Einleitung.

Den zahlreichen Arbeiten, die sich mit der Assimilation der Kohlensäure durch die grünen Pflanzen unter der Einwirkung des Lichtes befassen, ist es bisher noch nicht gelungen, den chemischen Charakter dieser Reaktion zu ergründen und ihre Energiebilanz zu fassen. Dagegen ist die Frage nach dem Anteil des Lichtes, der bei der Assimilation in chemische Energie umgewandelt wird, mehrfach mit Erfolg beantwortet worden.

Als erster erörterte *N. J. C. Müller*<sup>1</sup> dieses Problem. Sein Versuch, eine Differenz in der Lichtabsorption eines lebenden und eines toten Blattes festzustellen, scheiterte. In ähnlicher Weise arbeitete *Detlefsen*<sup>2</sup>. Weder *Müller* noch *Detlefsen* beachteten die Menge der während der Versuche gespeicherten chemischen Energie. Dies tat erst *Pfeffer*<sup>3</sup>, indem er die von einem assimilierenden Blatte verbrauchte Kohlensäure bestimmte. Dieser Kohlensäure ist eine gewisse Menge Stärke und dieser wieder ein gewisser Energiebetrag äquivalent. Den Wert der auf das Blatt gestrahlten Sonnenenergie entnahm *Pfeffer* einer Angabe von *Pouillet*. Es ergab sich ein Ausnutzungsfaktor von 0,6 % der aufgestrahlten Sonnenenergie. Später führten *Brown* und *Escombe*<sup>4</sup> systematische Versuche in dieser Richtung durch. Mit Hilfe eines Radiometers wurde die Sonnenstrahlung gemessen. Die Bestimmung der während der Assimilation gespeicherten chemischen Energie geschah aus dem Gaswechsel. Als „ökonomischen Koeffizienten“ fanden *Brown* und *Escombe* bei vollem Sonnenlicht etwa 0,66 %, bei Schwächung auf den 12. Teil etwa 4 %. Methodisch am besten sind die Untersuchungen von *Puriewitsch*<sup>5</sup>. Es wurde zum ersten Male die gespeicherte chemische Energie durch Messung der Verbrennungswärme der Pflanzenteile bestimmt. Die Ausnutzungsfaktoren, die *Puriewitsch* fand, liegen

---

<sup>1</sup> *N. J. C. Müller*, Bot. Unters. 1, 339, 1876. — <sup>2</sup> *Detlefsen*, Arb. d. bot. Inst. Würzburg 3, 534, 1888. — <sup>3</sup> *Pfeffer*, Pflanzenphysiologie 1, 332, 1897. — <sup>4</sup> *Brown* u. *Escombe*, Proc. Roy. Soc. Ser. B, 76, 29, 1905. — <sup>5</sup> *K. Puriewitsch*, Jahrb. f. wiss. Bot. 53, 210, 1914.

zwischen 0,6 und 7,7 % der aufgestrahlten Energie, und zwar sinkt die Ausnutzung mit steigender Versuchsdauer und steigt mit sinkender Strahlungsintensität.

Allen den kurz skizzierten Versuchen ist gemeinsam, daß nur einzelne Pflanzenarten oder Pflanzenteile unter künstlich hergestellten Bedingungen kurze Zeit zur Beobachtung gelangten. Aus den erhaltenen Resultaten lassen sich keine Schlüsse auf das allgemeine Verhalten der Pflanzen ziehen. Es schien daher von Interesse, die während einer langen Zeitspanne auf eine größere Anzahl von Pflanzen gestrahlte Energie zu messen und die während dieser Zeit in den Pflanzen aufgespeicherte chemische Energie zu bestimmen, um so den wahren Ausnutzungskoeffizienten zu erhalten, wie er natürlichen Lebensbedingungen — Freilandbedingungen — entspricht.

Derartige Untersuchungen wurden zuerst 1936 von *W. Noddack* und *J. Komor* durchgeführt<sup>1</sup>. Die vorliegende Arbeit enthält eine Erweiterung und Fortführung der genannten Messungen.

## II. Die Messung der aufgestrahlten Energie.

Zur summarischen Messung der Sonnenstrahlung und des diffusen Lichtes des Tages wurden eine Thermosäule und ein Quecksilbercoulo-

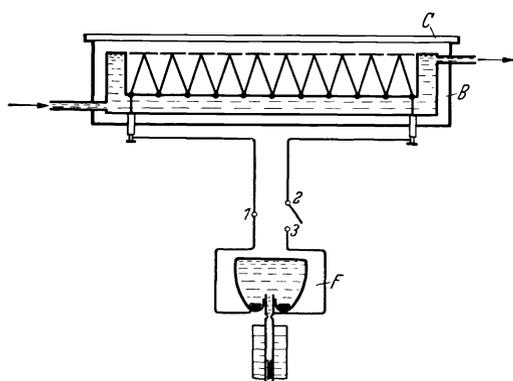


Abb. 1. Anordnung zur Messung der Energie der Sonnenstrahlung.

meter benutzt. Außerdem gestattete ein entsprechend geeichtes Galvanometer momentane Strahlungsintensitäten zu messen. In der Abb. 1 ist die Meßanordnung schematisch wiedergegeben. Die Thermosäule bestand aus 100 hintereinander geschalteten Elementen, deren dunkle Lötstellen in eine Kupferplatte von  $10 \cdot 10$  qcm eingelassen waren. Diese Platte bildete eine Wand eines Wasserbades, das den ganzen Boden der

Säule und ihre Seiten bis zur Höhe der hellen Lötstellen umgab. Als Metallkombination wurde anfangs Eisen-Konstantan und später das gegen Witterungseinflüsse beständige Paar V<sub>2</sub>A-Stahl-Konstantan verwendet. Der innere Widerstand der Säule betrug 27,2 Ohm. Der optimale äußere Widerstand war ebenfalls 27,2 Ohm. Dieser Wert ergab sich einmal aus der Abhängigkeit der Klemmspannung vom äußeren

<sup>1</sup>) *W. Noddack* u. *J. Komor*, *Angewandte Chemie* **50**, 271, 1937.

Widerstand bei konstanter Bestrahlung, zum anderen aus der Konstruktion des Coulometers. Als Strahlungsnormale kam die *Hefner*-Lampe in Anwendung, der ein Strahlungswert von  $22,8 \cdot 10^{-6}$  cal/qcm sec zugrunde gelegt wurde<sup>1</sup>. Bei der Eichung der Thermosäule — in vollständiger Anlehnung an *W. Gerlach*<sup>2</sup> durchgeführt — erhielten wir bei Bestrahlung mit der *Hefner*-Lampe aus 1 m Entfernung für den äußeren Widerstand von 27,2 Ohm eine Klemmspannung von  $0,90 \cdot 10^{-4}$  Volt  $\pm 1,2\%$ .

Eine Veränderung der Kühlwassertemperatur zwischen 13 und 17° C zeigte keine außerhalb des Meßfehlers liegende Abweichung vom angegebenen Eichwert. Ebensovienig konnte bei einer Meßgenauigkeit von  $\pm 2\%$  bis zu einem Einfallswinkel von 75° eine Abweichung vom Cosinusgesetz der Beleuchtung festgestellt werden. Dagegen arbeitete die Thermosäule in dem notwendigen Intensitätsbereich von 0 bis fast 1000 energetischen HK nicht linear. Die Messung ergab bis zu 100 energetischen HK lineare Abhängigkeit von Klemmspannung und Strahlungsintensität. Mit wachsender Strahlungsintensität jedoch wurde die Säule unempfindlicher, und zwar zwischen 550 und 760 energetischen HK um den fast konstanten Betrag von 12%. Etwa 450 energetische HK entsprachen der mittleren Ortshelligkeit; bei dieser Strahlungsintensität wich die Säule um 9% von der Linearität ab. Um diese Größe wurde daher der Eichwert der Thermosäule herabgesetzt, der damit endgültig  $0,82 \cdot 10^{-4}$  Volt für 1 HK in 1 m Entfernung war.

Ein Galvanometer, dessen Skala in energetischen HK geeicht war, konnte zur Messung von momentanen Strahlungsintensitäten an die Klemmen (1, 2) (vgl. Abb. 1) angeschlossen werden. Der Höchstwert für die Ortshelligkeit wurde am 8. Juni 1937 11<sup>30</sup> Uhr beobachtet. Die Strahlungsintensität war: 785 energetische HK = 1,07 cal/qcm · min auf die horizontale Fläche. Zwar haben Messungen der Ortshelligkeit große meteorologische Bedeutung in ihren Beziehungen zur Solar-konstante und zum Trübungsgrad der Atmosphäre. Ihr Wesen für das Pflanzenwachstum ist in ihren Einzelheiten jedoch noch nicht erkannt. Deshalb haben wir von vornherein darauf verzichtet, die Messungen der Ortshelligkeit regelmäßig durchzuführen.

Bei der Messung der aufgestrahlten Energie handelte es sich in der Hauptsache darum, eine Summation der Strahlungsenergie über Wochen und Monate durchzuführen. Für derartige Messungen erwies

<sup>1</sup> *K. Ångström*, Wied. Ann. 67, 633, 1899; Phys. Zeitschr. 3, 257, 1902; *W. Gerlach*, ebenda 14, 577, 1913; 21, 299, 1920; Zeitschr. f. Phys. 2, 76, 1920; *A. Kussmann*, ebenda 25, 58, 1924; *W. W. Coblenz*, Bull. Bur. Standards 11, 87, 1914. — <sup>2</sup> *W. Gerlach*, Phys. Zeitschr. 14, 577, 1913.

sich ein Quecksilbercoulometer von der Art der gebräuchlichen Stia-zähler als geeignet. Der positive Temperaturkoeffizient der Leitfähigkeit der Zelle wurde durch ein berechnetes Stück Reinnickeldraht kompensiert. Der Widerstand des Coulometers betrug schon bei einem Spannungsabfall von  $10^{-6}$  Volt 27,2 Ohm und blieb bis 0,1 Volt, was mehr als  $10^3$  HK entsprechen würde, konstant. Das liegt an der Konstruktion der Elektrolytzellen, bei denen es sich praktisch um eine Elektrolyse von Quecksilbersalzlösung an Quecksilberelektroden handelt, da die Kohlekathode sich mit einer Quecksilberhaut überzieht und so als Quecksilberkathode wirkt. Eine galvanische Polarisation ist also verschwindend gering. Bei der Eichung der Coulometerskala entsprachen 1 Skt. abgeschiedenes Hg =  $25,3 \pm 0,1$  Coulomb. Daraus und aus den Eichwerten der Strahlungsnormalen und der Thermosäule ergab sich:

$$1 \text{ Skt. abgeschiedenes Hg} = 192 \text{ cal/qcm.}$$

Der Kalorienwert der Coulometerskala dürfte mit einem Fehler von  $\pm 4\%$  behaftet sein.

Die beschriebene Meßanordnung wurde in einem sehr sonnigen Garten am Niederweilersbachweg ( $47^{\circ} 58'$  n. B.,  $7^{\circ} 52'$  ö. L.; 372 m ü.M.) in Günterstal bei Freiburg im Breisgau aufgestellt<sup>1</sup>. Die Thermosäule mußte gegen Luftzug und gegen Verunreinigung durch eine Glasplatte geschützt werden. Die notwendige Korrektur gab eine zusätzliche Unsicherheit von  $\pm 2\%$ . Außerdem verursachte der Nullstrom, der an extrem heißen Tagen maximal 2% des Gesamtstromes betrug und an sehr kalten Tagen und morgens und abends um den gleichen Betrag negativ war, einen Fehler von  $\pm 1\%$ . Die Strahlungsmessung hatte somit einen Gesamtfehler von  $\pm 7\%$ .

### III. Das Versuchsmaterial und die Bodenbedeckung.

Um einen Mittelwert des Nutzungsfaktors über viele Pflanzenarten zu erhalten, wurden als Versuchsflächen Rasenstücke gewählt, auf denen eine große Anzahl verschiedener Pflanzen wuchs<sup>1</sup>. Außerdem wurden noch Messungen an einzelnen Pflanzenarten durchgeführt, so an: *Lactuca sativa capitata* (Kopfsalat), *Lactuca sativa foliosa praecox* (Schnittsalat), *Lepidium sativum* (Gartenkresse), *Brassica rapa communis* (Stielmus), *Daucus Carota sativus* (Karotte). Die Ausnutzung des Lichtes durch die Alge *Chlorella vulgaris* wurde ebenfalls in zwei Versuchen bestimmt.

Die Wachstumsflächen waren nahezu horizontal und lagen in unmittelbarer Nähe der Meßstelle. Von den beiden Rasenstücken maß

<sup>1</sup> Frau Dr. A. Saemisch bin ich für die Überlassung der Gartenflächen und für die Bestimmung der Pflanzenarten zu großem Danke verpflichtet. Über die benutzten Pflanzenarten vgl. W. Noddack u. J. Komor, l. c.

das eine 9 qm und besaß einen hellen, etwas sandigen Boden (Fläche I). Es ist nach den Versuchen des Jahres 1936 und im Frühjahr 1937 gedüngt worden. Das andere Stück hatte bei einer Größe von 74 qm einen dunklen, im üblichen Sinne fruchtbaren Gartenboden (Fläche II), der im Frühjahr 1936 und im Frühjahr 1937 gedüngt worden war. Die Flächen wurden vor Beginn der Versuche vom Gärtner von Hand gemäht und das abgemähte Gras sorgfältig entfernt. Der Versuch war beendet, wenn die inzwischen gewachsenen Pflanzen den Boden fast vollständig bedeckten. Dann wurde wiederum von Hand gemäht und das geschnittene Gras gesammelt und gewogen. Von der gesamten Menge des Frischgrases wurde ein Teil abgezweigt und für die Messung der Verbrennungswärme präpariert.

Die Flächen für die Versuche an einzelnen Pflanzenarten hatten nur eine Größe von 0,4 qm und waren in der üblichen Weise für Gemüsebau vorbereitet worden. Eine Kultur der Grünalge *Chlorella vulgaris* wurde in Küvetten in *Knopscher* Nährlösung suspendiert und dem diffusen Tageslicht ausgesetzt, dessen Intensität mit einer Thermosäule jede Stunde gemessen wurde.

Die Pflanzen bedeckten den Boden nicht lückenlos; ein Teil des aufgestrahlten Tageslichtes fiel auf den zwischen den Pflanzen sichtbaren Untergrund. Zur genauen Bestimmung der auf das Versuchsmaterial gestrahlten Energie ist es daher notwendig, die Bodenbedeckung und das Reflexionsvermögen des Untergrundes zu kennen. Streng genommen müßte noch das Reflexionsvermögen der grünen Pflanzenteile berücksichtigt werden. Da aber der kahle Boden nur etwa 10% reflektiert, genügt es, die Reflexion des Bodens auf die Rückseite der Blätter allein — also einmalige Reflexion — anzunehmen.

Bezeichnet man die Strahlungsintensität mit  $J_0$ , die Größe der angestrahlten Fläche mit  $F$ , die Bodenbedeckung durch die Pflanzen mit  $b$  und das Reflexionsvermögen des Bodens mit  $r$ , so fallen  $J_0 \cdot b \cdot F$  cal/sec direkt auf die Pflanzen und vom Boden werden auf die Rückseite der Pflanzen  $J_0 \cdot r \cdot b \cdot (1 - b) \cdot F$  cal/sec reflektiert. Die Pflanzen erhalten also insgesamt:

$$J = J_0 b F \cdot [1 + r (1 - b)] \text{ cal/sec.}$$

Diese Berechnungsweise hat zur Voraussetzung, daß der Boden diffus reflektiert, was in erster Annäherung richtig ist.

Das Reflexionsvermögen der benutzten Bodensorten schwankte mit ihrer Bonität und der jeweiligen Feuchtigkeit zwischen 0,08 und 0,13. Wir rechnen für alle Versuche mit einer mittleren Reflexion von 0,10. Daß dies ohne wesentlichen Fehler erlaubt ist, zeigt eine kleine Rechnung. Setzt man  $b = 0,75^*$  und  $r = 0,1$ , so macht das zweite Glied

\* Dies war ungefähr die mittlere Bedeckung in allen Versuchen.

in obiger Formel, das den vom Boden an die Pflanzen reflektierten Teil der Strahlung darstellt, 2,5 % der Gesamtstrahlung aus. Bei  $r = 0,08$  ist dieser Anteil 2,0 % und bei  $r = 0,13$  ist er 3,3 %. Zudem hatte das Reflexionsvermögen der sandigen Fläche nur in sehr ausgetrocknetem Zustande den hohen Wert von  $r = 0,13$ .

Zur Messung der Bedeckung  $b$  kam ein photographisches Verfahren in Anwendung. Die Versuchsf lächen wurden, anfangs alle 3 bis 4 Tage, später alle 5 bis 6 Tage durch ein strenges Grünfilter (Durchlässigkeit 5000 bis 5800 Å) photographiert. Dabei bildeten sich die Pflanzen dunkel ab, während der Untergrund hell blieb. Durch mehrfaches Umkopieren des Negativs mit hart arbeitenden Emulsionen und Entwickeln mit Röntgenentwickler wurde eine Reproduktion erhalten, auf der die Pflanzenteile glasklar waren und unter sich gleiche Durchlässigkeit zeigten. Der Boden war tiefschwarz wiedergegeben und zeigte keine Durchlässigkeit bei einer Empfindlichkeit der Meßanordnung von 0,01.

Die quantitative Bestimmung des bedeckten Anteils wurde in folgender Weise ausgeführt. Das durch einen Kondensator parallel gemachte Licht einer Punktlampe fiel auf ein Photoelement von 11,3 qcm wirksamer Fläche, das mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden war. Die Strahlungsintensität der Lampe war so gewählt, daß der Proportionalitätsbereich der Photozelle nicht überschritten wurde. Die hellen Stellen der Umkopien hatten eine wesentlich geringere Durchlässigkeit als völlig unbelichtete, ausfixierte Platten. Es mußte also eine Serie von Bezugsplatten hergestellt werden, deren Schleier die gleiche Durchlässigkeit hatte wie die hellen Stellen der vorbereiteten Bedeckungsaufnahmen. Erzeugte die Bezugsplatte, in den Strahlengang zwischen den Kondensator und die Photozelle gebracht, einen Ausschlag — über die Fläche von  $9 \cdot 12 \text{ cm}^2$  gemittelt — von  $x$  Skalenteilen des Galvanometers und die Umkopie einen mittleren Ausschlag von  $y$  Skalenteilen, so war die Bedeckung  $b = 1 - y/x$ . Die einzelnen so erhaltenen Werte ließen, in einem Diagramm gegen die Zeit aufgetragen, die mittlere Bedeckung graphisch entnehmen, die einen Fehler von  $\pm 2\%$  hatte.

Bei den Versuchen an Salat wurde die Bedeckung durch Planimetrieren des Negativs, in das ein Maßstab einkopiert war, gemessen und in qcm angegeben.

Mit Hilfe der Werte für die mittlere Bedeckung und des Reflexionsvermögens wurde aus den Angaben des Coulometers die auf die Pflanzen gestrahlte Energie ermittelt. Dabei ergab innerhalb der Meßgenauigkeit diese Rechnungsart das gleiche Resultat wie die Auswertung aus der Bedeckung jedes Tages und aus der jeden Tag aufgestrahlten Energie.

#### IV. Die Bestimmung der aufgespeicherten chemischen Energie.

Nach dem Arbeitsprogramm sollten die gewachsenen Pflanzen möglichst unverändert im Kalorimeter verbrannt werden. Diesem Plan stellten sich aber verschiedene Schwierigkeiten entgegen, die hauptsächlich in der Sperrigkeit und der schlechten Verbrennbarkeit des frischen Pflanzenmaterials begründet waren, die aber schließlich überwunden werden konnten. Das Frischgras wurde nach dem Mähen ausgebreitet und unter mehrfachem Wenden einen halben Tag der Sonnenstrahlung ausgesetzt. Dann wurde es gesammelt und gewogen und schließlich eine Probe von ungefähr 100 g abgezweigt und im Exsikkator getrocknet. Danach ließ sich das Gras zu einem homogenen Pulver zerreiben. Von jeder der so erhaltenen Proben wurden der Stickstoffgehalt, der Aschengehalt und die Verbrennungswärme bestimmt.

Das verwendete Kalorimeter war eines der allgemein üblichen Bauart. Es wurde isotherm bei 18° C gearbeitet. Die „spezifische Gangänderung“, das  $k$  der *Newtonschen* Abkühlungsformel, das die beste Kontrolle der Messungen darstellt, war im Mittel  $1,08 \cdot 10^{-3} \pm 0,04_8 \cdot 10^{-3}$ . Der Wasserwert des Kalorimetersystems wurde mit eingeschmolzener reiner Benzoessäure bestimmt, für die nach *W. A. Roth*<sup>1</sup> eine Verbrennungswärme von 6317,3 cal/g bei 25° C mit einem Temperaturkoeffizienten von 0,23 cal/Grad am wahrscheinlichsten ist. Aus acht Messungen ergab sich für den Wasserwert:  $3251,5 \pm 0,5_1$  cal/Grad. Da die ersten Versuche zur Bestimmung der Verbrennungswärme der Grassubstanz zeigten, daß eine direkte Verbrennung unmöglich ist, wurde nach dem Vorschlage von *W. A. Roth* Paraffinöl mit bestem Erfolg als Anreger benutzt. Als wir außerdem von tiefen zu flachen Quarzschälchen übergingen, konnten fast 300 mg Gras, wenn sie mit der gleichen Menge Paraffinöl durchtränkt waren, vollständig verbrannt werden. So gelang auch die rußfreie Verbrennung von feuchtem Gras, das an der Luft in einer Minute mehr als 1 % seines Gewichtes an Feuchtigkeit abgab. Für die Hilfssubstanz, ein Handelsparaffinöl, hatten wir aus acht Einzelbestimmungen eine Verbrennungswärme von  $10920 \pm 1,8$  cal/g ermittelt.

In der kalorimetrischen Bombe verbrannte der Stickstoff der pflanzlichen Eiweißsubstanz ebenso zu Salpetersäure wie der elementare Stickstoff, der den Sauerstoff als Verunreinigung begleitete. Bei der Titration der „sentina“ hatte man also von dem erhaltenen Wert den durch den pflanzlichen Stickstoff gegebenen Anteil an Salpetersäure abzuziehen. Dazu war die Kenntnis des Stickstoffgehaltes der Pflanzen

<sup>1</sup> *W. A. Roth* u. *A. E. Lamprecht*, *Rocznikow Chemii* 18, 747, 1938.

notwendig. Die Tabelle I gibt die Daten der Verbrennungen einer Grasprobe wieder.

Tabelle I. Verbrennungswärme von Gras.  
Versuch vom 10. Juni bis 20. Juli 1937 auf Fläche I.

Gras g	Paraffinöl g	Temperatur- differenz $\Delta t$ °C	Korr. cal	Verbrennungs- wärme Gras cal	Verbrennungs- wärme Gras kcal/g
0,2130	0,3460	1,4175	14,2	816,5	3,833
0,1868	0,3102	1,2670	16,5	715,8	3,832
0,2496	0,3456	1,4585	17,3	951,0	3,810
0,2707	0,3349	1,4465	11,5	1034,7	3,822

Spalte 1 enthält die verbrannte Menge Gras und Spalte 2 die angewandte Menge Hilfssubstanz. In Spalte 3 steht die bereits korrigierte Temperaturdifferenz. In Spalte 4 ist die Korrektur für den Zündungsdraht, die Stromwärme und den elementaren Stickstoff verzeichnet. Spalte 5 enthält die Verbrennungswärme der benutzten Menge Gras. Diese Werte sind in kcal/g umgerechnet und in die letzte Spalte geschrieben. Als Mittelwert ergibt sich für die Verbrennungswärme dieser Grasprobe mit einer größten Abweichung vom Mittel:

$$3,824 \pm 0,014 \text{ kcal/g.}$$

Die Grasprobe, deren Daten in der Tabelle I stehen, kam in weitgehend getrocknetem Zustande zur Verbrennung. Nun bedingt aber die Trocknung eine Änderung des Energieinhaltes gegenüber dem frischen Pflanzenmaterial. Denn in den Zellen der lebenden Pflanzen sind die organischen Stoffe und die Salze teils in fester Form, teils in gelöstem Zustande vorhanden. Bei der Trocknung werden die gelösten Stoffe ausgeschieden, wobei ihr Energieinhalt verändert wird. Das während der Trocknung verdampfende Wasser wird zu einem Teil aus „Lösungswasser“, zum anderen aus „Bindungswasser“ bestehen. Das Lösungswasser wird fast restlos entfernt, und seine Verdampfungswärme aus den kapillaren Zellgebilden wird eine andere und wohl größere sein als die Kondensationswärme, die in der Bombe abgegeben wird. Das Bindungswasser der hydratisierten organischen Substanzen wird beim Trocknen ebenfalls zum Teil abgegeben werden und damit wird ein Teil der chemischen Energie der feuchten Substanz verlorengehen. Die meisten dieser bei der Trocknung eintretenden Energieänderungen werden in der Richtung einer Energieabnahme gehen, so daß bei der Verbrennung weniger chemische Energie bestimmt wird als in den Pflanzen vorhanden war. Um diesen Fehlbetrag kennenzulernen, haben wir die Abhängigkeit der Verbrennungswärme vom Grade der Trocknung des Grasses in folgender Weise untersucht.

Feuchtes Gras wurde in möglichst kleine Stücke geschnitten und auf Filtrierpapier ausgebreitet 1 Stunde an feuchter Luft liegen gelassen. Von einer Probe wurden dann der Aschengehalt, der Stickstoffgehalt und in vier Einzelmessungen die Verbrennungswärme bestimmt. Der Rest kam für kurze Zeit in einen Exsikkator und gab einen Teil seiner Feuchtigkeit und flüchtigen organischen Verbindungen ab. Nun wurden wieder von einer Probe Aschengehalt, Stickstoffgehalt und Verbrennungswärme bestimmt. So wurde fortgefahren, bis beim weiteren Trocknen über Phosphorpentoxyd in 3 Stunden bei 1 g Gras ein Gewichtsverlust von weniger als 0,2 mg eintrat. Der Auswertung lag die Annahme zugrunde, daß das Gras nach der letzten Trocknung über  $P_2O_5$  nur noch aus Asche und verbrennbarer organischer Substanz bestand. Da der Endaschengehalt 11,75 % betrug, entsprach 1 % Asche 7,5 % organischer Substanz. So konnte nun für die einzelnen mehr oder weniger wasserhaltigen Proben aus ihrem Aschengehalt auf die Menge verbrennbarer Substanz geschlossen werden. In der Tabelle II sind die Ergebnisse zusammengefaßt.

Tabelle II. Verbrennungswärme des Grasses in Abhängigkeit von der Trocknung.

1	2	3	4	5	6
Nr. der Probe	Aschengehalt in %	Organische Substanz in %	H <sub>2</sub> O* in %	Verbrennungswärme in kcal/g gemessen	Verbrennungswärme reiner organischer Substanz, kcal/g
1	11,75	88,3	0,0	4,196	4,75
2	11,58	87,0	1,4	4,145	4,76
3	10,66	80,1	9,2	3,964	4,95
4	9,87	74,1	16,0	3,740	5,05
5	8,53	64,1	27,4	3,289	5,13
6	8,00	60,1	31,9	3,076	5,12

\* Wasser + flüchtige organische Verbindungen.

Man entnimmt der letzten Spalte, daß die Verbrennungswärme von Gras, auf reine verbrennbare organische Substanz bezogen, mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt langsam größer wird und sich einem Grenzwert nähert, der bei dem verwendeten Pflanzengemisch bei  $5,12 \pm 0,02$  kcal/g liegt. Er ist um  $0,37$  kcal/g = 7,8 % höher als der Wert für die Verbrennungswärme des völlig getrockneten Materials.

Nun mußte gezeigt werden, daß die Grasproben der einzelnen Versuche auf den Flächen I und II mit dem Graspräparat vergleichbar waren, das zur Bestimmung des Einflusses der Trocknung auf die Verbrennungswärme verwendet worden war. Deshalb sind in der Abb. 2 die Werte der Spalten 2 und 5 der Tabelle II in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen. Durch die mit  $\times$  bezeichneten Punkte ist eine Kurve gelegt. In dieses Diagramm wurden die entsprechenden Daten

von sieben Grasproben, die im Laufe der Wachstumsperiode des Jahres 1937 erhalten worden waren, als kleine Kreise eingezeichnet. Man sieht, daß sie sich der ausgezogenen Kurve befriedigend angleichen.

Schließlich gestaltete sich die Berechnung der während eines Versuchs auf den Rasenflächen gespeicherten chemischen Energie folgendermaßen: Aus der Gesamtmenge der von den Flächen geernteten Trockensubstanz konnte mit Hilfe der Beziehung 1 % Asche äquivalent 7,51 % organischer Substanz die Gesamtmenge reiner organischer Substanz ermittelt werden, deren Verbrennungswärme zu 5,12 kcal/g erhalten

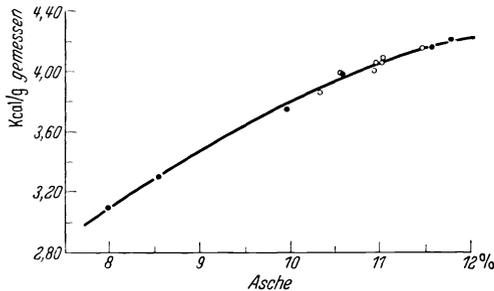


Abb. 2. Gemessene Verbrennungswärme des Grasses als Funktion seines Aschengehaltes.

wurde. Die Bestimmung der gesamten Trockensubstanz hatte einen Fehler von  $\pm 0,5\%$ . Als Unsicherheit für die Berechnung der Menge organischer Substanz wurde die größte Abweichung von der ausgezogenen Kurve der Abb. 2 — also  $\pm 1\%$  — angenommen. Da außerdem der Wert für die Verbrennungswärme des feuchten Grasses eine größte

Abweichung vom Mittel um  $0,4_5\%$  hatte, wurde die gespeicherte chemische Energie in den Versuchen an Gras mit einem Fehler von  $\pm 2\%$  erhalten.

Aschengehalt und Verbrennungswärme der untersuchten Gemüsearten und von *Chlorella vulgaris*, in die Abb. 2 eingetragen, schließen sich wegen des hohen Aschengehaltes dieser Substanzen keineswegs der Kurve an, die nur bis zu 11,75 % Asche gültig ist. Die Berechnung der aufgespeicherten chemischen Energie wurde daher so vorgenommen, daß die Menge Trockensubstanz in g mit der Verbrennungswärme pro g Trockensubstanz multipliziert wurde. Zu dieser Zahl kamen noch 8 % Zuschlag für den Einfluß der Trocknung. Da dieser Einfluß nicht in jedem einzelnen Falle gemessen worden war, dürfte die Unsicherheit der Werte für die gespeicherte Energie an den Gemüsearten und an *Chlorella vulgaris*  $\pm 4\%$  sein.

## V. Die Versuchsergebnisse.

Versuche über die Ausnutzung des Lichtes durch die grünen Pflanzen wurden während der Jahre 1936 und 1937 angestellt. Die erhaltenen Werte des Jahres 1936 sind bereits veröffentlicht<sup>1</sup>. Der

<sup>1</sup> W. Noddack u. J. Komor, *Angew. Chem.* 50, 271, 1937.

Vollständigkeit halber seien sie jedoch in der Tabelle III nochmals kurz zusammengestellt.

Tabelle III.

Versuchsdauer	Trocken- gras in kg	Gespeicherte chemische Energie in kcal	Mittlere Boden- bedeckung	Auf die Pflanzen gestrahlte Energie in kcal	Ausnutzungs- faktor in %
Fläche I, 9 qm.					
25. IV.—14. V. 1936	0,317	$1,21 \cdot 10^3$	0,72	$1,80 \cdot 10^5$	0,67
14. V.—13. VI. 1936	0,239	$1,10 \cdot 10^3$	0,75	$2,70 \cdot 10^5$	0,41
Fläche II, 74 qm.					
15. IV.—14. V. 1936	3,24	$1,23 \cdot 10^4$	0,76	$1,54 \cdot 10^6$	0,80
24. V.—13. VI. 1936	3,84	$1,46 \cdot 10^4$	0,78	$2,28 \cdot 10^6$	0,64

Die Ergebnisse der umfangreicheren Untersuchungen des Jahres 1937 sind in den Tabellen IV und V verzeichnet.

Außerdem haben wir noch zwei Versuche über die Lichtausnutzung der Alge *Chlorella vulgaris* ausgeführt. Die eine Suspension, die täglich zweimal mit Kohlensäure gesättigt wurde, zeigte eine Ausnutzung von 1,2 %, bezogen auf die eingestrahlte Energie, und 3,7 %, bezogen auf die absorbierte Energie. Für die zweite Suspension, die ohne Kohlensäuredüngung blieb, waren die entsprechenden Werte 0,6 bzw. 3,0 %.

## VI. Die Diskussion der Versuchsergebnisse.

Die letzte Spalte der Tabellen III bis V gibt die im Laufe der Jahre 1936 und 1937 erhaltenen Ausnutzungskoeffizienten wieder. Zunächst ist auffallend die größenordnungsmäßige Übereinstimmung mit den Werten von *Pfeffer*, *Brown* u. *Escombe* und *Puriewitsch*. Bei diesen wie bei uns liegt die Ausnutzung um 1 %, obwohl die Bedingungen der Versuche außerordentlich verschiedene sind; dort kurzzeitige Laboratoriumsversuche, hier lange dauernde Beobachtungen unter Freilandbedingungen.

Aus unseren Daten lassen sich einige bemerkenswerte Beziehungen herleiten. Die Tabelle III zeigt, daß die Ausnutzung auf der sandigen Fläche I geringer ist als auf der im üblichen Sinne fruchtbaren Fläche II (0,67 % gegenüber 0,80 %; 0,41 % gegenüber 0,64 %). Mit fortschreitender Jahreszeit wird die Ausnutzung auf beiden Flächen geringer (0,67 % gegenüber 0,41 %; 0,80 % gegenüber 0,64 %). Diese gleiche Abhängigkeit findet sich bei den Messungen des folgenden Jahres (Tabelle IV). Von 1,30 % sinkt der Ausnutzungskoeffizient auf im Mittel 0,4 % ab. Es scheint sich hier der Einfluß der Wachstumsstoffe auf den Nutzungsfaktor bemerkbar zu machen. In welchem Maße der Ausnutzungsfaktor bei Düngung des Bodens verändert werden kann, gibt ein Vergleich der Jahre 1936 und 1937 wieder. Die „sandige“ Fläche des Jahres 1936

Tabelle IV.

Versuchsdauer	Trocken- gras in kg	Aschen- gehalt in %	Ver- brennungs- wärme in kcal/g	Gesamte organische Substanz in kg	Gespeicherte Energie in kcal	Skt. des Coulometers	Mittlere Boden- bedeckung b	Auf die Pflanzen ge- strahlte Energie in kcal	Ausnutzungs- faktor in %
Fläche I, 9 qm.									
13. V. - 10. VI. 1937	1,738	11,38	4,131	1,49	$7,6 \cdot 10^3$	56,2	0,73	$73 \cdot 10^4$	1,04
10. VI. - 20. VII. 1937	1,686	10,25	3,824	1,30	$6,7 \cdot 10^3$	61,3	0,73	$79 \cdot 10^4$	0,85
20. VII. - 5. IX. 1937	1,621	10,94	4,051	1,33	$6,8 \cdot 10^3$	63,6	0,68	$77 \cdot 10^4$	0,88
Fläche II, 74 qm.									
19. IV. - 19. V. 1937	8,72	10,80	3,989	7,07	$36,2 \cdot 10^3$	28,7	0,67	$28 \cdot 10^5$	1,29
19. V. - 23. VI. 1937	6,20	10,50	3,950	4,89	$25,0 \cdot 10^3$	68,5	0,76	$76 \cdot 10^5$	0,33
23. VI. - 30. VII. 1937	6,12	10,94	4,076	5,03	$25,8 \cdot 10^3$	55,2	0,74	$60 \cdot 10^5$	0,43
30. VII. - 5. IX. 1937	5,14	10,84	4,046	4,18	$21,4 \cdot 10^3$	48,0	0,81	$56 \cdot 10^5$	0,38

Als Ergänzung der Versuche an Rasenflächen haben wir die Lichtausnutzung einiger Kulturpflanzen gemessen und die Ergebnisse in der Tabelle V zusammengefaßt.

Tabelle V.

Pflanzenarten	Versuchsdauer 1937	Trocken- substanz in g	Ver- brennungs- wärme korr. in kcal/g	Gespeicherte Energie in kcal	Skt. des Coulometers	Bedeckung in qcm	Aufgestrahlte Energie in kcal	Ausnutzungs- faktor in %
Kopfsalat . . . . .	8. V. - 26. VI.	39,7	4,06	161	88,4	1450	$25,3 \cdot 10^3$	0,64
Schnittsalat . . . . .	8. V. - 9. VI.	27,5	4,06	112	59,6	1070	$12,6 \cdot 10^3$	0,89
Gartenkresse . . . . .	12. V. - 8. VI.	66,8	4,11	275	53,5	1980	$20,9 \cdot 10^3$	1,3
Stielmus . . . . .	8. V. - 9. VI.	38,2	3,84	147	59,6	1220	$14,4 \cdot 10^3$	1,0
Karotte, Sproß . . .	23. VI. - 6. VIII.	46,5	4,07	629	80,8	1960	$31,3 \cdot 10^3$	2,0
„ Wurzel . . . . .	108,4	4,06						
„ Sproß . . . . .	59,6	4,07						
„ Wurzel . . . . .	101,4	4,06		655	80,8	1600	$25,6 \cdot 10^3$	2,6

war vor Beginn der Versuche des Jahres 1937 gedüngt worden. Der Ausnutzungskoeffizient steigt von rund 0,5 % auf rund 0,9 %. Außerdem zeigt sich noch eine Abhängigkeit vom Charakter des Jahres. Das Frühjahr 1936 war rau und kalt; das Frühjahr 1937 dagegen mild. Die Ausnutzung der Fläche II wurde zu 0,80 bzw. 1,29 % gefunden.

Als Versuchsflächen wurden zunächst Rasenflächen gewählt, weil auf ihnen eine große Anzahl verschiedener Pflanzen wuchs und man so hoffen konnte, einen Mittelwert des Nutzungsfaktors über viele Pflanzenarten zu erhalten. Um jedoch die Frage der Allgemeingültigkeit der Ausnutzungsfaktoren bejahen zu können, haben wir noch Messungen an einzelnen Kulturpflanzen durchgeführt, deren Resultate die Tabelle V bringt. Die Ausnutzung liegt um 1 %. Lediglich die Karotten verwerten 2,0 bzw. 2,6 %.

Die grünen Pflanzen vermögen also von der Fülle des ihnen dargebotenen Sonnenlichtes nur einen kleinen Teil unmittelbar in chemische Energie umzusetzen. Der weitaus größte Anteil der auffallenden Strahlung wird reflektiert oder in Wärme umgewandelt. Man darf bei dieser Betrachtung allerdings nicht vergessen, daß die in Form von Wärme auftretende absorbierte Sonnenenergie, wenigstens zum Teil, den Pflanzen wieder zugute kommt. Die Erwärmung der Luft, der Pflanzen selbst und des Erdbodens durch die Sonnenstrahlung schafft die Temperatur, bei der das Wachstum der Pflanzen stattfinden kann.

Zwei Größen, die experimentell nicht angreifbar sind, aber einen Einfluß auf den Wert des Ausnutzungsfaktors haben, sollen noch in ihrem Wesen besprochen werden. Es sind dies der Wurzelfaktor und die Atmung.

Bei der an den Rasenflächen angewandten Versuchsmethodik wurde vorausgesetzt, daß die von den Pflanzen während der Assimilationsperiode gespeicherte chemische Energie ausschließlich in den Blättern, Blüten und Stielen sitzt, die beim Mähen erhalten werden. Diese Voraussetzung trifft nicht ganz zu. Ein Teil der chemischen Energie wandert in die Wurzeln und entzieht sich so der direkten Bestimmung. Eingehende Versuche zeigten, daß sich die Menge an Wurzelsubstanz des Rasens der einzelnen Flächen im Laufe der Versuchszeit von April bis August nicht meßbar ( $\pm 10\%$ ) änderte. Der Abgang an organischer Substanz durch die Wurzeln wird verursacht durch Bakterien und Tiere und durch das Absterben von Wurzeln. Neue Wurzelfasern bilden sich wieder, so daß im Mittel über eine größere Fläche die Menge an Wurzeln konstant bleibt. Der durch Mikroorganismen und höhere Tiere gegebene Verlust an organischer Substanz ist unter den vorhandenen Bedingungen nicht meßbar zu verfolgen, deswegen kann keine „Wurzelkorrektur“ im Wert für den Ausnutzungskoeffizienten

angebracht werden. Die Kulturpflanzen, mit denen Versuche angestellt wurden, waren aus Samen gezogen. Hier machte die in der Wurzel gespeicherte chemische Energie einen erheblichen Teil der gesamten aus. Deswegen wurden in diesen Fällen Wurzel und Blätter bzw. Sprosse geerntet und getrennt weiterverarbeitet.

Bei Abwesenheit von Licht spielt sich der der Assimilation umgekehrte Vorgang ab. Die organischen Substanzen werden unter Sauerstoffaufnahme abgebaut und Kohlensäure wird frei. Quantitativ sind die Vorgänge der Photosynthese und der Atmung sehr verschieden. Zwei Angaben mögen dies erhärten. Nach *Kostytschew*<sup>1</sup> ist die Photosynthese unter allem Vorbehalt etwa zehnmal intensiver als die Atmung. Nach *O. Warburg*<sup>2</sup> verbraucht die Grünalge *Chlorella vulgaris* bei 20° im Dunkeln pro Stunde ein ihrem Volumen gleiches Volumen an Sauerstoff und sie zersetzt bei intensiver Bestrahlung pro Stunde etwa das Zwanzigfache ihres Volumens an Kohlensäure<sup>3</sup>.

Die Forschung hat in der Atmung ein Problem von nicht zu unterschätzender Schwierigkeit vor sich. So ist noch kein Versuch bekannt, der eindeutig nachweist, daß die grünen Pflanzen auch während der Assimilation atmen. Es wird dies lediglich als sehr wahrscheinlich angenommen<sup>3</sup>.

Um für die geschilderten Versuche über die Lichtausnutzung einen Anhaltspunkt für die Größe der durch die Atmung verlorengegangenen chemischen Energie zu erhalten, ist man auf eine außerordentlich rohe Schätzung angewiesen. Unterstellt man, die grünen Pflanzen atmeten während des Tages gleich intensiv wie während der Nacht, und nimmt man an, die Atmungsintensität wäre 0,1 bis 0,05 der Intensität der Photosynthese, was den Angaben von *Kostytschew* und *O. Warburg* entsprechen würde, dann könnten, da in der Jahreszeit der Versuche etwa zwei Drittel Tag und ein Drittel Nacht sind, durch die Atmung 8 bis 15 % der gesamten gespeicherten Energie verlorengegangen sein. Lehnt man eine Atmung während der Assimilation ab, so ist der Verlust an gespeicherter chemischer Energie durch die Nachtatmung 2,5 bis 5 %. Zwischen den Grenzen 2,5 und 15 % müßte eine Atmungskorrektur liegen.

Wegen der großen Unsicherheit der vorstehenden Betrachtungen werden die Werte für die gesamte gespeicherte chemische Energie nicht auf die Atmung korrigiert.

---

<sup>1</sup> *Kostytschew*, Handwörterbuch d. Naturwiss. **1**, 538, 1931. — <sup>2</sup> *O. Warburg*, diese Zeitschr. **166**, 386, 1925. — <sup>3</sup> *W. Noddack* u. *H. J. Eichhoff*, Zeitschr. f. phys. Chem. (A) **185**, 232, 1939.

### Zusammenfassung.

Es wurde gemessen, welcher Teil der Sonnenstrahlung von den Pflanzen während längerer Wachstumsperioden unter Freilandbedingungen in chemische Energie umgewandelt wird. Als Versuchsobjekte dienten teils Rasenflächen mit vielen Pflanzenarten, teils mit Kulturpflanzen bedeckte Gebiete. Die gespeicherte chemische Energie wurde nach dem Ernten und Trocknen der betreffenden Pflanzen durch Bestimmung der Verbrennungswärme in der kalorimetrischen Bombe festgestellt. Die Messung der eingestrahnten Sonnenenergie erfolgte mit Thermosäule und Quecksilbercoulometer. Die Bodenbedeckung der Pflanzen wurde auf photographischem Wege ermittelt.

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Die Ausnutzung des gesamten eingestrahnten Sonnen- und Tageslichtes liegt um 1%.
2. Bei Gräsern sinkt der Ausnutzungsfaktor bei ärmeren Böden bis auf ein Drittel des normalen Wertes.
3. Es ergibt sich eine reproduzierbare Abhängigkeit von der Jahreszeit; das Optimum fällt in das Frühjahr (April bis Mai).
4. Es zeigt sich eine Abhängigkeit vom Charakter des Jahres.
5. Bei hochgezüchteten Kulturpflanzen kann der Ausnutzungsfaktor unter günstigen Bedingungen bis auf 2,6% ansteigen.

Herrn Prof. Dr. *W. Noddack* bin ich für seine Anregung zu dieser Arbeit, für sein Interesse und seine Ratschläge zu herzlichem Dank verpflichtet.

## Lebenslauf.

Am 6. 3. 1912 wurde ich in Friedland in Oberschlesien geboren. Ich besuchte die Volksschule in Lamsdorf in Oberschlesien und im Anschluß daran das Realgymnasium zu Neiße in Oberschlesien, wo ich Ostern 1932 die Reifeprüfung bestand. Im S. S. 1932 begann ich an der Universität Breslau das Studium der Mathematik, Chemie und Physik mit dem Ziel, das Staatsexamen für das höhere Lehramt zu machen. Im Laufe des Studiums, das mich noch an die Universitäten München, Rostock und Freiburg i. Br. führte, wandte sich mein Interesse immer mehr der Chemie zu.

An der Universität Freiburg i. Br. legte ich die beiden Verbands-examina für Chemiker ab und fertigte am Institut für physikalische Chemie der gleichen Universität unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Walter N o d d a c k die vorliegende experimentelle Arbeit an.

Seit 1. 11. 1937 bin ich Assistent auf Sondervertrag am Institut für physikalische Chemie der Universität Freiburg i. Br.

---