

Zur Sicherheit des Dampfkesselbetriebes

Berichte aus den Arbeiten der Vereinigung der Großkesselbesitzer E. V.
Verhandlungen der Technischen Tagung in Cassel 1926 und
Forschungen des Arbeitsausschusses für Speisewasserpflege

Herausgegeben von der
Vereinigung der Großkesselbesitzer E. V.

Mit 311 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1927

ISBN-13: 978-3-642-98907-0 e-ISBN-13: 978-3-642-99722-8
DOI: 10.1007/978-3-642-99722-8

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Copyright 1927 by Julius Springer in Berlin.
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1927

Vorwort.

Unter „Sicherheit des Dampfkesselbetriebes“ hat man früher hauptsächlich den Schutz des Bedienungspersonals gegen körperlichen Schaden als Folge von Explosionen verstanden. Heute umfaßt dieser Begriff auch den Schutz gegen Betriebsstörungen im Kesselhause, hervorgerufen durch Kesselschäden.

Daß dieser Schutz bei der derzeitigen wirtschaftlichen Lage unserer Industrie von einer gegenüber früheren Jahren weit höheren Bedeutung geworden ist, versteht jeder, der die Abhängigkeit einer Fabrik, gleichviel welcher Branche, von einer geregelten Dampfversorgung kennt.

Wenn wir darum die außerordentlich niedrige Ziffer der Dampfkesselexplosionen in Deutschland im Vergleich zu den viel höheren Ziffern anderer Länder mit Befriedigung feststellen können, so haben uns andererseits in den letzten Jahren die übrigen nicht zur Explosion führenden Kesselschäden, wie z. B. Kremenbrüche, Nietlochrisse und das Aufreißen von stumpfgeschweißten Nähten oder Kessel- und Dampfrohren dauernd beunruhigt.

Bei den Bemühungen den Ursachen dieser Kesselschäden auf den Grund zu kommen, ist es von großem Nutzen gewesen, daß auch die Kesselbesitzer selbst ihre Betriebserfahrungen mehr als bisher zur Verfügung gestellt haben. Durch vergleichende Untersuchung gleichartiger Schäden in den verschiedenen Betrieben und in enger Zusammenarbeit zwischen den Kesselbesitzern mit ihren Revisionsvereinen und den Materialprüfungsämtern, sowie mit den Herstellern des Baustoffs und den Kesselerbauern war es möglich, unsere Kenntnis von den oft recht komplizierten Vorgängen im Kessellinnern und dem Verhalten der Kesselbaustoffe während der Verarbeitung und während des Betriebes zu erweitern, und Wege zur Abhilfe zu finden.

Obwohl das Ausland schon während des Krieges damit beginnen konnte, sich mit den Ursachen der gleichzeitig mit der Steigerung des Dampfdruckes auftretenden Kesselschäden zu befassen, Deutschland dagegen durch den Krieg und die Schwierigkeiten der Nachkriegszeit jahrelang gehemmt war, an die Lösung dieser Fragen heranzugehen, sind wir heute in Deutschland in manchen Punkten doch schon weitergekommen, als die Forscher des Auslandes. Während z. B. vor kurzem noch in den Vereinigten Staaten eine Kesseltrommel infolge Kremenbruchs explodiert ist, hat man in Deutschland die Gefahr kleiner Kremenradien erkannt, die gefährdeten Böden ausgewechselt und damit die Betriebe vor solchen Explosionen geschützt.

Auch die primären Ursachen der so zahlreichen und gefährlichen Risse in den Nietnähten hat man nach jahrelanger, mühevoller Forschungsarbeit heute in Deutschland wenigstens so weit aufgeklärt, daß wir uns gegen die Wiederholung solcher Schäden in neu erbauten Kesseln schützen können. Insbesondere haben die Verhandlungen der Hauptversammlung der Vereinigung der Großkesselbesitzer am 16. bis 18. September 1926 in Cassel uns neue Wege zur Vermeidung solcher Schäden gezeigt.

Schon die vorangegangenen Untersuchungen unserer Materialprüfungsanstalten hatten uns gelehrt, daß solche Risse nur in einem Flußeisenmaterial auftreten, das nach erfolgter Kaltreckung oder sonstiger Mißhandlung bei nachfolgender Erwärmung auf 200° seine Zähigkeit verliert. Heute sind deutsche Walzwerke in der Lage, uns ein besseres Flußeisenmaterial, das diese verhängnisvolle Verschlechterung der Zähigkeitseigenschaften nicht mehr erleidet, für den Bau unserer Dampfkessel, insbesondere der genieteten Trommeln, zur Verfügung zu stellen. Die Erfindung des I.Z.-Flußeisens, von der Herr Dr. Fry von der Firma Fried. Krupp in Cassel zum ersten Male Mitteilung gemacht hat, ist die Krönung jahrelanger gemeinsamer Bemühungen ebensowohl der Hüttenwerke, wie der kesselerbauenden und kesselbetreibenden Industrie.

Dem gelegentlichen Ausbeulen von Siederohren, selbst dem Aufreißen einzelner schwacher Stellen an Kessel- und Dampfrohren, hat man früher in unseren Anlagen mit niedrigen Dampfdrücken nicht die Bedeutung beigemessen wie heute. Erst der Verlust von Menschenleben hat uns die Augen für diese neue Gefahr geöffnet und eingehende Untersuchungen der Ursachen solcher Rohrschäden veranlaßt. Durch gemeinsame Bemühungen sind wir heute so weit,

daß die Verschärfung der Abnahmevorschriften und die daraus sich ergebende zwangsweise Steigerung der Qualität des Materials und der Walzarbeit zu einer besonders sorgfältigen Ausbildung der Walzverfahren für Kessel- und Dampfrohre geführt haben. Dies bringen die Mitteilungen mehrerer führender Röhrenwalzwerke nachstehend zum Ausdruck. Auch der Betriebsingenieur hat der Pflege seiner Anlagen vermehrte Sorgfalt zuwenden müssen, da das beste Rohr durch mangelhaften Wärmedurchgang Schaden erleiden kann. So ist auch auf diesem Gebiete eine nicht unwesentliche Steigerung der Sicherheit des Dampfkesselbetriebes zu erwarten und es werden die Voraussetzungen geschaffen für einen störungsfreien Betrieb selbst mit höchsten Drücken.

Der Bericht über Betriebserfahrungen mit Höchstdruck-Dampfkesseln gibt Auskunft, soweit das heute schon möglich ist, über den Sicherheitsgrad solcher Anlagen, der überall da genügend groß ist, wo die Hand des Konstrukteurs glücklich wählt und alle Beteiligten bei der Herstellung und dem Betriebe solcher Kessel sich ihrer Verantwortung bewußt sind.

Bei einer Zusammenstellung technischer Fortschritte in der Erhöhung der Sicherheit des Dampfkesselbetriebes kann man nicht wohl an der Arbeit vorübergehen, welche in den letzten Jahren von den verschiedensten Stellen im In- und Auslande zur Erforschung der Speisewasserprobleme geleistet worden ist. Die Speisewasserpflege ist vorwiegend eine Frage des Betriebes und wenn zu ihrer Lösung auch in immer steigendem Maße die Hilfe des Chemikers und Physikers notwendig wird, so darf man doch von einem Betriebsingenieur deutscher Kessel erwarten, daß er trotz der geringen Vertrautheit mit diesem ihm fernerliegenden Fachgebiete der wichtigen Aufgabe der Speisewasserpflege sein größtes Interesse zuwendet. Mit Kesselstein und Kesselschlamm in Trommeln und Rohren zu fahren, ist ein Luxus, den sich keine deutsche Anlage mehr leisten kann. Auch handelt es sich hierbei ebenso wie bei den Kesselrohren nicht nur um wirtschaftliche Schäden, sondern um die mit dem höheren Dampfdruck steigende Gefahr einer Explosion.

Die vorliegende Sammlung bringt aus der Werkstatt des Arbeitsausschusses für Speisewasserpflege unserer Vereinigung einige Berichte, die im Anschluß an das früher von uns herausgegebene Buch „Speisewasserpflege“ weitere Fingerzeige geben können für den Schutz der Kessel.

In gleicher Weise, wie uns in dieser wichtigen Frage die Arbeit unserer Fachleute in jedem Jahr immer nur ein gewisses Stück vorwärts bringt, will das vorliegende Sammelwerk auch für die übrigen Beiträge nicht den Anspruch erheben, eine umfassende Darstellung aller Maßnahmen zur Erhöhung der Betriebssicherheit der Kesselanlage zu bieten. Es soll nur einer der Bausteine sein, die unsere Vereinigung zum Wiederaufbau unserer deutschen Wirtschaft beitragen möchte.

Charlottenburg, im Dezember 1926.

Vereinigung der Großkesselbesitzer E. V.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Das Verhalten der Kesselbaustoffe im Betriebe und Fortschritte in ihrer Herstellung.	
A. Kesselbleche.	
Schäden am Kesselkörper und deren Ursachen. Von Oberingenieur Dr.-Ing. e. h. M. Guillaume, Ammoniakwerk Merseburg.	1
Izett-Flußeisen, ein neuer Kesselbaustoff der Firma Fried. Krupp A.-G. Von Dr.-Ing. Ad. Fry, Fried. Krupp A.-G., Essen-Ruhr.	44
Äußerung zum Vortrag Dr.-Ing. Fry von Dr.-Ing. K. Daeves, Forschungsabteilung der Vereinigten Stahlwerke A.-G., Düsseldorf	55
Schlußbemerkung von Dr.-Ing. Ad. Fry, Essen	56
B. Kessel- und Dampfrohre.	
Schäden an Siederohren und deren Ursachen. Von Prof. Dr.-Ing. e. h. R. Baumann, Stuttgart	56
Berichte über Untersuchungen von Rohrschäden. Auszug aus den „Mitteilungen“ der Vereinigung der Großkesselbesitzer E. V.	59
Herstellung von Kessel- und Dampfrohren nach dem Mannesmann-Verfahren. Von Direktor Fritz Rosdeck, Mannesmannröhren-Werke, Düsseldorf	77
Herstellung von Kessel- und Dampfrohren nach dem Ehrhardt-Verfahren. Von Generaldirektor Paul Thomas, Preß- und Walzwerk A.-G., Reisholz-Düsseldorf	88
Herstellung von Kessel- und Dampfrohren nach dem Stiefel-Verfahren und die Abhängig- keit der für Hochdruckkessel bestimmten Werkstoffe von der chemischen Zusammen- setzung. Erörterungsbeitrag nach Versuchen aus der Versuchsanstalt der Vereinigten Stahlwerke A.-G. Röhren- werke Düsseldorf, von Dipl.-Ing. G. Tichy	99
II. Prüfung der Kesselbaustoffe.	
Erfahrungen mit der Kerbschlagprobe bei der Abnahme von Kesselblechen und Kessel- trommeln. Von Dipl.-Ing. E. Helfrich, Rhein. Dampfkessel-Überwachungsverein, Düsseldorf	104
Vorschlag für die Abnahme von Kessel- und Dampfrohren. Von Oberingenieur E. Koch, I. G. Farbenindustrie A.-G., Ludwigshafen	108
III. Neuere deutsche und amerikanische Ansichten über den Einfluß des Speisewassers bei der Entstehung von interkristallinen Rissen in Nietnähten.	
Über die in Verbindungen von Kesselblechen auftretenden Laugenkonzentrationen. Von Prof. Dr.-Ing. e. h. R. Baumann, Stuttgart.	109
Entstehung interkristalliner Risse in Abwesenheit von Speisewasser. Von Prof. Dr.-Ing. e. h. R. Baumann, Stuttgart	116
Zwei wesentliche Ursachen für Laugenbrüchigkeit. Von F. B. Porter in Fort Worth, Texas.	119
Beitrag zur Theorie der Laugenbrüchigkeit. Von S. W. Parr und F. G. Straub, Illinois. Bearbeitet von Obering. Dr.-Ing. e. h. M. Guillaume, Ammoniakwerk Merseburg.	121
Ursachen und Verhinderung von Brüchigkeit bei Kesselblechen. Von S. B. Applebaum (Permutit Company), Diskussion der Schrift von S. W. Parr und F. G. Straub	138

IV. Schutz der Kesselwandung gegen Einflüsse des Kesselwassers.

Chemische Einwirkung des Kesselinhaltes auf Eisen.

Von Prof. Dr. A. Thiel, Marburg 141

Vor- und Nachteile der Erzeugung und Verwendung von Destillat zur Kesselspeisung.

Von Dr.-Ing. W. Otte, Essen-Ruhr 152

Gefahren der Anwesenheit von Kieselsäure im Rohwasser und im Kesselinhalt.

Von Dr. A. Splittgerber, I. G. Farbenindustrie A.-G., Wolfen 162

V. Betriebssicherheit der Höchstdruckkesselanlagen.

Von Direktor O. H. Hartmann, Cassel-Wilhelmshöhe 166

Druckfehlerberichtigung.

Seite 128, Zahlentafel 2 ist durch folgende Tabelle zu ersetzen:

Zahlentafel 2.

Analyse von Brunnenwässern, mit denen Kessel, die durch Sprödigkeit gerissen sind, gespeist wurden, in mg pro Liter.

	Bloomington III	Urbana and Champaign III	De Kalb III	Mc Henry County III	Watseka III	Paxton III	Sycamore III	Los Angeles, Kalif.	Dallas, Texas	Denver, Colo	Houston, Texas
Kalziumkarbonat	159	167	141	107	95,5	170	158	60,8	25,2	10,2	44,2
Magnesiumkarbonat	116,5	108,5	81	88,6	51,1	113,5	107	6,5	17,2	4,45	0
Natriumkarbonat	55	77,5	67,3	53,5	151	67,8	34	132	372	102	122
Natriumsulfat	0	1,7	1,4	0	14,2	40,5	2,7	98	204	25,5	0
Natriumchlorid	66	8	1,7	6,7	9,2	4,3	4,1	87,3	72	12	207
Eisenoxyd u. Aluminiumoxyd	2	1,7	1,2	9,1	1,6	0,5	2,9	—	—	0,8	0
Silizium	9,9	14	6,8	3,94	5,3	31,2	20,2	16,2	43	10,8	—
Gesamt feste Stoffe	450	396	306	274	343	475	333	—	830	166	—

Seite 136, Zeile 28 v. o. lies: 17 g statt 265 g.

Seite 136, Zeile 32 v. o. lies: 400 g statt 6000 g.

Seite 137, Zahlentafel 11 ist durch folgende Tabelle zu ersetzen:

Zahlentafel 11. Analysen des Speisewassers verschiedener Kessel in Milligramm pro Liter.

Umrechnungsfaktor: 1 grain per gallon = 17,1 mg/l	versprödet				nicht versprödet		
	Denver, Colo	Champaign III	Universität Illinois nicht behandelt	Bloomington III 1925	Chicago III behandelt	Universität Illinois behandelt	Illinois Central Railroad Champaign III
Ätznatron NaOH	3010	544	1025	34,2	482	376	565
Natriumkarbonat Na ₂ CO ₃	376	171	547	171	90,6	154	975
Totale Alkalinität als Natriumkarbonat	4380	890	1910	222	730	650	2980
Natriumsulfat Na ₂ SO ₄	1195	305	0	3420	1535	1540	188
Verhältnis: Natriumkarbonat zu Ätznatron	0,12	0,31	0,52	5,0	0,19	0,4	1,7
Verhältnis: Na-Sulfat zu Ätznatron	0,4	0,55	0,0	100,0	3,2	4,0	0,33
Verhältnis: Na-Sulfat + Na-Karbonat zu Ätznatron	0,52	0,87	0,52	105,0	3,4	4,5	2,06
Verhältnis: Na-Sulfat zu Total Alkalinität als Na-Karbonat	0,27	0,34	0,0	15,4	2,1	2,4	0,63

Sicherheit des Dampfkesselbetriebes.

I. Das Verhalten der Kesselbaustoffe im Betriebe und Fortschritte in ihrer Herstellung.

A. Kesselbleche.

Schäden am Kesselkörper und deren Ursachen.

Von Oberingenieur Dr.-Ing. e. h. M. Guillaume, Ammoniakwerk Merseburg.

Seit unserer letzten Hauptversammlung sind in den unserer Vereinigung angeschlossenen Kesselanlagen und auch an anderen Orten wieder zahlreiche Kesselschäden festgestellt worden. Daß die meisten vor Eintritt einer Explosion entdeckt werden konnten, ist in erster Linie dem Umstande zu verdanken, daß durch Bekanntgabe der Untersuchungsergebnisse früherer Schäden die Auffindung gefährdeter Kessel erleichtert und die Aufmerksamkeit der verantwortlichen Organe gesteigert worden ist. Unsere Mitglieder legen daher, in der Erkenntnis des großen Nutzens solcher Arbeiten in steigendem Maße Wert auf genaueste Prüfung der Kesselschäden.

Es versteht sich von selbst, daß die genaue Untersuchung eines Kesselschadens nur dann ihren Zweck erfüllt, wenn sie in bezug auf Sachlichkeit, Wissenschaftlichkeit und Unparteilichkeit höchsten Anforderungen genügt. Da es sich ferner dabei fast einzig und allein um die Eigenschaften und die Beanspruchung des Materials handelt, so kommen für solche Arbeiten in erster Linie die Staatlichen Materialprüfungsämter und diejenigen der Technischen Hochschulen in Frage. Seit einem Menschenalter leistet die Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart auf diesem Gebiete Bahnbrechendes. Die Lebensarbeit Bachs ist aufs innigste mit dieser Anstalt verknüpft. Im letzten Jahrzehnt ist außerdem noch das Staatliche Materialprüfungsamt Dahlem mit zahlreichen Gutachten hervorgetreten. Die durch Hunderte von Gutachten gewonnenen Erfahrungen verleihen den Gutachten dieser beiden Ämter höchstes Gewicht. Sie bilden daher die wichtigste Grundlage für die Erklärung und Verhütung von Kesselschäden.

Der Vereinigung liegen zur Zeit wieder eine größere Anzahl von Untersuchungsberichten dieser beiden Anstalten vor. In Erfüllung des mir gewordenen Auftrages gebe ich Ihnen heute einen kritischen Bericht über dreizehn solcher Gutachten, zur Bereicherung unserer Erfahrung und damit zur Verhütung weiterer Schäden. Zwar wäre es wünschenswert, jedes dieser Gutachten vollinhaltlich weitesten Kreisen bekannt zu geben, die kurze Zeit aber gestattet heute nur die Vorführung ihrer wichtigsten Ergebnisse. Der Bericht beschränkt sich daher darauf, das hervorzuheben, was die Erkenntnis über das Wesen, die Entstehung und Verhinderung der Nietlochrisse oder ähnlicher Rißerscheinungen fördert, die ja heute immer noch unsere Hauptsorge bilden. Die zahlreichen Abbildungen sind den Gutachten entnommen, teilweise ist der Text der Gutachten wörtlich angezogen. Durch Angabe des Aktenzeichens der einzelnen Berichte, ist eine Nachprüfung ermöglicht.

Obgleich es manchmal die Kennzeichnung und Beurteilung eines Schadens ganz wesentlich erleichtert, wenn Hersteller und Besitzer genannt werden, erfüllen wir doch auch heute wieder den häufig und nachdrücklich geäußerten Wunsch der Hersteller, und vermeiden nach Möglichkeit alle Angaben, die auf den Hersteller schließen lassen. Wenn wir uns diesem Wunsche fügen, so möchten wir doch nicht unterlassen, hervorzuheben, daß es zur Beurteilung der Ursachen mancher typischer Schäden notwendig ist, zu wissen, daß sie vorwiegend nur eine bestimmte Bauart betreffen, die unter gänzlich verschiedenen Betriebsbedingungen in einer Reihe von Werken versagt hat.

Seit der Hauptversammlung des Vereins Deutscher Ingenieure im Mai 1925 bewegt die Frage der Laugenbrüchigkeit in erheblichem Maße die Gemüter. Es ist verständlich, daß der eine oder andere Kesselhersteller seitdem geneigt ist, den Laugenangriff allein für die Schäden verantwortlich zu machen. Dabei wird aber übersehen, daß auch Herr Dr. Münzinger vor-

sichtig genug war, den Anteil, den minderwertiges Material, falsche Berechnung, übermäßige Beanspruchung, falsche Behandlung des Materials an den Kesselschäden gehabt haben und noch haben, in den Vordergrund zu stellen und lediglich auf die noch unbewiesene Möglichkeit einer Laugenschädigung hinzuweisen. Die Laugenbrüchigkeit ist unseren deutschen Forschern, wie die Veröffentlichungen zeigen, seit Jahren bekannt. Auch bei den Nietlochschäden wurde von ihnen diese Möglichkeit im stillen stets erwogen. Da aber durch die amerikanischen Veröffentlichungen die Laugenhypothese zur Zeit Gegenstand der Diskussion geworden ist, so haben wir auch bei dem folgenden Bericht zu prüfen, ob die Hypothese durch die darin besprochenen Schäden eine Stützung erfährt. Zugleich werden wir uns noch darüber zu unterrichten haben, ob und inwieweit die von Münzinger als Neuigkeit von Amerika mitgebrachte Auffassung der Kesselschäden im Laufe des letzten Jahres bereits wieder eine Wandlung erfahren hat.

1. Dreizehn Gutachten von Dahlem und Stuttgart.

Der Bericht Nr. I, erstattet von der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart am 22. Dezember 1925, bezieht sich auf einen Wasserkammerkessel mit zwei längsliegenden Oberkesseln.

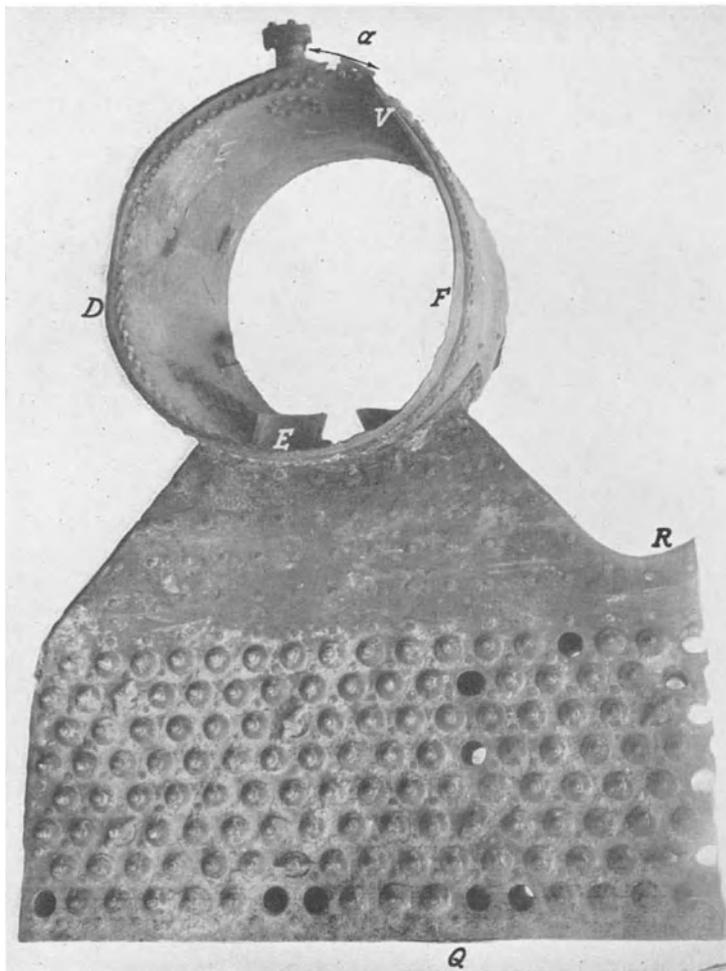


Abb. 1. Vorderer Mantelschuh und Wasserkammer, explodiert durch Herausfliegen des vorderen Bodens.

Seine Heizfläche ist 400 qm, der Betriebsdruck 14 atü. Gebaut ist er im Jahre 1913. Der Kessel explodierte im Betriebe, ohne daß von den verantwortlichen Stellen vorher Anzeichen eines bedrohlichen Zustandes bemerkt worden wären durch Abreißen des vorderen Bodens in der Krempe am linken Oberkessel.

Abb. 1 zeigt die Bruchstelle. Der Boden ist bis auf ein kleines Stück *a* rund herum in der Krempe abgerissen. Die Prüfungsanstalt stellt folgendes fest:

Das Material des Bodens ergab eine Festigkeit von 3708 kg/qcm bei einer Bruchdehnung von 26,5% im Einlieferungszustand, genügte also den gesetzlichen Anforderungen. Auch die Kerbzähigkeit im mittleren Bodenteil genügte.

Der Halbmesser der Krempe wurde, soweit dies noch möglich war, zu etwa 35 mm ermittelt. Es handelt sich also um einen Boden, der nach den heutigen Anschauungen einen viel zu kleinen Krempenradius besaß und daher in der Krempe in unzulässiger Weise beansprucht war.

Bei der Besichtigung der Bruchstelle ergab sich außerdem, daß in der Krempensohle rund herum im wasserberührten Teil tiefe Furchen eingefressen waren; in einer dieser Furchen

riß der Boden auf, nachdem das Material bis auf wenige Millimeter herausgefressen war (Abb. 2). Die Furchen waren von einer nichtmetallischen Masse ausgefüllt.

Das Materialprüfungsamt faßt seine Ansicht über die Ursache des Unfalls wie folgt zusammen: „Als Ursache des Unfalls dürfte die viel zu geringe Größe des Krempenhalbmessers anzusehen sein, doch scheint das Eintreten des Bruches durch die Anrostungen im wasserberührten Teil des Bodens beschleunigt worden zu sein.“

Zu den am Boden beobachteten zahlreichen örtlichen Anfressungen, die teilweise ineinander übergangen und ins Material eindringen, ist folgendes zu sagen: Es handelt sich dabei um Korrosionen, veranlaßt durch das Speisewasser. Erfahrungsgemäß greifen die Korrosionen an den Stellen höchster Beanspruchung am ehesten an, sie folgen dann den durch die Überschreitung der Streckgrenze entstandenen Gleitlinien, in denen das Gefüge gelockert ist. Unter vollständiger Auflösung des Metalls dringt die angreifende Flüssigkeit immer tiefer, bis schließlich der Bruch erfolgt. Eine Vergrößerung des Bruchgefüges zeigt deutlich, daß hier die typischen feinen interkristallinen Haarrisse, wie sie bei Bildern von Nietlochrissen üblich sind, nicht vorhanden sind.

Die nun folgenden acht Berichte beziehen sich sämtlich auf Wasserkammerkessel mit längsliegenden Oberkesseln. Diese Kessel, an verschiedenen Orten und unter verschiedenen Bedingungen betrieben, sind durch Nietlochrisse an der Verbindung eines Kammer-

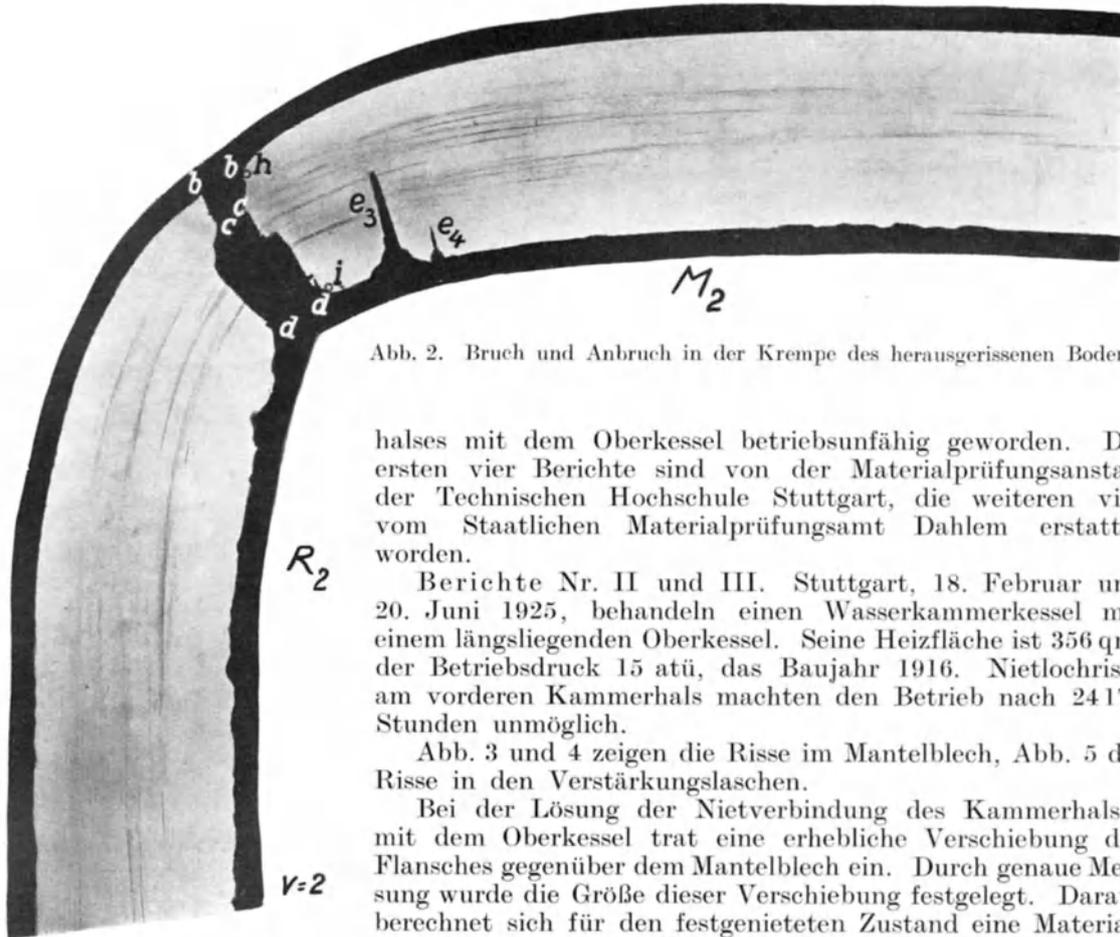


Abb. 2. Bruch und Anbruch in der Krempe des herausgerissenen Bodens.

halses mit dem Oberkessel betriebsunfähig geworden. Die ersten vier Berichte sind von der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart, die weiteren vier vom Staatlichen Materialprüfungsamt Dahlem erstattet worden.

Berichte Nr. II und III. Stuttgart, 18. Februar und 20. Juni 1925, behandeln einen Wasserkammerkessel mit einem längsliegenden Oberkessel. Seine Heizfläche ist 356 qm, der Betriebsdruck 15 atü, das Baujahr 1916. Nietlochrisse am vorderen Kammerhals machten den Betrieb nach 24176 Stunden unmöglich.

Abb. 3 und 4 zeigen die Risse im Mantelblech, Abb. 5 die Risse in den Verstärkungslaschen.

Bei der Lösung der Nietverbindung des Kammerhalses mit dem Oberkessel trat eine erhebliche Verschiebung des Flansches gegenüber dem Mantelblech ein. Durch genaue Messung wurde die Größe dieser Verschiebung festgelegt. Daraus berechnet sich für den festgenieteten Zustand eine Materialspannung an 6 Meßstellen von 108—1240 kg/qcm. Diese er-

heblichen Spannungen vermehren als zusätzliche Spannungen die Beanspruchung durch den inneren Überdruck. Sie sind trotz ihrer Größe in der Berechnung der Materialstärken nicht berücksichtigt worden.

Die Festigkeitsprüfung des Mantelbleches ergab:

im Einlieferungszustand	3201 kg/qcm,
im ausgeglühten Zustand	3303 kg/qcm.

Die Zugfestigkeit liegt also auch beim ausgeglühten Blech unter der gesetzlich vorgeschriebenen Mindestfestigkeit von 3400 kg/qcm.

Dem prüfenden Revisionsverein ist bei der Abnahme des Kessels ein Werksattest über die Erreichung dieser Mindestgrenze vorgelegt worden. Wieder ein Beweis für die geringe Zuverlässigkeit der Werksatteste.

Die Kerbzähigkeit im vollen Blech ist:

eingeliefert	2,3 mkg/qcm,
ausgeglüht	19,1 mkg/qcm.

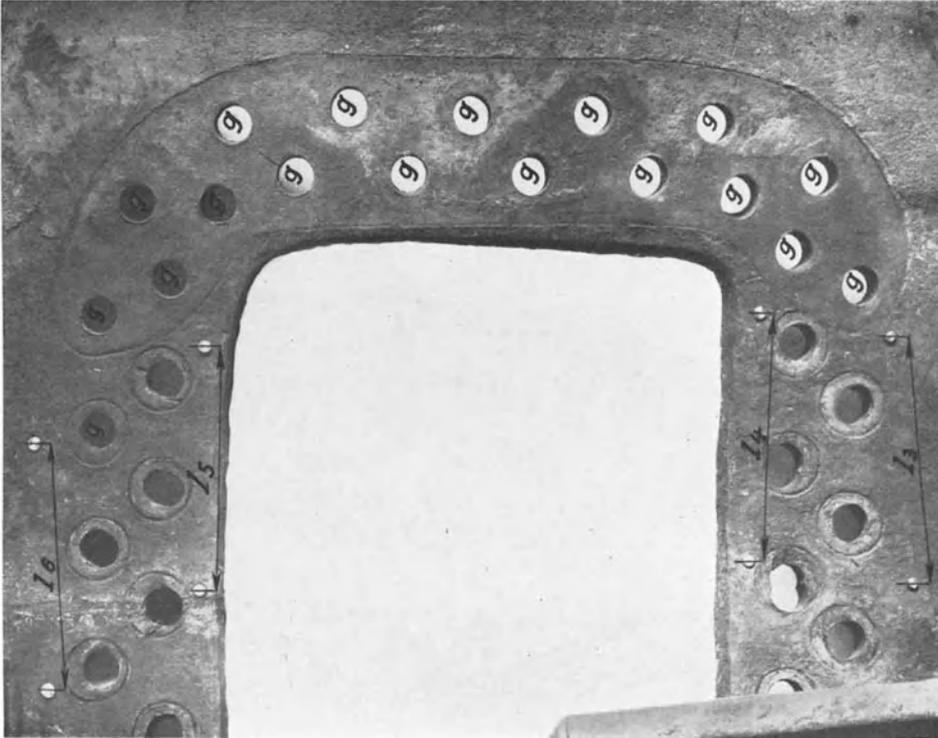


Abb. 4. Mantelblech, Kammerausschnitt.

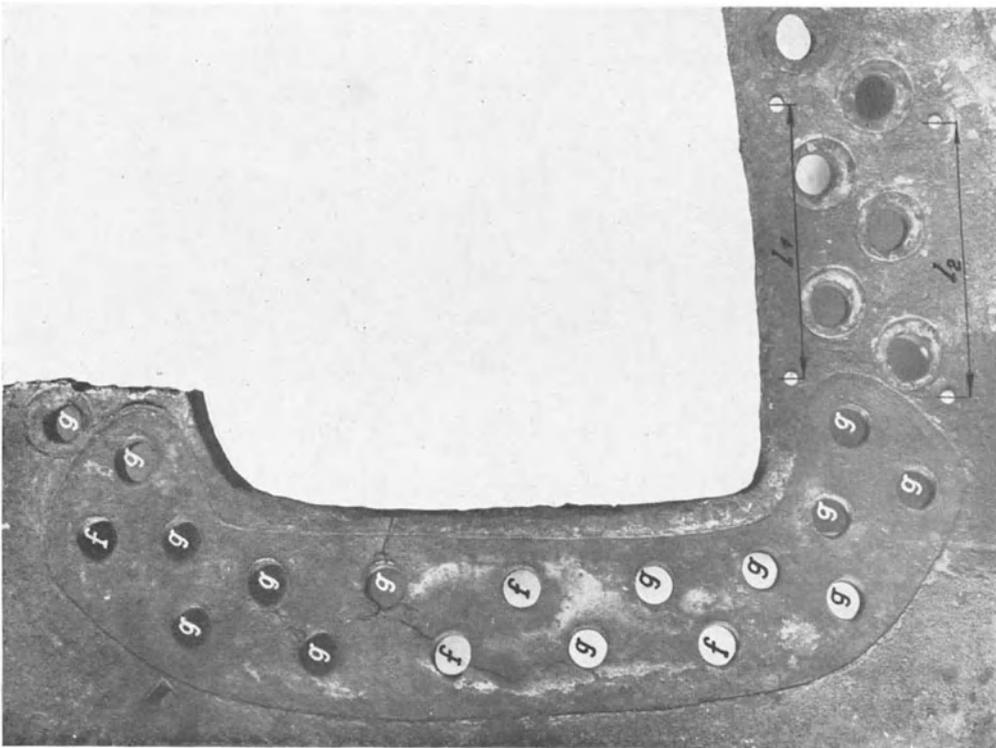


Abb. 3. Mantelblech, Kammerausschnitt.

Die Zähigkeit des Bleches ist also außerordentlich gering. Die Verstärkungslaschen wiesen noch geringere Zähigkeitswerte auf.

Das Mantelblech zeigt am Rande des Ausschnittes für den Kammerhals Einbeulungen von kräftigen Hammerschlägen bei der Anpassung des Bleches (Abb. 6 und 7).

Die Risse im Mantelblech verlaufen, wie Abb. 8 zeigt, teils radial vom Nietloch aus, teils gehen sie von den Ecken des Ausschnittes aus.

Abb. 9 zeigt tiefe Stemmfurchen um die Nietköpfe, Abb. 10 desgleichen. Abb. 10 läßt außerdem die hierdurch hervorgerufene Verquetschung des Materials erkennen.



Abb. 5a. Wasserberührte Fläche.

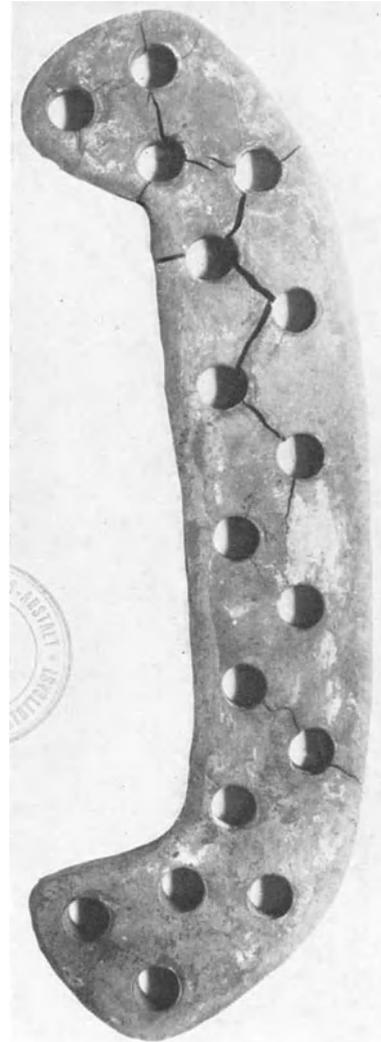


Abb. 5b. Berührungsfläche mit dem Mantelblech.

Abb. 5a, b. Verstärkungslasche.

Das Gefüge des Mantelbleches ist reichlich grobkörnig und enthält zahlreiche größere und kleinere punktförmige nichtmetallische Einschlüsse.

Auch an den Nietlochwänden der Mantelbleche sind starke Verquetschungen des Materials und Umbiegung der Schichten festzustellen.

Die Flanschenfläche des Halses stand nur stellenweise mit dem Mantelblech in Berührung. Am Umfang mußten stellenweise klaffende Fugen durch kräftiges Verstemmen geschlossen werden. Ebenso mußte auch die Kante des Mantelbleches bearbeitet werden. Stellenweise hat sich hierdurch eine Schicht losgelöst (Abb. 11, 12, 13, 14).

Auch die Verstärkungslaschen haben beim Anrichten kräftige Hammerschläge erhalten. Die linke Lasche zeigt außerdem Eisenkörner von solcher Größe und Gestalt, daß ungünstige Wärmebehandlung stattgefunden haben muß.

Das Amt schließt mit dem Urteil, daß ungünstige Materialbeschaffenheit, unsachgemäße Bearbeitung und übermäßige Beanspruchungen als Ursache der Risse anzusehen sind.

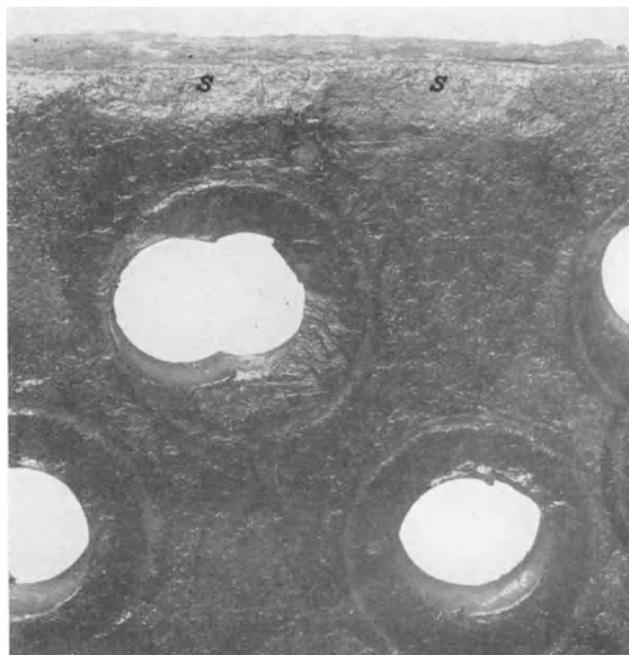
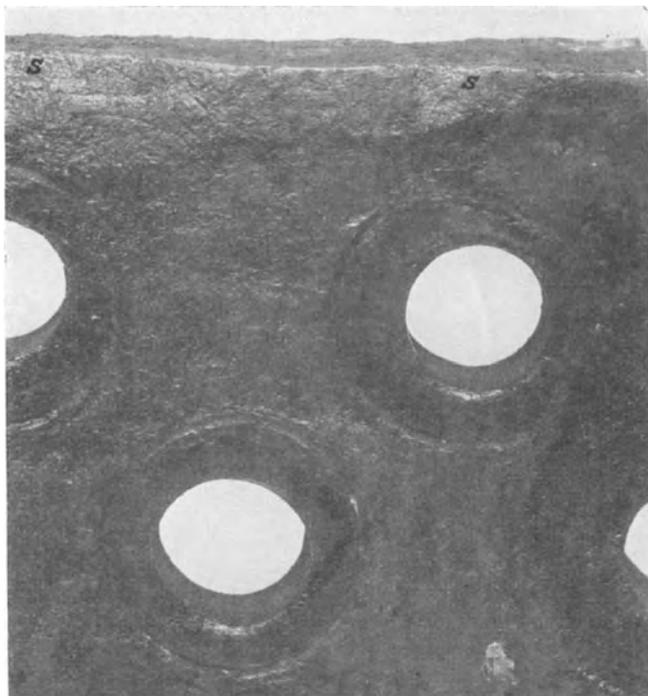


Abb. 6a, b. Einbeulungen (s), von Hammerschlägen herrührend.

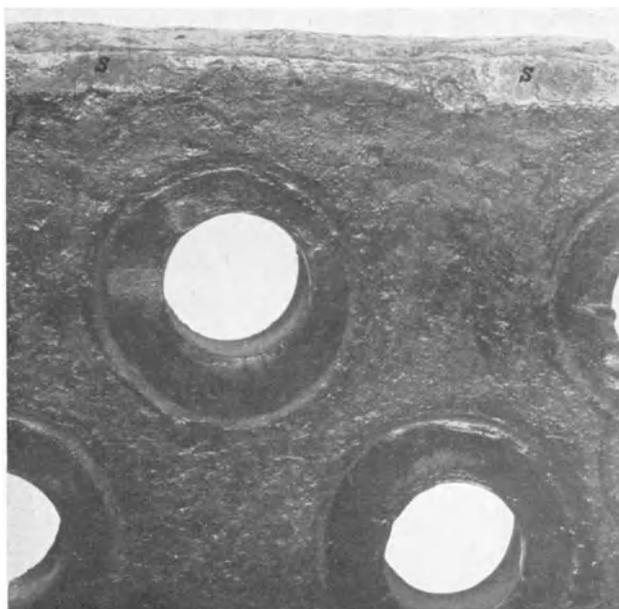
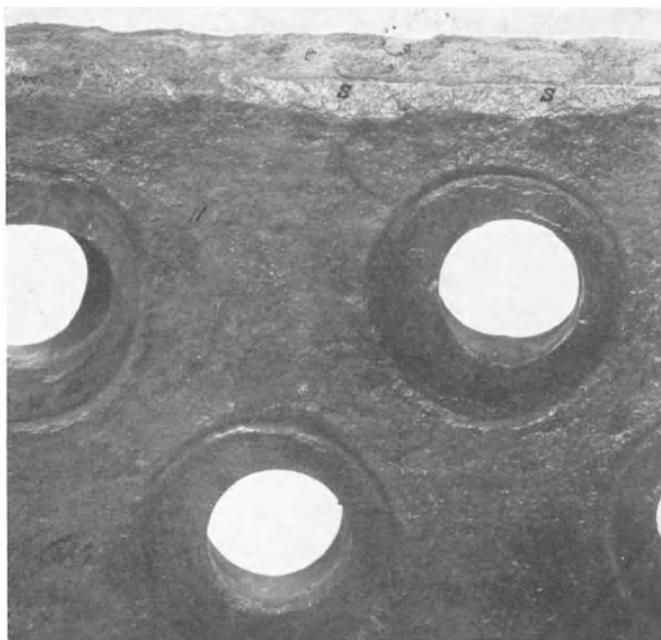


Abb. 7a, b. Einbeulungen (s), von Hammerschlägen herrührend.

Bericht Nr. IV, Stuttgart, 28. Juli 1926, bezieht sich auf einen Wasserkammerkessel mit zwei längs liegenden Oberkesseln, aus der Nachkriegszeit. Nietlochrisse sind an der Verbindung des linken vorderen Kammerhalses mit dem linken Oberkessel eingetreten und haben einen Weiterbetrieb unmöglich gemacht. ...

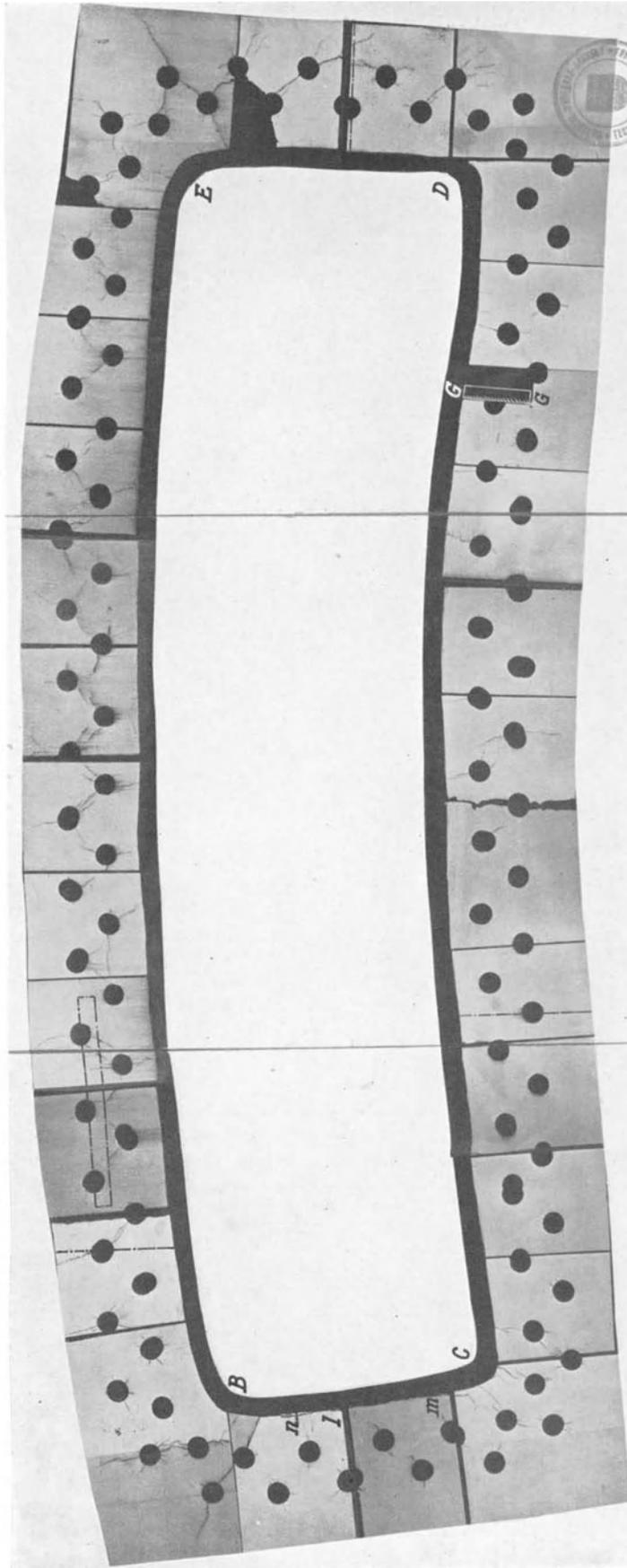


Abb. 8. Mantelblech am Kammerrausschnitt, zerlegt, gehobelt. Nietlochrisse und Risse von den Ecken des Ausschnittes.

Im Juli 1924 wurde am linken Oberkessel an der Nietlochverbindung mit dem vorderen Kammerhals ein Blechriß und Nietlochrisse festgestellt. Die krank erscheinende Stelle erhielt eine Verstärkungsflasche. Beide Oberkessel wurden außerdem gegen etwaige Stichflam-



Abb. 9. Stemmfurchen um die Nietköpfe der Verstärkungsflasche.

meneinwirkung durch einen etwa 20 cm starken Schamottesteinmantel geschützt. Die Wasserkammern wurden durch Abmauerung auf der Feuerseite geschützt.

Ende Januar 1925 wurde der Kessel wieder in Betrieb genommen und hat bis 20. März 1926 5376 Betriebsstunden geleistet. Gelegentlich einer Wasserdruckprobe wurden zu dieser Zeit Undichtigkeiten fest-

gestellt an der Verbindung zwischen Wasserkammer und Oberkessel Feuerseite, die durch Verstemmen nicht zu beseitigen waren. Bei näherer Untersuchung ergab sich eine sehr weitgehende Schädigung durch Nietlochrisse.



Abb. 11. Stemmkannte.

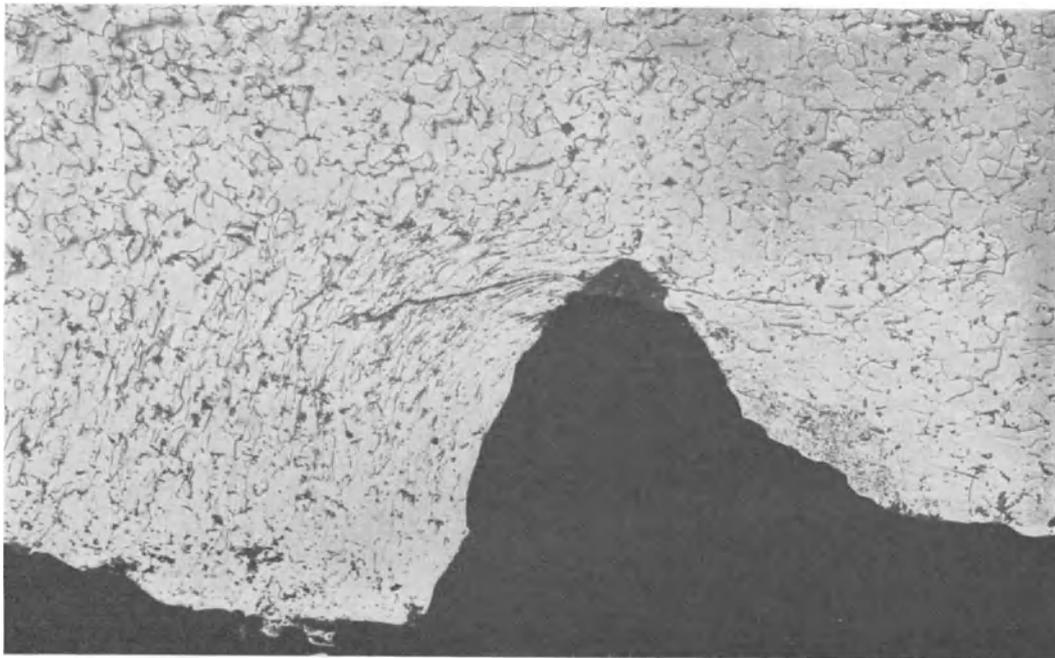


Abb. 10b. Stelle *b* (Abb. 10a) 50fach vergrößert;
Materialverquetschung.

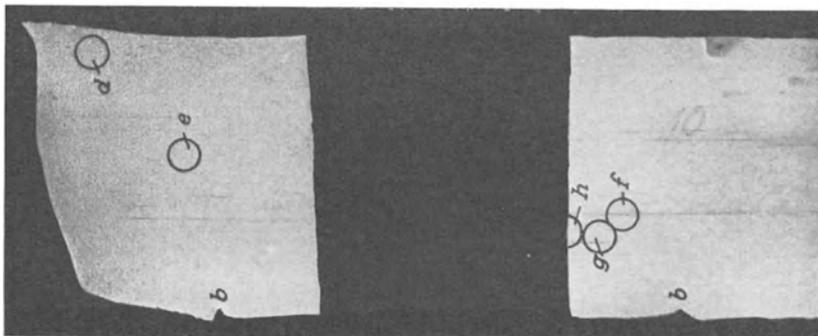


Abb. 10a. Stemmfurche um
den Nietkopf (*b, b*).

1. Der auf der Feuerseite befindliche Kammerhals war an zwei Stellen zwischen den Nieten bis gegen die Kammerwand hin aufgerissen.

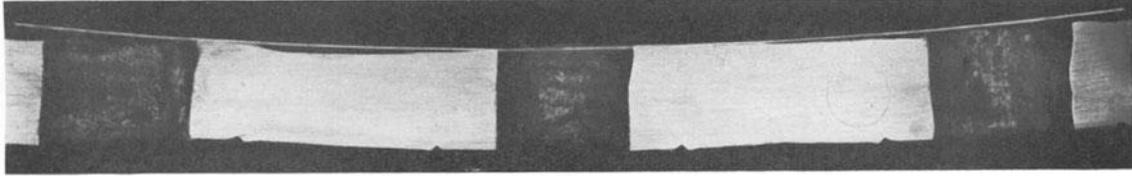
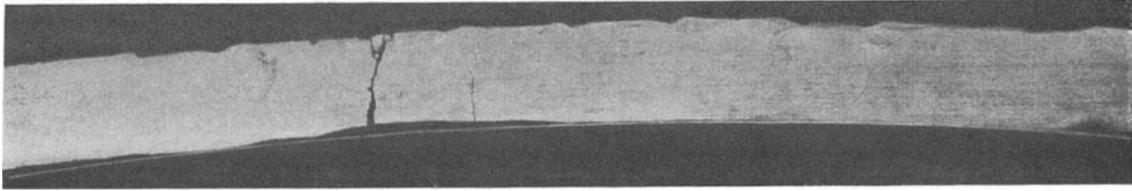


Abb. 14 a, b. Mangelhafte Anrichtarbeit.

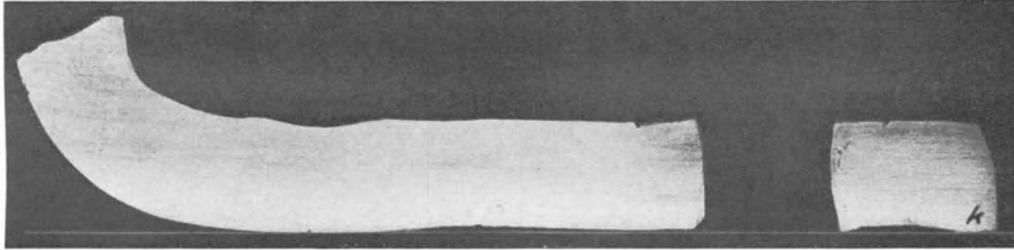


Abb. 13 a, b. Mangelhafte Anrichtarbeit.

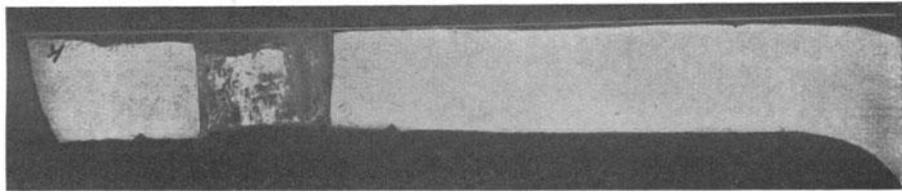
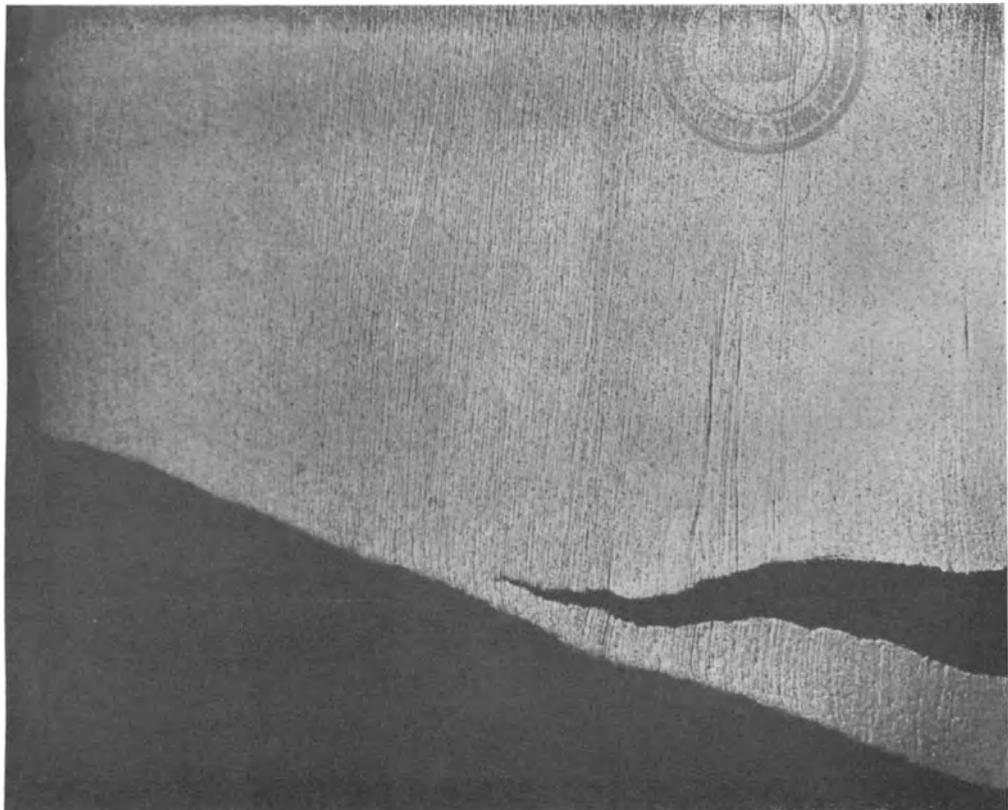


Abb. 12. Abgesprungenes Material an einer Stemmkante. V = 8.



2. Am letzten Niet des Flickens zeigte das Mantelblech einen Riß. Nachdem hierauf an verschiedenen Stellen der Lasche Nieten herausgeschlagen und die Nietlöcher poliert waren, ergaben sich:

3. an verschiedenen Stellen weitklaffende Risse im Mantelblech und in der Lasche, die ohne Lupe mit bloßem Auge sichtbar sind.

4. An der vorderen rechten Ecke der Schweißnaht der Wasserkammer befindet sich ein Riß von 30—40 mm Länge.

Ein mit Schweißbrenner abgetrennter Abschnitt der schadhafte Stelle wurde der Materialprüfungsanstalt Stuttgart übergeben. Das Amt kommt zu folgenden Beanstandungen:

1. Die Zugfestigkeit des Mantelbleches betrug 3321 kg/qcm, die Bruchdehnung 25,6%.

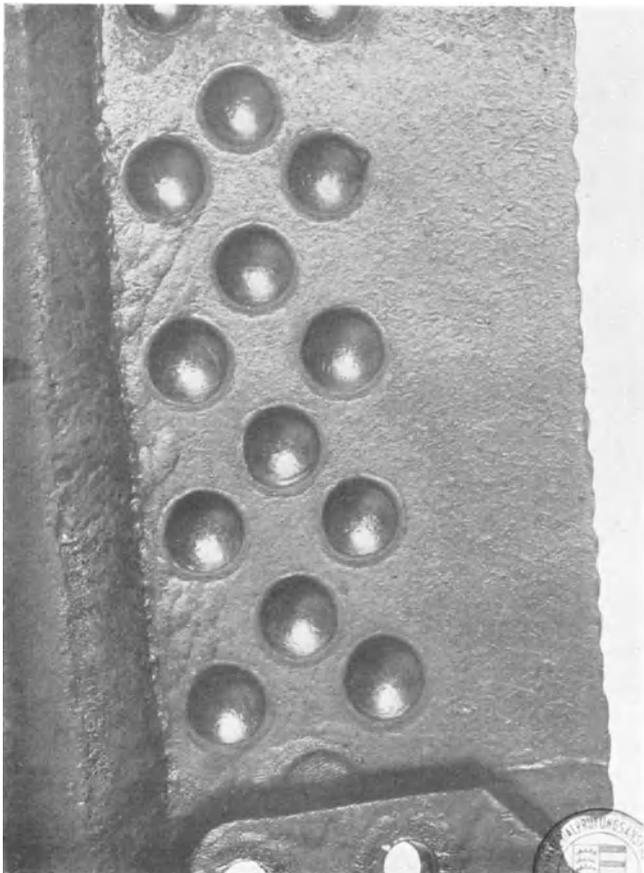


Abb. 15. Hammerhiebe (Mantelblech).

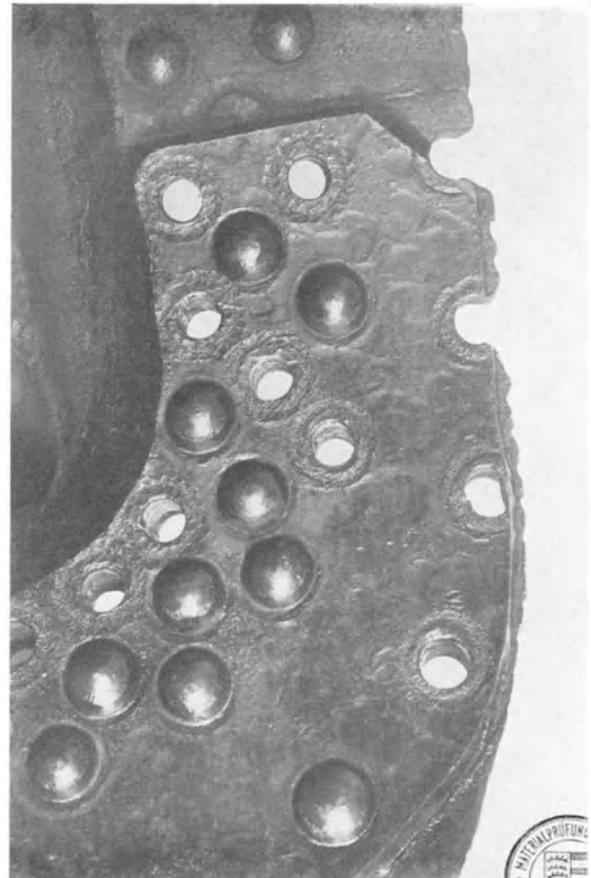


Abb. 16. Hammerhiebe (Verstärkungslasche).

Beide Werte lagen unterhalb der vom Gesetz verlangten Mindestwerte. Die Bleche waren mit Werksattest angeliefert worden und waren keiner Sachverständigenprüfung unterzogen.

Die Kerbzähigkeit ist in den Oberflächenschichten gering. Jedoch konnten im Gebiet der Nietnaht keine Kerbproben entnommen werden, da das Blech dort voller Risse war.

2. Das Mantelblech sowie die Verstärkungslasche zeigten zahlreiche Hammerhiebe (Abb. 15 und 16).

3. Wie stark die Nietlochrisse waren, zeigen die Abb. 17, 18 und 19. Es ist ganz besonders bemerkenswert, daß die Verstärkungslasche bereits nach der kurzen Betriebszeit von ~ 6000 Stunden so zahlreiche Risse zeigte.

Die folgenden fünf Abb. 20, 21, 22, 23 und 24 zeigen Schnitte durch die Verbindungsnaht. Sie dürfen als Schulbeispiele von Nietverbindungen gelten, die infolge ihrer mangelhaften Ausführung ihren Zweck nicht erfüllen und zu weitgehender Schädigung des Bleches geführt haben. Die Ausfüllung der Ecke mittels Schweißung ist als letztes Mittel versucht worden, um die Undichtigkeit der Verbindungsstelle zu beseitigen. Daß die hohe Temperatur, die das Blech beim Schweißen angenommen hat, zu einer weitgehenden Veränderung und Verschlechterung des Materials geführt hat, zeigen die groben Eisenkörner der Abb. 25a.

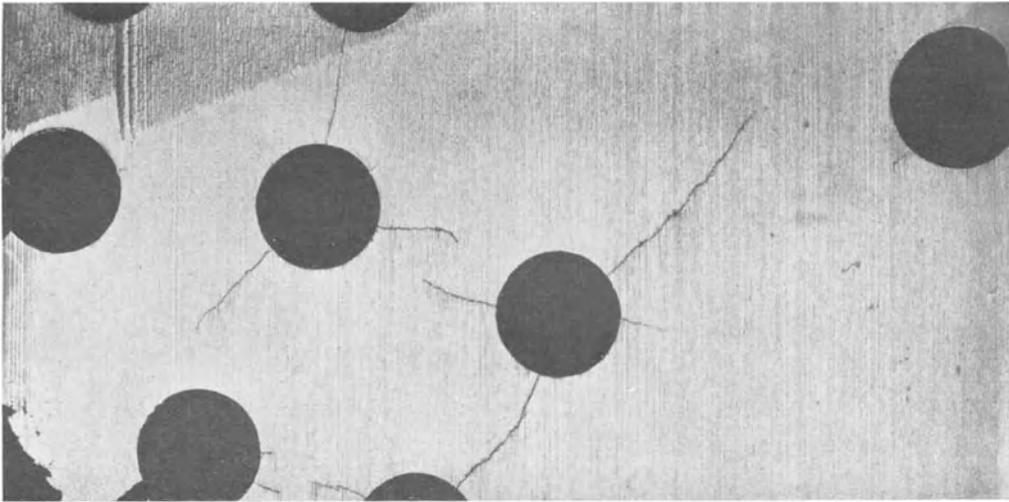


Abb. 19. Nietlochriss der Verstärkungslasche.

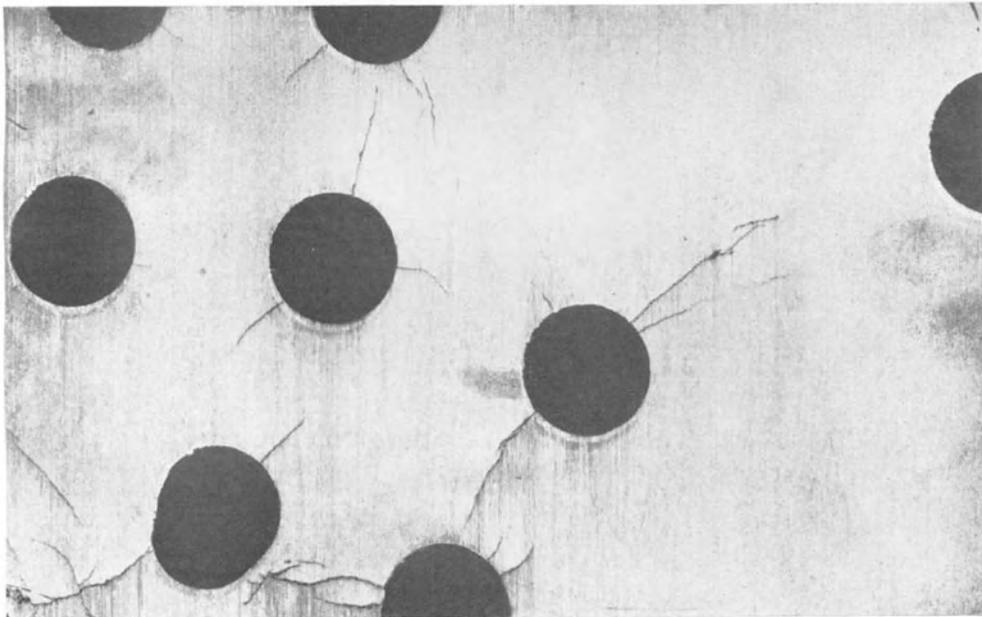


Abb. 18. Starke Nietlochriss im Mantelblech (Berührungsfläche mit dem Kammerflansch).

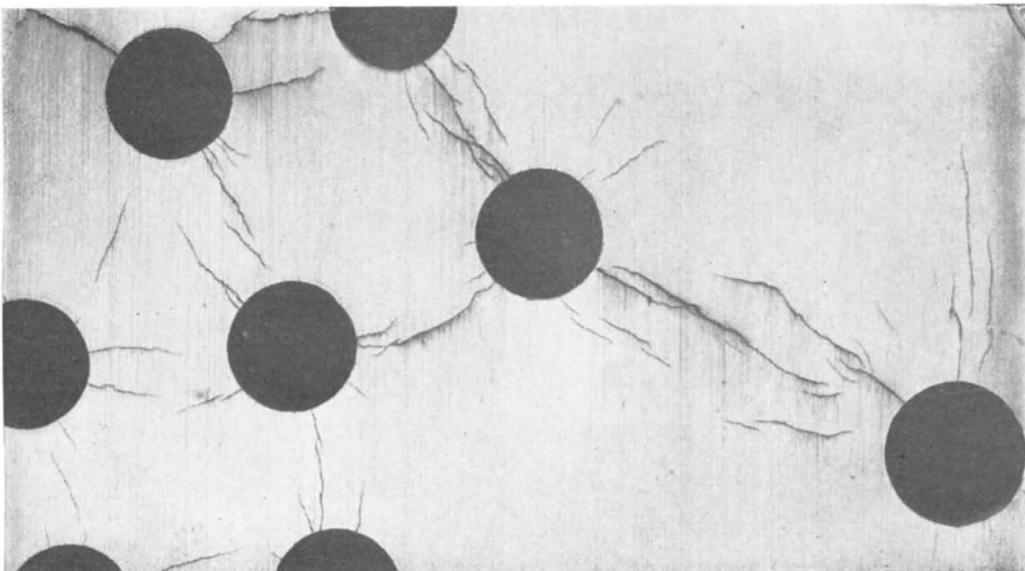


Abb. 17. Starke Nietlochriss im Mantelblech (Berührungsfläche mit der Verstärkungslasche).

Minderwertige Materialeigenschaften, ungünstige Wärmebehandlung, Quetschung des Gefüges durch Nietdruck, unsachgemäße Anpaßarbeit sind nach Ansicht des Amtes die Ursachen der Risse.

Bericht Nr. V, Stuttgart, 10. Oktober 1925, behandelt einen Wasserkammerkessel mit zwei längsliegenden Oberkesseln. Die Heizfläche ist 615 qm, der Betriebsdruck 16 atü, das Baujahr 1921. Nietlochrisse an den Verbindungen der vorderen Kammerhälfte mit den Oberkesseln setzten den Kessel außer Betrieb.

Bereits 1922 traten in den Rundnähten beider Oberkessel und an den Flanschen der beiden Kammerhälfte Undichtigkeiten auf, die durch Verstemmen nicht zu beseitigen waren. Bei der genauen Prüfung einer Anzahl Nietlöcher Anfang April 1925 wurden in den Mantelblechen, den Halsflanschen und den Verstärkungslaschen Risse festgestellt, die einen Weiterbetrieb des

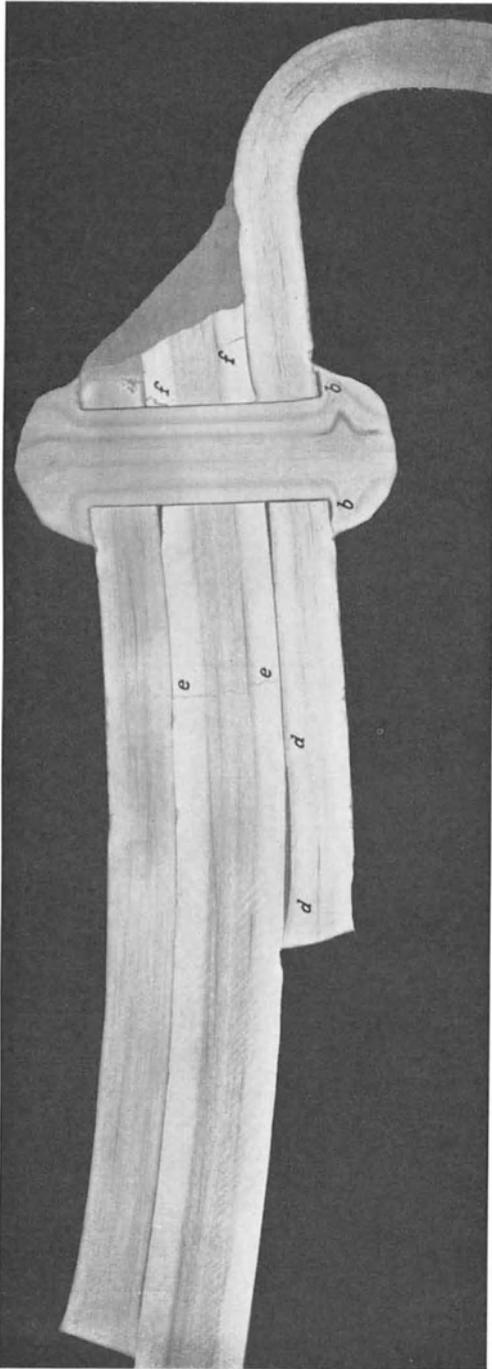


Abb. 20. Mangelhafte Nietverbindung.

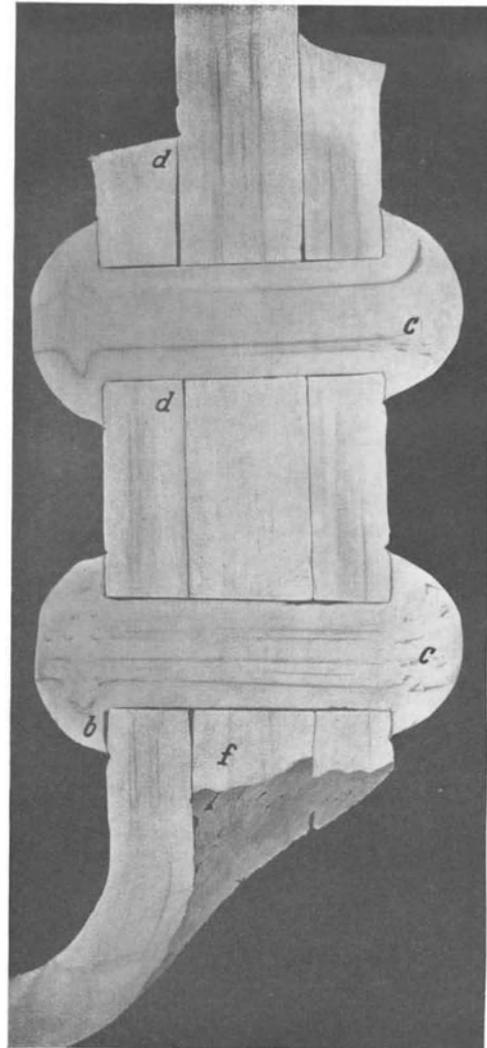


Abb. 21. Mangelhafte Nietverbindung und Anpaßarbeit.

Kessels nicht mehr zuließen. Bei der Untersuchung der beschädigten Kesselteile wurden folgende Feststellungen gemacht:

1. Zerreißproben an den Mantelblechen und Laschen in ausgeglühtem Zustande ergaben zwar eine den gesetzlichen Bestimmungen genügende Festigkeit, aber eine ungenügende Bruchdehnung. Die Kerbzähigkeit im Gebiet der Nietnähte, insbesondere bei den Laschen und Halsen, war, wie an gerissenen Nähten fast stets beobachtet, sehr gering.

2. Abb. 25b zeigt die Natur, Stärke und Häufigkeit der Risse im Mantelblech.

3. An den Stemmkannten der Ausschnitte des Mantelbleches und an den Verstärkungs-laschen zeigen sich starke Wülste, die durch kräftiges Bearbeiten der Stemmkannten erzeugt werden mußten, um die zwischen Mantelblech und Flanschenfläche klaffenden Fugen zu schließen (Abb. 26).

4. Die untersuchten Nietlöcher des Mantelbleches (Nietnähte für Wasserkammerhalse) waren auf der Mantelaußenseite oval derart, daß sie gegen die Stemmkannte hin erweitert waren. In dem aufgeweiteten Teil der Loch-

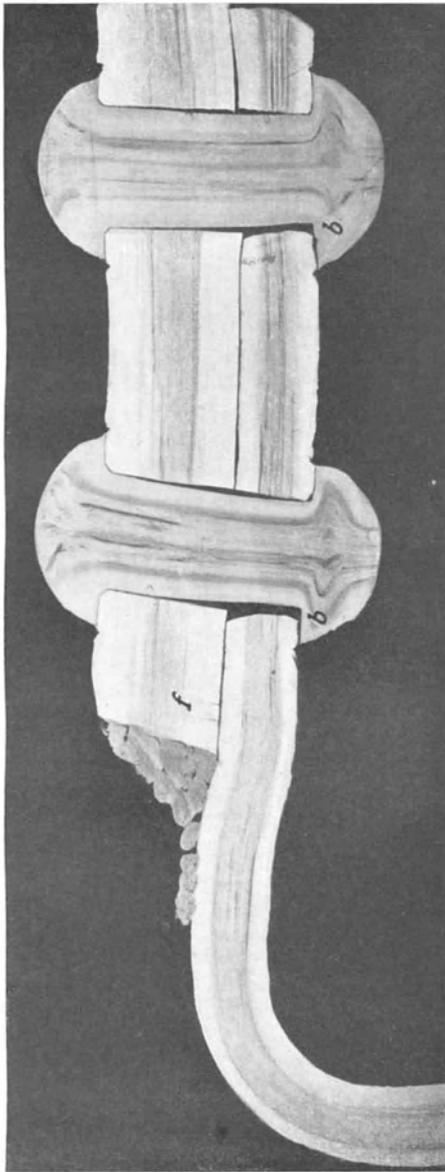


Abb. 22. Besonders schlechte Nietung.

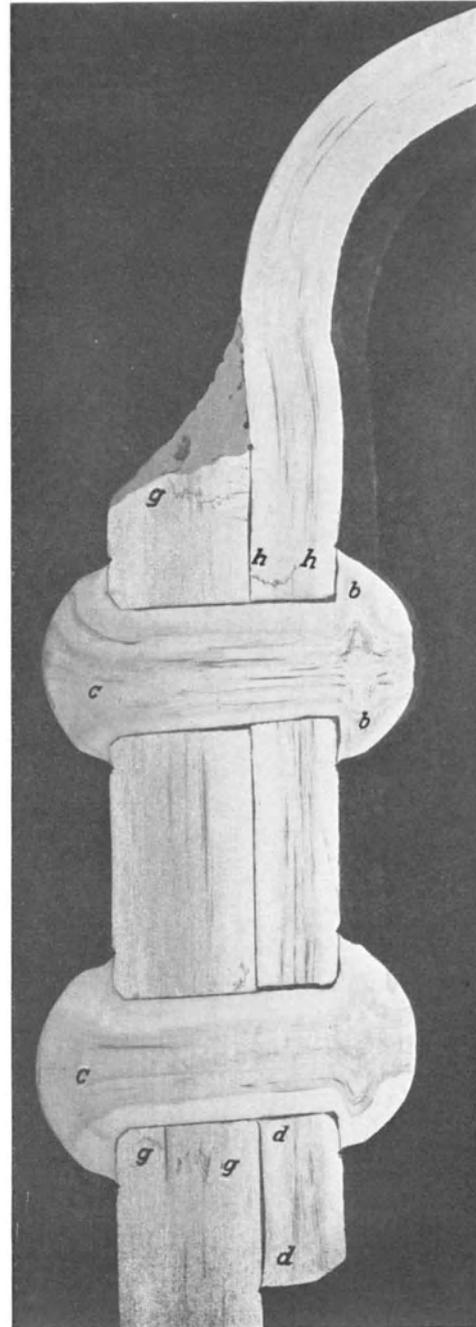


Abb. 23. Mangelhafte Nietverbindung.

leibung war das Gefüge gequetscht (Abb. 27). Diese Quetschung ist nachweisbar die Einwirkung von Kräften, die durch Wärmedehnungen entstanden sind.

5. Das Gefüge des Mantelbleches zeigt stellenweise Eisenkörner von beträchtlicher Größe und zahlreiche nichtmetallische Einschlüsse, gleichzeitig im Gebiet der Nietnähte Gleitlinien in den Körnern, die nur bei starker Beanspruchung aufzutreten pflegen (Abb. 28, 29).

6. Die Risse in den Nähten am Kammerhalse verlaufen größtenteils längs der Kornfugen (Abb. 30).

7. Die Wasserkammerhäse weisen in der Mitte je einer der Breitseiten parallel zur Halsachse eine überlappte Schweißnaht auf, bei der die Materialverschwächung bemerkenswert ist (Abb. 31).

An dem Flansch des linken Wasserkammerhalses wurde festgestellt, daß im Gebiet einer der Abrundungen (Ecken) auf der Flanschenfläche größere und kleinere Blechstücke aufgeschweißt worden sind. Vermutlich ist der Flansch bei der Herstellung an dieser Stelle verschweißt worden. Diese Schweißverbindung ist stellenweise sehr mangelhaft (Abb. 32).

8. In den Schmalseiten des rechten Wasserkammerhalses fanden sich zahlreiche von der Außenseite ausgehende Risse. Ein Teil derselben ist durch Zuschweißen an der Oberfläche auf mehr oder weniger große Tiefe geschlossen worden. Dieses Verschmelzen dürfte vor Inbetriebnahme des Kessels stattgefunden haben (Abb. 33, 34).

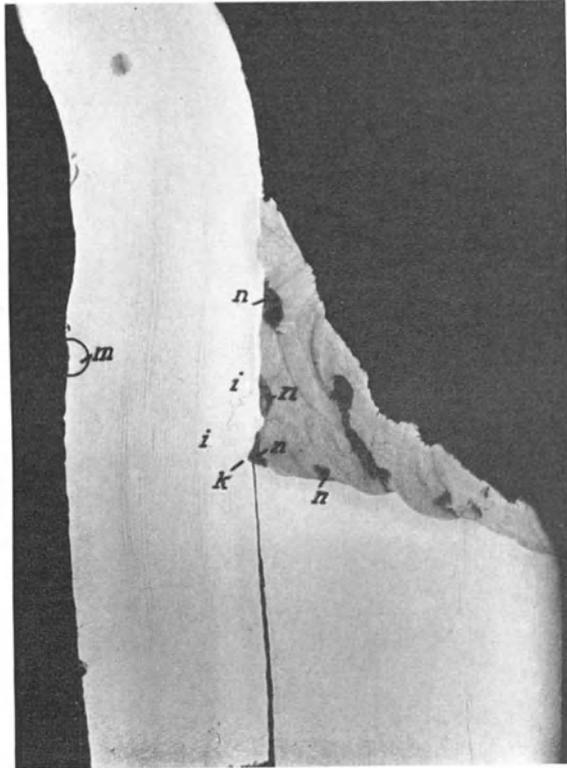


Abb. 24. Schweißung der Stemmfurche zwecks Dichtung der Nietnaht.

9. Das Gefüge des Materials der Flanschen erweist sich stellenweise als sehr grobkörnig (Abb. 35, 36).

10. Die Lage der Risse in den Flanschenflächen stimmt mit der Lage der Schweißstellen überein.

11. Die Abb. 37 und 38 zeigen die starken Unregelmäßigkeiten in der Formgebung der Flanschenflächen. Ein gutes Aufeinanderpassen der Flächen hat nicht stattgefunden, ein dichter Abschluß war nur durch gewaltsame Bearbeitung möglich.

12. In den hohlen Stellen befanden sich Rückstände, die teilweise laugenartig waren (NaOH). Sie haben für die Ribbildung keine Bedeutung, weil an den gerissenen Stellen laugenartige Rückstände nicht vorhanden waren.

Die Materialprüfungsanstalt Stuttgart stellt in den besprochenen vier Gutachten fest, daß

1. das Material nicht einmal die behördliche festgelegte Mindestzugfestigkeit und Bruchdehnung besaß,

2. an den gerissenen Stellen das Material weitgehend geschädigt worden ist,

a) durch unsachgemäßes Bearbeiten, wie hohen Nietdruck, Verstemmen, Hammer-schläge,

b) durch unzulässig hohe Beanspruchung teilweise infolge von zusätzlicher Spannung,

durch mangelhafte Formgebung und Zwang beim Zusammenbau,

c) durch falsche Wärmebehandlung.

Dadurch scheint dem Amt eine ausreichende Erklärung der Nietlochrisse gegeben. Laugenreste in den Nietnähten konnten entweder nicht nachgewiesen werden oder, wo sie vorhanden waren, waren keine Risse eingetreten. Die Mitwirkung der Lauge anzunehmen, liegt also kein zwingender Grund vor.

Die nächsten vier Berichte sind vom Staatlichen Materialprüfungsamt Dahlem erstattet. Sie beziehen sich, wie oben schon bemerkt, ebenfalls auf Nietlochschäden der Verbindung des Kammerhalses mit dem Oberkessel.

Bericht Nr. VI, Dahlem, 20. November 1924. Nr. 94394, Abt. IIIc Nr. 2491a, Wasserkammerkessel mit längsliegender Oberkessel, Heizfläche 391 qm, Betriebsdruck 20 atü, 1916 gebaut. Nietlochriss in der Verbindung des hinteren Kammerhalses mit dem Oberkessel.

Das zur Untersuchung eingesandte Stutzenstück erwies sich als kohlenstoffarmes Flußeisen mit der üblichen Zonenbildung infolge Seigerung. Die Durchschnittsanalyse ergab sehr hohen Phosphor- und reichlichen Schwefelgehalt. Beide übersteigen das im Kesselbau als zulässig angesehene Maß erheblich, besonders in der geseigerten Kernzone.

Der Stutzen ist in der Längsrichtung geschweißt, die Schweißung ist überlappt ausgeführt. Im Flansch weist die äußere Oberfläche innerhalb der Schweißung feine Anrisse auf.

Die Nietlöcher sind gebohrt und zum Teil länglich aufgeweitet (gedornt). Von den Nietlöchern gehen strahlenförmig gröbere und feinere Risse aus. Die Risse sind als feine Haarrisse an den Rändern der Nietlöcher bzw. auf den Lochwandungen entstanden; ihr Ausgangspunkt ist überwiegend der Nietlochrand an der Auflagefläche des Flansches. Von der Rißbildung sind fast alle Löcher des Flansches betroffen (Abb. 39).

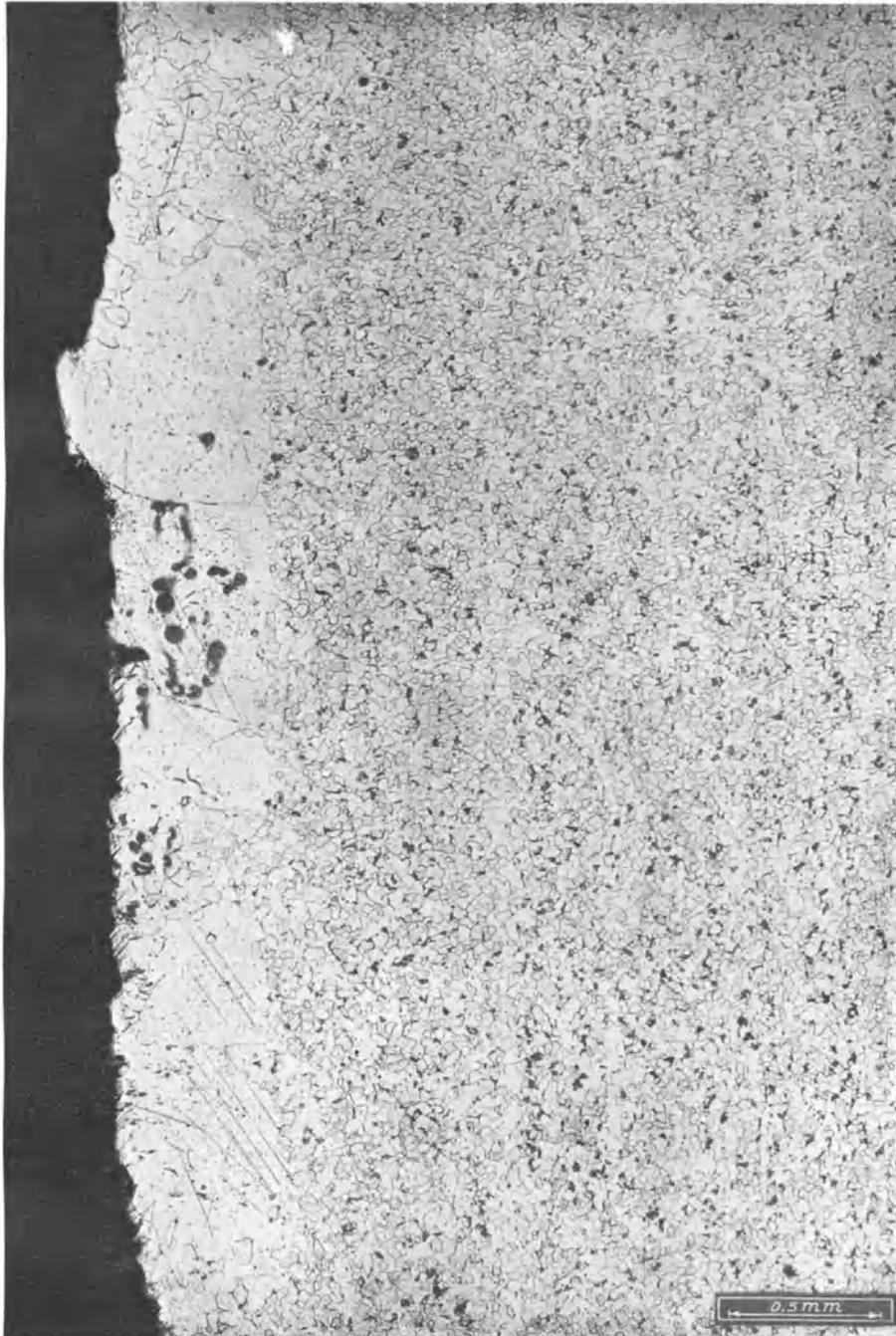


Abb. 25a. Grobes Korngefüge infolge der hohen Schweißtemperatur.

Auf der äußeren Flanschenoberfläche laufen rings um die Nietlöcher scharfkantige Rillen; bei einzelnen Löchern ist das Blechmaterial innerhalb der Rillen gequetscht. Die Auflagefläche des Flansches zeigt um die Nietverbindung eine kräftige Stemmfurche. In beiden Fällen ist die Flanschenoberfläche empfindlich verletzt.

Der Flanschenrand ist kalt an die Kesselwandung angerichtet. An der Stemmkante ist

die Auflagefläche des Flansches stellenweise eingerissen. Die Risse sind eine Folge übermäßigen Verstemmens der Stemm-
kante.

Das für den Stutzen verwendete Blechmaterial weist nach dem Glühen, also im ursprünglichen Zustand, infolge seiner

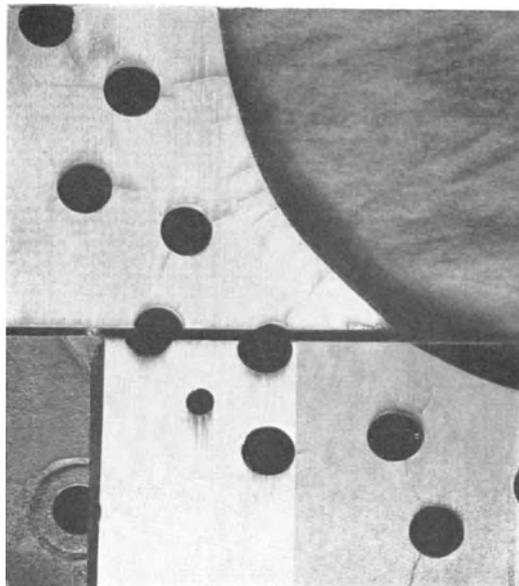
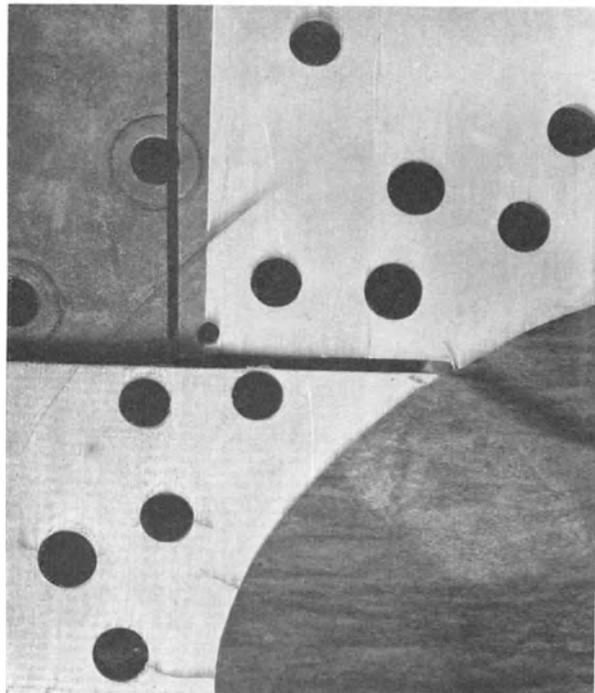


Abb. 25b. Risse im Mantelblech.

Schichtenbildung stark voneinander abweichende Kerbzähigkeit auf. In der Längsrichtung des Stutzens, die der Querrichtung des gewalzten Bleches entspricht, ist die Kerbzähigkeit des Kernmaterials nur gering und für ein Kesselblech zu niedrig. In den Randzonen ist sie stellenweise recht hoch.

Der Stutzen hat bei seiner Herstellung eine fehlerhafte Wärmebehandlung durchgemacht, durch die die hohe Kerb-

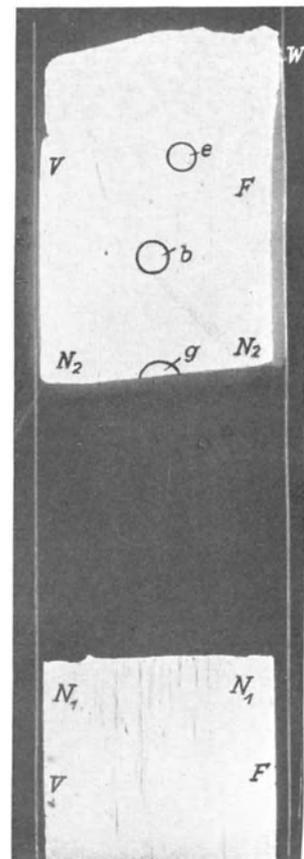
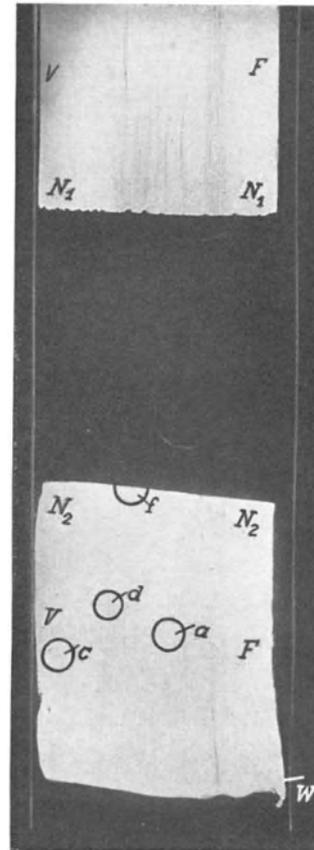


Abb. 26. Wülste *W* unter den Stemm-
kanten.

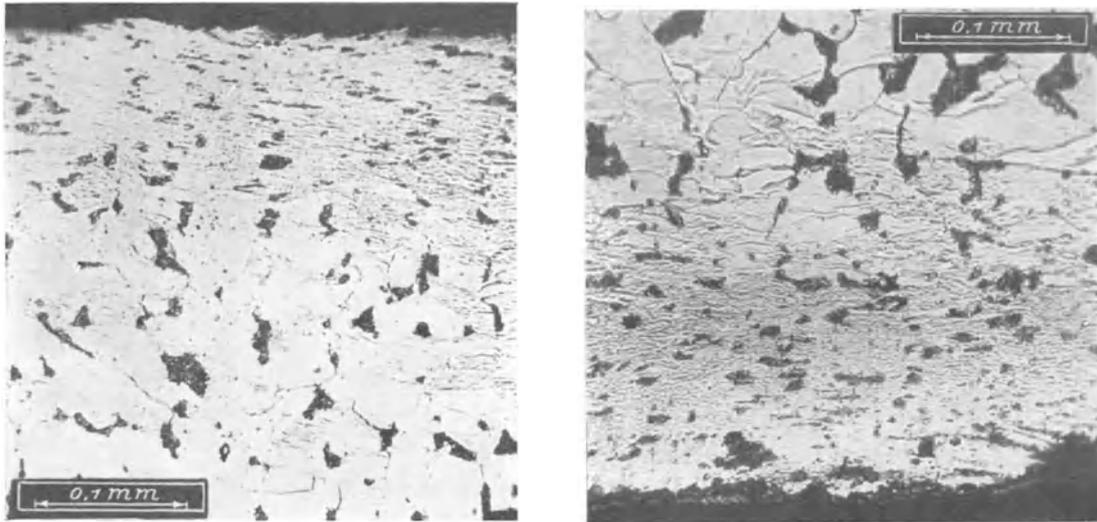
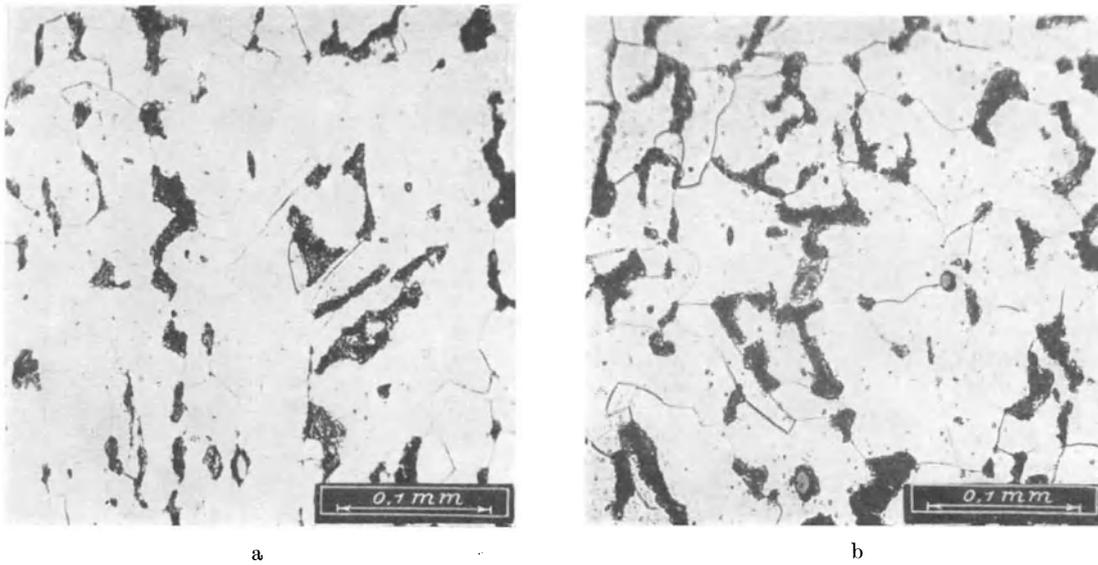
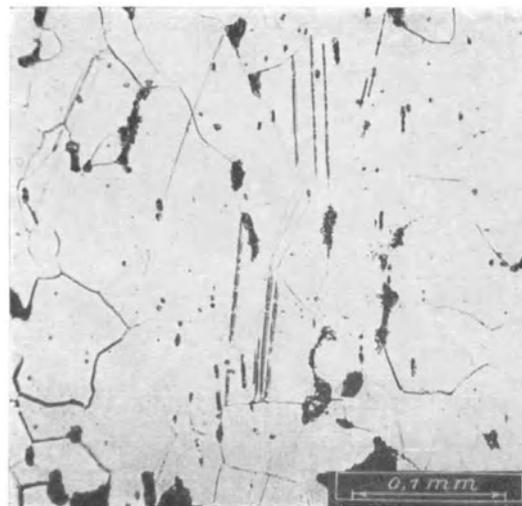


Abb. 27a, b. Materialquetschung in der Nietlochleibung. $V = 200$. (Stelle *f* und *g* der Abb. 26).



a

b



c

Abb. 28a, b, c. Nichtmetallische Einschlüsse, grobes Korn. Gleitlinien im Gefüge des Mantelbleches. $V = 200$.
Sicherheit des Dampfkesselbetriebes.

zähigkeit des Randmaterials im zylindrischen Teil des Oberteils örtlich bis zur Sprödigkeit herabgedrückt wurde. An den spröden Stellen ist das Gefüge grobkristallinisch; es läßt im Verein mit der festgestellten Sprödigkeit auf örtliche Überhitzung des Blechmaterials schließen.

Ein sachgemäßes Ausglühen des Stutzenoberteils, wodurch die durch die Überhitzung des Stutzens hervorgerufene Materialverschlechterung wieder vollständig aufgehoben wäre, hat nicht stattgefunden.

Durch örtliche Kaltbearbeitung des Flansches (Dornen, Nieten, Anrichten, Stemmen)

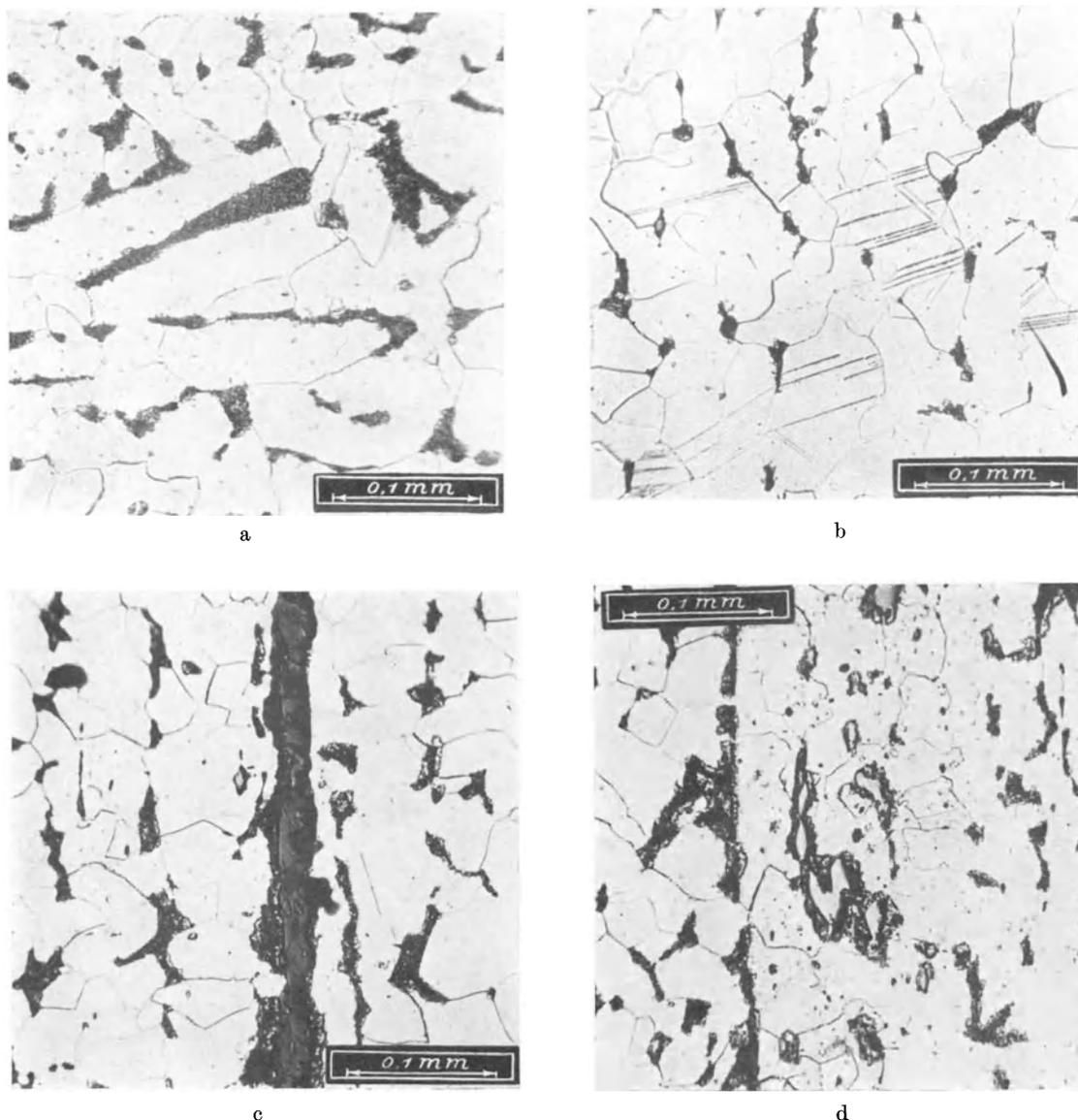


Abb 29 a—d. Grobes Korn, starke nichtmetallische Einschlüsse, Gleitlinien im Gefüge des Mantelbleches. $V = 200$.

ist das vordem nicht im günstigsten Zustand der Wärmebehandlung vorliegende Flanschmaterial weiter verschlechtert worden, dies hat infolge starker Materialquetschung an den Nietlöchern und der Stemmkante zu örtlicher Sprödigkeit geführt. Bei den Nietlöchern ist es besonders der innere Nietlochrand, der Sprödigkeit aufweist. Die Abb. 40 und 41 zeigen solche Stellen.

Die Entstehung der Risse an den Nietlöchern ist nach Ansicht des Amtes auf die örtliche Sprödigkeit an den Nietlöchern zurückzuführen. Begünstigt wurde die Entstehung der Risse besonders in der Kernzone durch den hohen Phosphor- und Schwefelgehalt des Stutzenmaterials.

Bericht Nr. VII, Dahlem, 27. Juli 1924. Nr. 93646 Abt. III c, Nr. 2435 b untersucht einen Wasserkammerkessel mit einem längsliegenden Oberkessel mit einer Heizfläche von

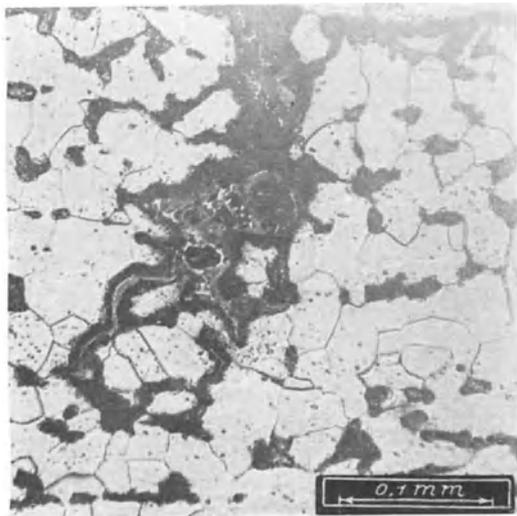
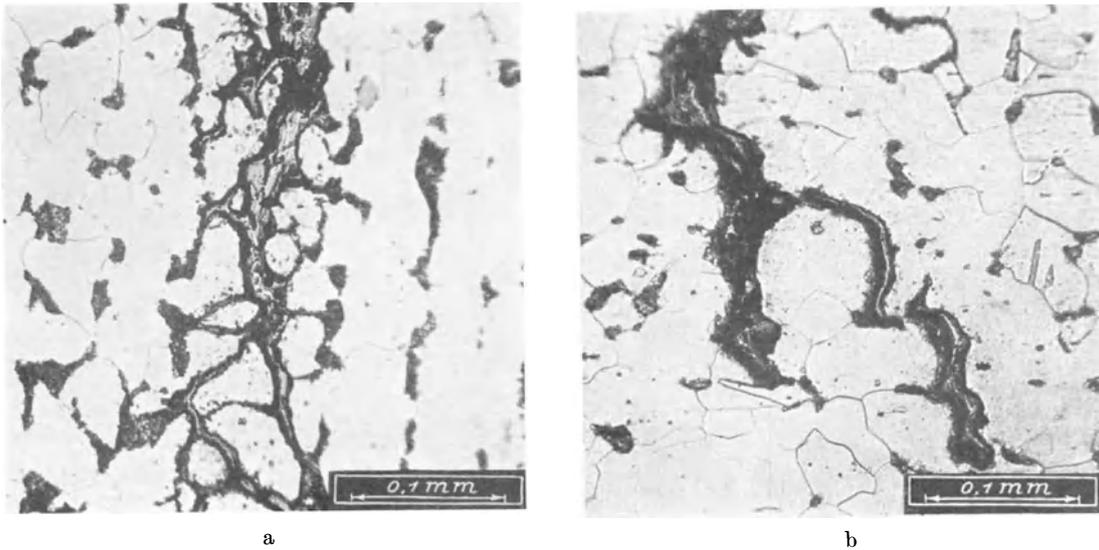


Abb. 30a—c. Risseverlauf entlang den Kornfugen.
V = 200.

272 qm. Der Betriebsdruck ist 13 atm, das Baujahr 1900. Nietlochriss in der Verbindung des hinteren Kammerhalses mit dem Oberkessel setzten den Kessel außer Betrieb.

Abb. 42 zeigt die geschädigte Stelle.

Das Material des dem Amte eingesandten Kesselblechsausschnittes ist kohlenstoffarmes Flußeisen mit üblicher Zonenbildung infolge Seigerung. Das Material ist durch nichtmetallische Einschlüsse stark verunreinigt. Der durchschnittliche Phosphorgehalt ist hoch, der Schwefelgehalt reichlich; beide übersteigen das im Kesselbau als zulässig angesehene Maß. In der Seigerungszone, besonders in den tiefdunklen Streifen, ist erfahrungsgemäß der Phosphor und Schwefel noch erheblich höher angereichert. Das Gefüge ist grobkristallinisch; der grobkörnige Aufbau läßt auf ungünstige Wärmebehandlung schließen.

Das Blech zeigt die Kennzeichen des Kaltbiegens. An der Stemmkannte ist der schädliche

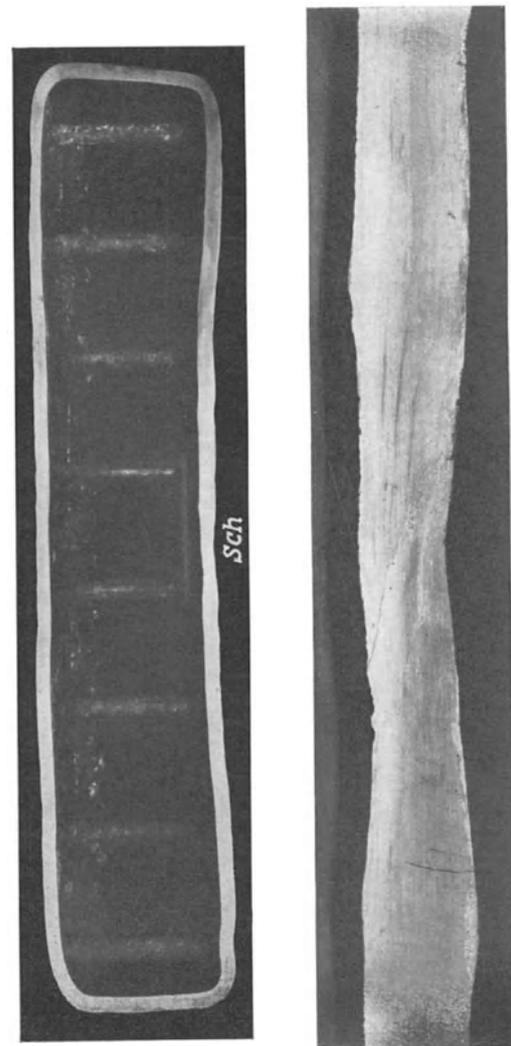


Abb. 31 a, b. Querschnitt durch den Kammerhals und Schweißstelle (Sch).

Einfluß ihrer Herstellung (Materialquetschung) nicht beseitigt. Die Nietlöcher sind gebohrt. Die Blechoberflächen zeigen stellenweise Materialzersetzung (Abb. 43).

Das Kesselblech ist örtlich spröde. Die Sprödigkeit erstreckt sich vorwiegend auf das Material innerhalb der Nietnaht und längs der Stemmkannte. In der Kernzone (Blechmitte) ist die Kerbzähigkeit infolge der hier stattgefundenen Anreicherung von Phosphor, Schwefel und Kohlenstoff geringer als in den Randzonen; sie ergibt in der Längsrichtung des Kessels Werte, die für ein Kesselblech als durchaus unzureichend angesehen werden müssen. Die erhaltenen Schlagarbeiten entsprechen jedoch der ungünstigen chemischen Zusammensetzung des Blechmaterials (hoher Phosphor- und reichlicher Schwefelgehalt).

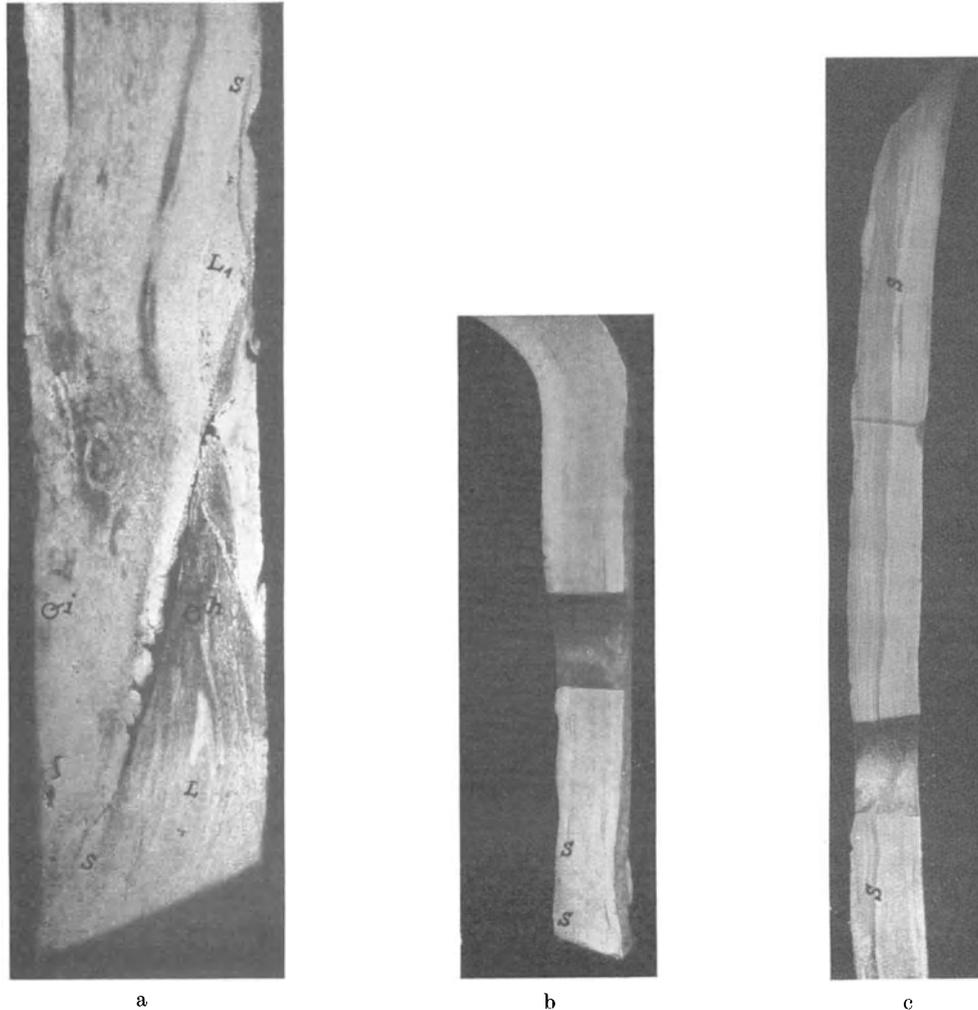


Abb. 32a—c. Mangelhafte Schweißung einer Ecke des Kammerflansches.

Die Blechoberflächen sind durch Stemmen verletzt. Das Material innerhalb der um die Nietköpfe laufenden Rillen ist hin und wieder örtlich gequetscht, an den Nietlochrändern der äußeren Blechoberfläche ist es durch Andornen gestaucht.

Die Nietlöcher sind nicht sorgfältig hergestellt; ihre Wandung zeigt feinere und gröbere Bohrrillen. Die Löcher sind teilweise länglich aufgeweitet, ein Teil derselben geht schräg durch die Kesselwandung hindurch. Allem Anschein nach paßten die zusammengehörigen Löcher nicht genau, so daß weitgehend von Dorn und Reibahle Gebrauch gemacht wurde. Hierdurch wurden die ursprünglich, zum Teil gebrochenen Nietlochränder wieder beseitigt (Abb. 44).

Das Blechstück weist in der Nietverbindung zahlreiche grobe und feine Risse auf, die vorwiegend in den Nietlöchern, zum Teil von der Stemmkannte ausgehen. Bei den Nietlöchern setzen sie als feine Haarrisse vorwiegend am äußeren Nietlochrande oder auf der Nietlochwandung in der Umgebung der äußeren Blechoberfläche an und treten meist im gestauchten Teil des Nietloches, oft in Scharen auf. Die stahlenförmig von den Nietlöchern ausgehenden Risse nehmen ihren Weg entweder zum benachbarten Loch, zu der um die Nietnaht laufenden

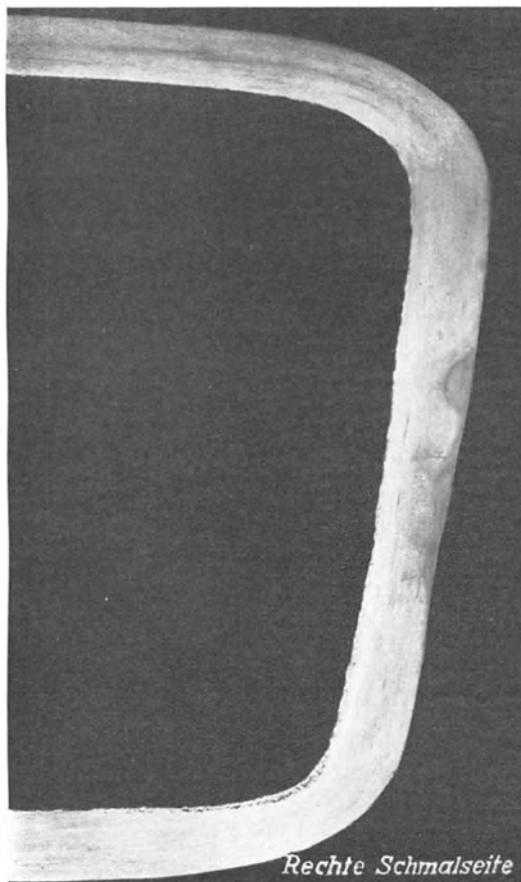
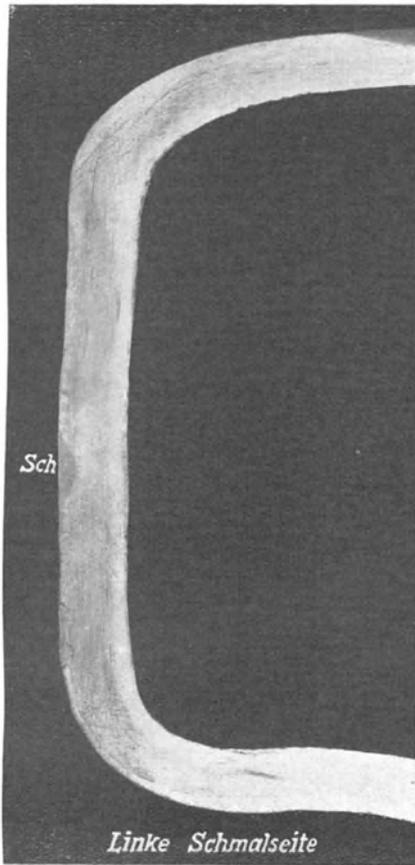


Abb. 33 a, b. Beseitigung von Rissen in den Schmalseiten der Wasserkammer durch Verschmelzen.



Abb. 34. Zugeschmolzene Risse, deren Enden noch im Blech erkennbar sind. $V = 5$.

Stemmrille oder zu der Stemmkante. Die an der Stemmkante auftretenden Risse gehen entweder senkrecht ins Blechmaterial hinein oder sie verlaufen an der äußeren Blechoberfläche parallel zur Stemmkante.

Die Ursache der Rißbildung an den Nietlöchern und an der Stemmkante

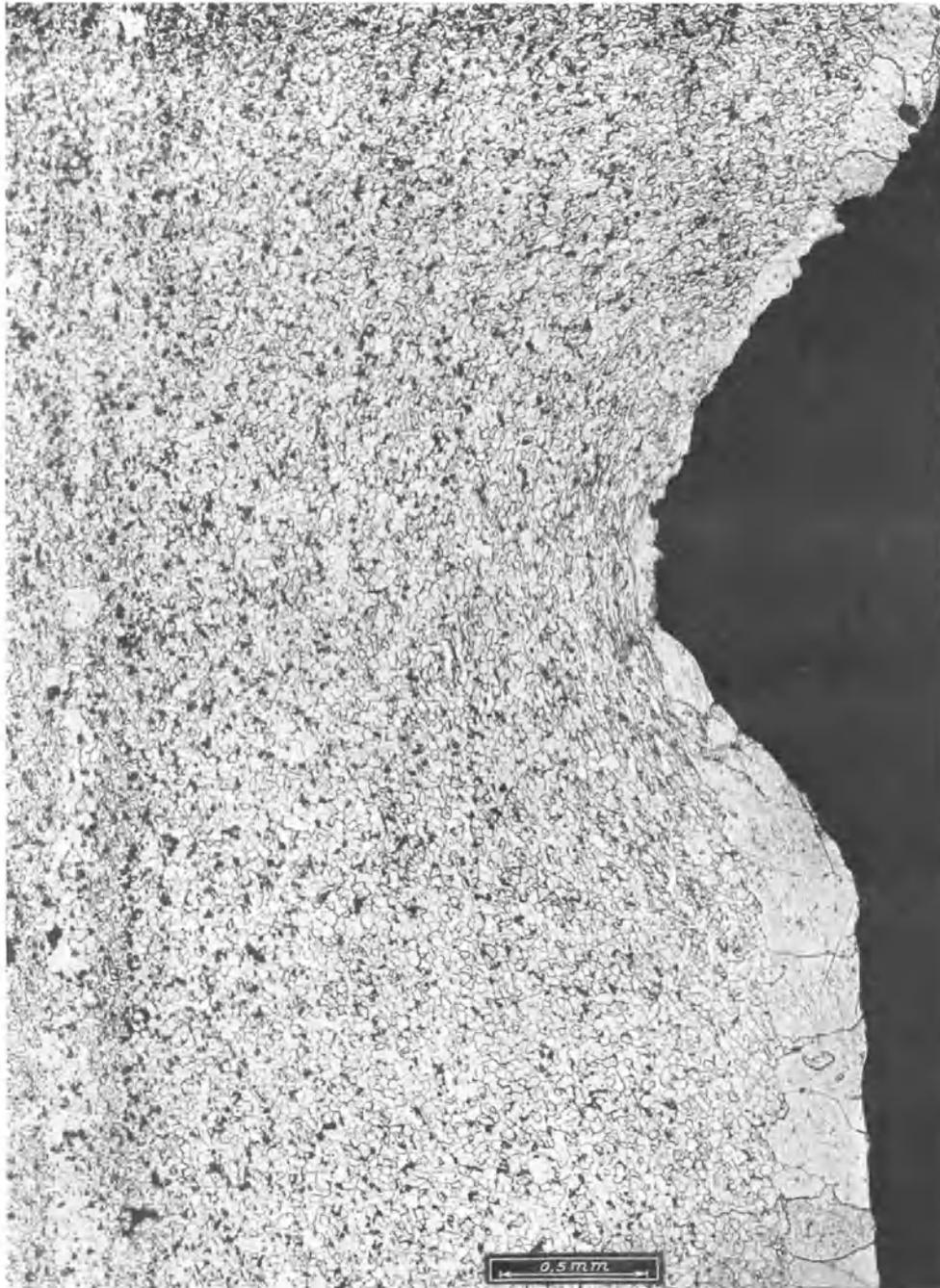


Abb. 35. Grobkörniges Gefüge an der Oberfläche des Kammerflansches und Materialverquetschung an der Stemmfurche.

führt das Amt auf die außerordentlich hohe Sprödigkeit des Blechmaterials an den Nietlöchern und an der Stemmkante zurück.

Die Sprödigkeit des ursprünglich teils ungenügende, teils ausreichende Kerbzähigkeit aufweisenden Bleches ist nach Ansicht des Amtes eine Folge

1. der ungenügenden Wärmebehandlung,
2. des Kaltbiegens des Schusses auf der Biegemaschine,

3. des Aufdornens der Nietlöcher,
4. des hohen örtlichen Nietdrucks und fehlerhaften Verstemmens der Nietköpfe,
5. der Nichtbeseitigung der schädlichen Wirkung der Herstellung der Stemmkannte sowie des übermäßigen Verstemmens derselben.

Erhöht wurde die Sprödigkeit durch die ungenügende chemische Zusammensetzung des Bleches (hoher Phosphor-, reichlicher Schwefelgehalt).

Bericht Nr. VIII, Dahlem, 28. Juli 1924. Nr. 93646 Abt. IIIc Nr. 2435a. Ein Wasserkammerkessel mit einem längs liegenden Oberkessel, einer Heizfläche von 258 qm, einem Betriebsdruck von 13 atü, aus dem Baujahre 1916, ist durch Nietlochrisse an der Verbindung des vorderen Kammerhalses mit dem Oberkessel unbrauchbar geworden. Das Amt stellt folgendes bei der Untersuchung fest:

Der eingesandte Blech-ausschnitt war aus kohlenstoffarmem Flußeisen hergestellt. Es wies schwache Zonenbildung infolge Seigerung auf, wie sie häufig in Flußeisenblechen aufzutreten pflegt. Der Phosphorgehalt war niedrig, der Schwefelgehalt jedoch reichlich. An den Blechoberflächen (den Randzonen) war das Gefüge gröber kristallinisch als nach der Blechmitte zu. Das gröbere Gefüge an den Blechoberflächen läßt auf ungünstige Wärmebehandlung schließen.

An der Stemmkannte war der schädliche Einfluß ihrer Herstellung (Materialquetschung) nicht beseitigt.

Die Blechoberflächen waren durch Stemmen verletzt. Die Verletzung war besonders stark in der Umgebung der Nietköpfe. Das Material innerhalb der um die Nietköpfe laufenden Rillen war örtlich gequetscht, an den Nietlochrändern der äußeren Blechoberfläche war es durch Dornen gestaucht.

Das Blechstück wies in der Nietverbindung zahlreiche grobe und feine Risse auf, die entweder von den Nietlöchern oder der Stemmkannte ausgingen. Bei den Nietlöchern setzten sie als feine Haarrisse teils an den Rändern, teils auf der Wandung in der Umgebung der Lochränder ein. Sie traten auf beiden Blechoberflächen, vorwiegend jedoch auf der äußeren, und oft in Scharen auf. Die Risse auf der inneren Blechoberfläche hängen anscheinend mit,

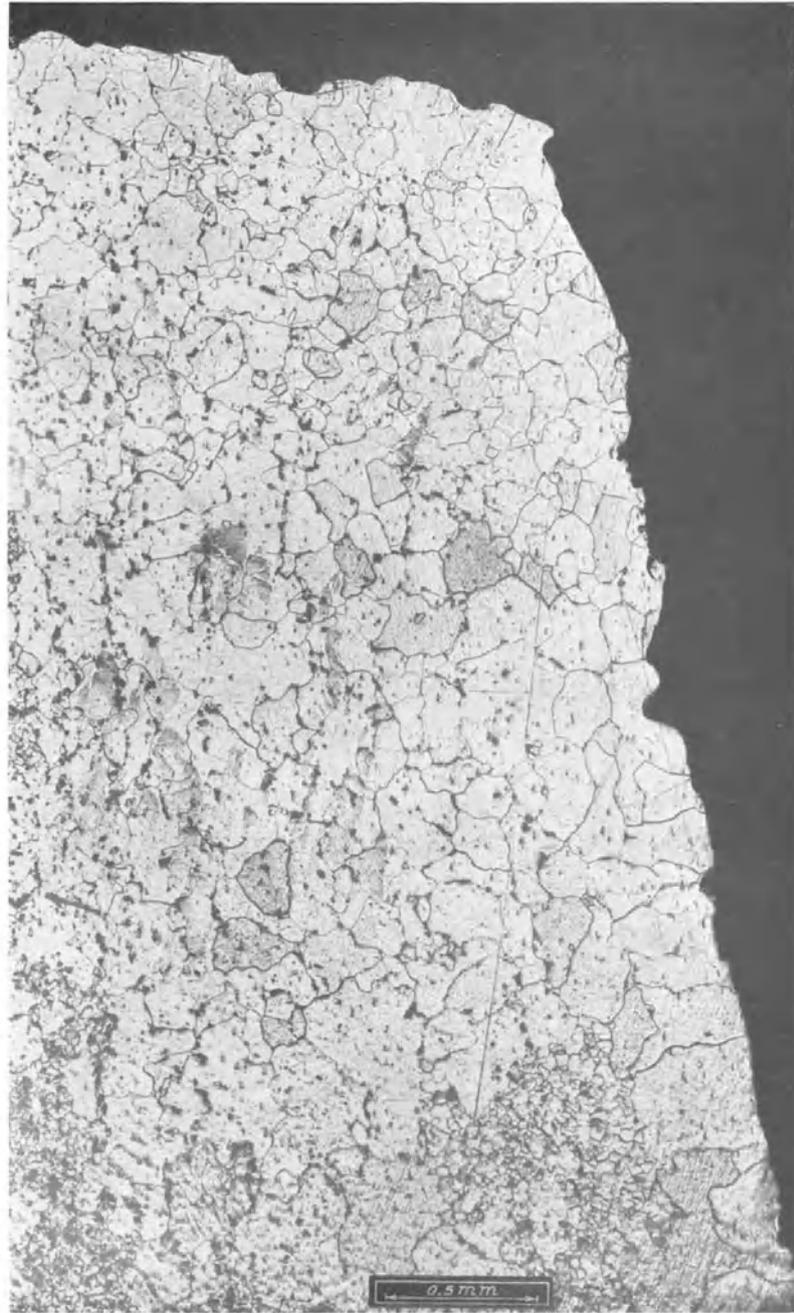


Abb. 36. Grobkörniges Gefüge des Kammerflansches.

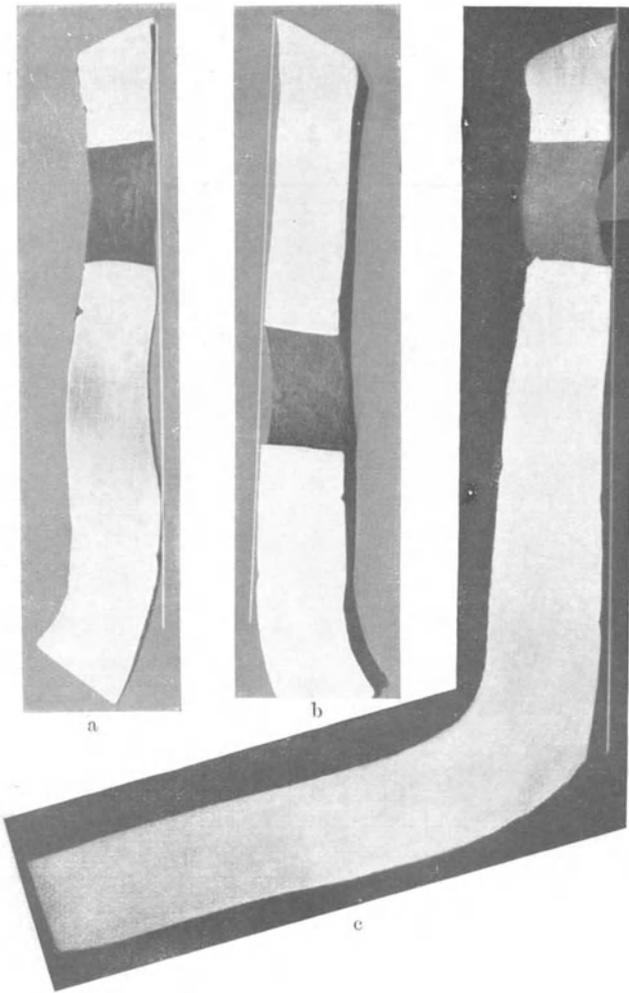


Abb. 37a—c. Mangelhafte Anrichtarbeit.

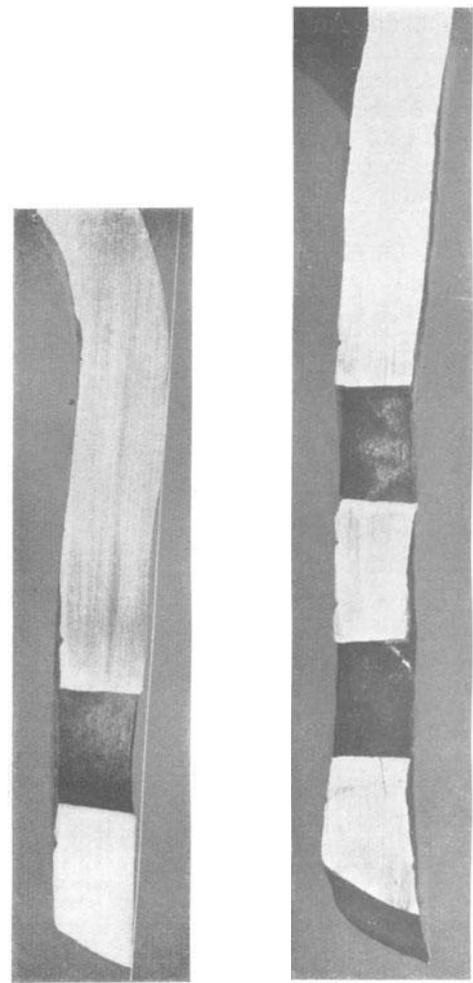


Abb. 38a, b. Mangelhafte Formgebung und Anrichtarbeit.

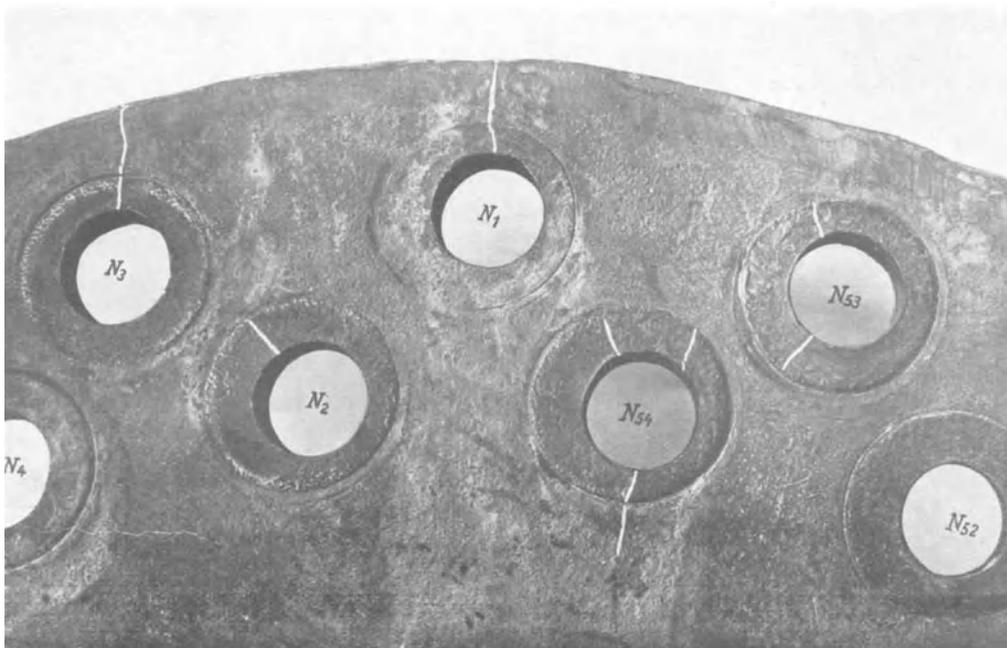


Abb. 39. Von außen erkennbare Risse auf der Flanschenoberfläche.

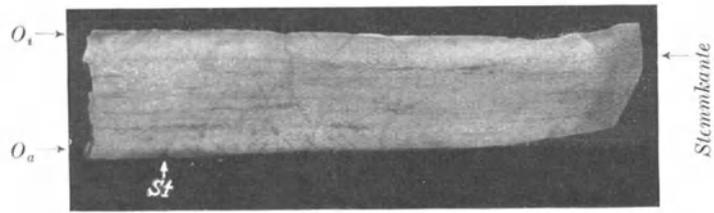


Abb. 40a. Auf Kraftwirkungsfiguren geätzt.

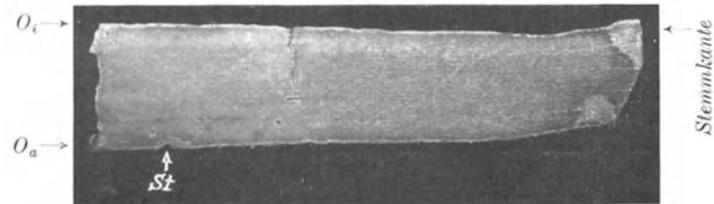


Abb. 40b. Rekristallisiert.



Abb. 40c. Auf Kraftwirkungsfiguren geätzt.

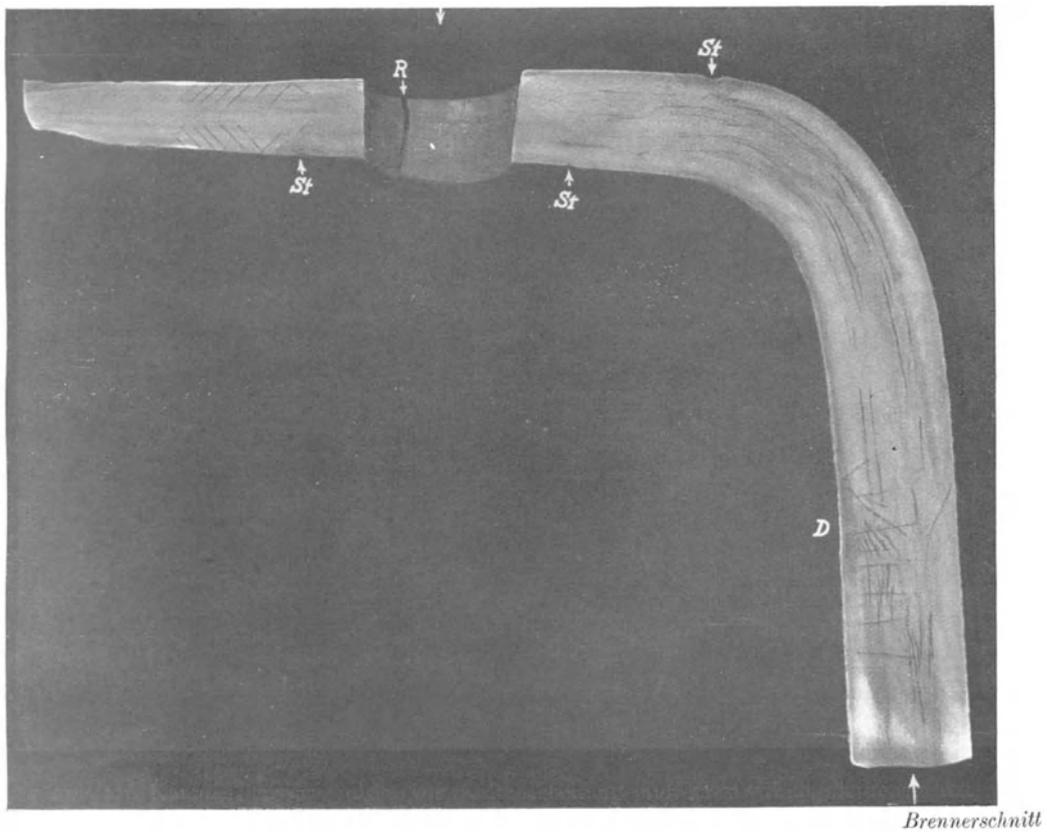


Abb. 41. Kammerflansch. Folgen von Kaltbearbeitung (auf Kraftwirkungsfiguren geätzt).

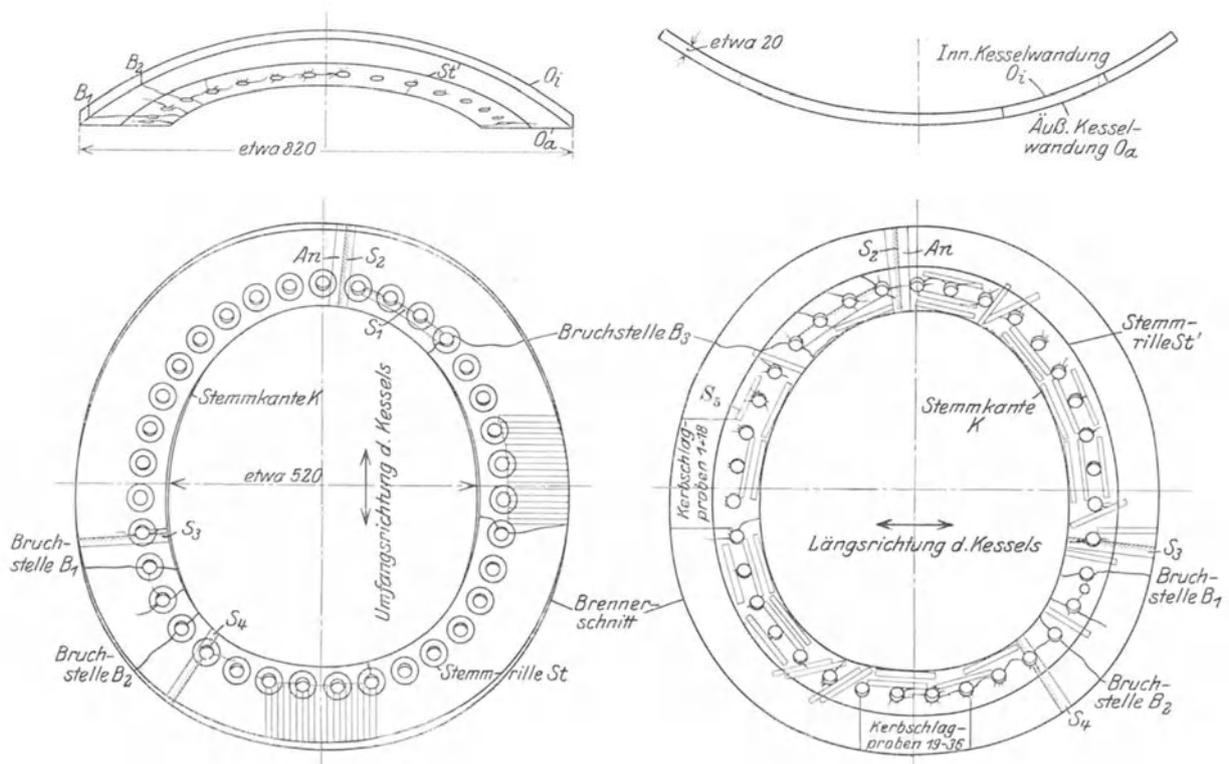


Abb. 42. Mantelblech-Ausschnitt. Verbindungsstelle des letzten Schusses mit der hinteren Wasserkammer.

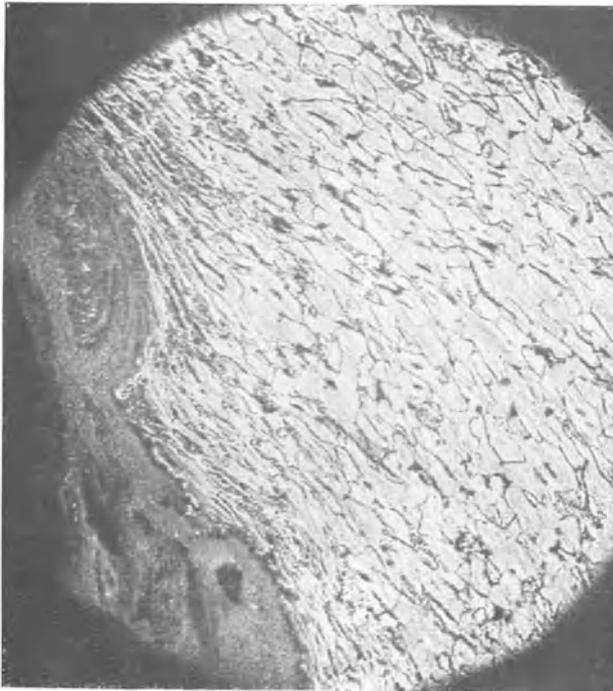


Abb. 43a. Stark kaltgerecktes Gefüge an der Stemm-
kante mit Materialzersetzung. $V = 100$.

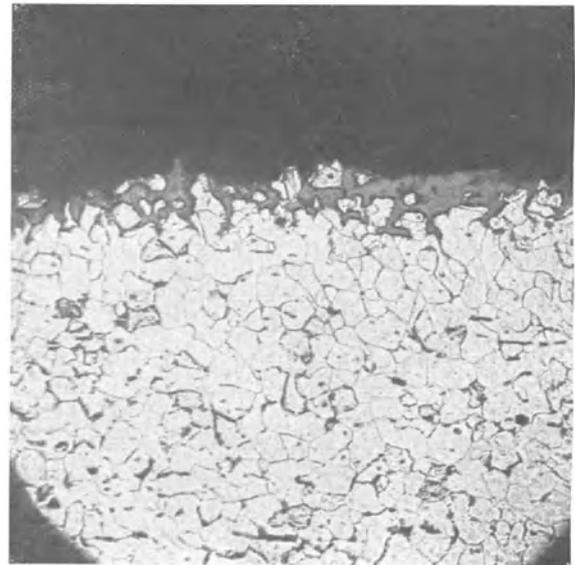


Abb. 43b. Materialzersetzung an der äußeren Blech-
oberfläche. $V = 100$.

Materialquetschung innerhalb der Nietkopfaufiage, die Risse auf der äußeren Blechoberfläche mit Materialquetschung an den äußeren Nietlochrändern zusammen. Die strahlenförmig von den Nietlöchern ausgehenden Risse nahmen ihren Weg entweder zum benachbarten Loch, zu der um die Nietnaht laufenden Stemmritze oder zu der Stemm-
kante auftretenden Risse gingen entweder senkrecht ins Blechmaterial hinein zum nächsten

Nietloch, oder sie verliefen an der äußeren Blechoberfläche parallel zur Stemmkannte. Ihr Ausgangspunkt war hauptsächlich die stark verstemmte Ecke an der äußeren Blechoberfläche.

Die Ursache der Rißbildung an den Nietlöchern und an der Stemmkannte ist nach Ansicht des Amtes auch hier auf die örtliche Sprödigkeit an den Nietlöchern und an der Stemmkannte zurückzuführen. Die Sprödigkeit des ursprünglich ausreichende Kerbzähigkeit aufweisenden Bleches ist eine Folge:

1. der ungünstigen Wärmebehandlung,
2. des Kaltbiegens des Schusses auf der Biegemaschine,
3. der unsachgemäßen Behandlung der Nietlöcher (Dornen usw.),
4. zu hohen örtlichen Nietdrucks und fehlerhaften Verstemmens der Nietköpfe,
5. der Nichtbeseitigung der schädlichen Wirkung der Herstellung der Stemmkannte sowie des zu starken Verstemmens derselben.

Das Blechmaterial hat durch diese Behandlungen eine zum Teil erhebliche Kaltreckung erfahren.

Bericht Nr. IX, Dahlem, 21. April 1924. Nr. 93271 Abt. III c, Nr. 2406 a behandelt einen Wasserkammerkessel mit einem längsliegenden Oberkessel von 272 qm Heizfläche, 13 atü Betriebsdruck aus dem Baujahr 1897. Er ist durch Nietlochrisse an der Verbindung des hinteren Kammerhalses mit dem Oberkessel außer Betrieb gesetzt worden.

Abb. 45 zeigt die Lage der Risse.

Die Untersuchung des dem Amt eingesandten Stutzenstückes ergab folgendes: Das Blech war aus weichem Flußeisen hergestellt und über seine ganze Länge geschweißt. Es war an dem einen Ende stark geseigert, nach dem anderen Ende zu nahmen die Seigerungen in der Umfangsrichtung des Stutzens allmählich ab. Der Flansch lag am Ende der Blechtafel, wo die Seigerungen gegen den Rand hin verschwanden. An dem schwach geseigerten Ende war der Phosphor- und Schwefelgehalt im Flansch bereits reichlich hoch; im stärker geseigerten Teil werden die Gehalte an Phosphor und Schwefel noch erheblich höher sein.

Die Schweißung war an den untersuchten Stellen mit Ausnahme einer kleinen Überhitzung gut gelungen. Durch die überlappt ausgeführte Schweißung traten die phosphorreichen, spröden Seigerungsstreifen auf der äußeren Oberfläche des Stutzens zutage und hatten hier im stark geseigerten zylindrischen Teil des Stutzens zu einem Anbruch von der Oberfläche aus geführt. An der Schweißstelle trat außerdem noch ein kleiner Anriß auf.

Das eingesandte Stutzenstück war im Zustand der Einlieferung ins Amt mit erheblichen Spannungen belastet, die zum Teil vermutlich bereits von der Herstellung des Stutzens (Biegen, Schweißen, Bördeln) herrühren, durch die Weiterbearbeitung (Anrichten, Nieten, Verstemmen) und durch die Beanspruchungen im Betriebe aber verstärkt sein dürften.

Die Kerbzähigkeit im zylindrischen Teil des Stutzens war im Zustand der Einlieferung ins Amt im Durchschnitt nicht erheblich, im einzelnen teilweise sogar nur gering. Dies deutet auf eine ungünstige Wärmebehandlung des Blechmaterials hin.

Das Material des Flansches war im Einlieferungszustand örtlich spröde. Der Flanschenrand an der Stemmkannte wies durchweg äußerst geringe Kerbzähigkeit, demnach hohe Sprödigkeit auf. Auch das Blechmaterial unter den Nietköpfen war im allgemeinen sehr spröde. Weniger einheitlich trat die Sprödigkeit im Nietlochmaterial der Berührungsfläche auf. In jedem Falle konnte hier jedoch Sprödigkeit an den Nietlochecken festgestellt werden. Die Zone größter Sprödigkeit im Flansch erstreckte sich von der Stemmkannte des Flanschenrandes bis kurz hinter die Nietköpfe.

Die im Flansch auftretende Sprödigkeit ist nach Ansicht des Amtes eine Folge:

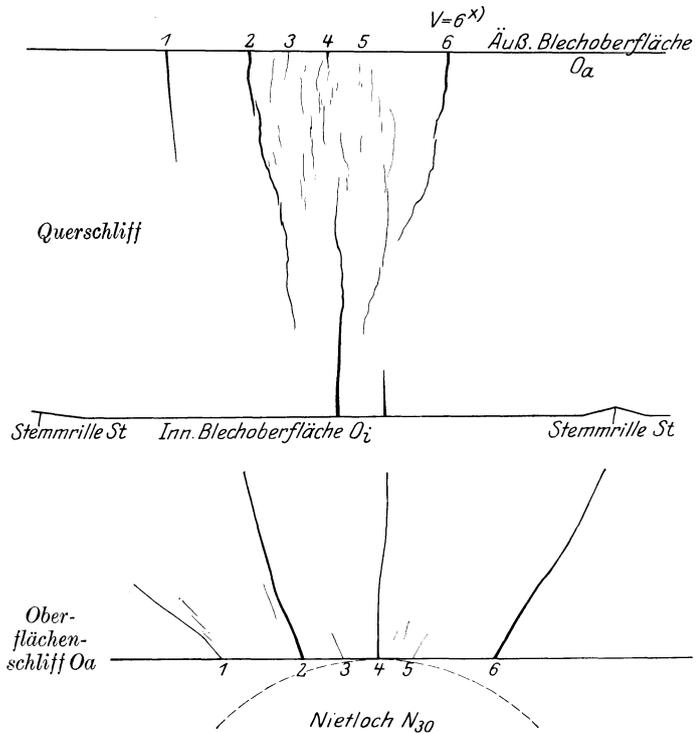


Abb. 44. Risse im Schweißnahtbereich S_5 (Abb. 42).

1. des beim Nieten angewendeten zu hohen Nietdruckes, wodurch das Material um die Nietlöcher stark gequetscht wurde,

2. des unsachgemäßen und übertriebenen Verstemmens des Flanschenrandes, das hier außer Materialquetschung teilweise eine vollständige Zertrümmerung der Eisenkristalle hervorgerufen hat,

3. des unsachgemäßen Verstemmens der Nietköpfe und der Stemmkante des Kesselschusses, das tiefe Stemmrillen auf den Oberflächen des Flansches hinterlassen hatte. Die Folge war auch hier Materialquetschung und Kornzertrümmerung,

4. des Aufdornens der teilweise nicht passenden Nietlöcher, wodurch das Material an den Nietlöchern, besonders den Nietlochecken, stark gequetscht worden war,

5. einen nicht unerheblichen Anteil an der Sprödigkeit hat vermutlich auch das beim Anrichten des Flansches an die Kesselwandung, beim Nieten und nachfolgenden Verstemmen der Stemmkante hervorgerufene örtliche Kaltbiegen des Stutzenmaterials.

Das Materialprüfungsamt Dahlem stellt in diesen vier Schadensfällen, die in ihrer Art mit den drei vorher besprochenen übereinstimmen, in gleicher Weise wie die Stuttgarter Anstalt, neben minderwertiger Qualität des Materials unsachgemäße Behandlung fest. Dahlem geht aber noch weiter und baut auf der nachgewiesenen Kaltreckung des Materials an den geschädigten Stellen eine klare Erklärung über die Entstehung der Nietlochrisse auf, indem es jedem Bericht noch etwa folgendes anfügt:

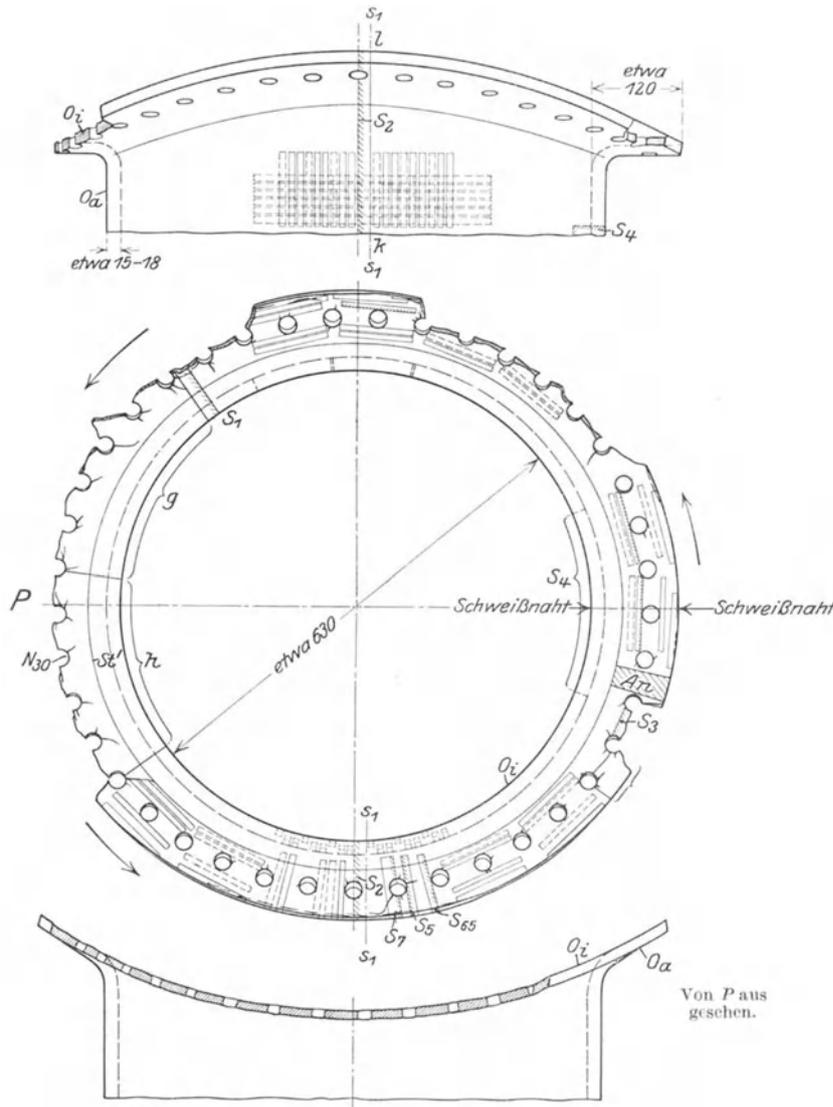


Abb. 45. Hinterer Verbindungsstutzen eines Kammerkessels mit schweren Nietlochrissen.

Kaltgerecktes Material enthält außerdem stets starke innere Reckspannungen, wie frühere Arbeiten des Amtes von Heyn und Bauer nachgewiesen haben. Treten zusätzliche Spannungen hinzu, wie sie im Dampfkesselbetrieb teilweise vermeidlich, teilweise unvermeidlich sind (Spannungen durch den Betriebsdruck, Wärmespannungen, Spannungen durch ungenügendes Anpassen, anhängende Lasten), so entstehen bei dem durch Kaltrecken mit nachfolgender Blauwärme (Betriebstemperatur) spröde gewordenen Flußeisen zunächst feine Haarrisse, die wie Kerbe wirken und schließlich den Bruch des betreffenden Konstruktionsteiles herbeiführen.

Das Amt hält auch bei diesen vier Schadensfällen die gegebene Erklärung der Nietlochrisse für völlig ausreichend. Ein zwingender Anlaß, die Laugenhypothese zu Hilfe zu nehmen, liegt nicht vor. Der interkristalline Verlauf mancher Risse ist nicht notwendig auf die Einwirkung von Lauge zurückzuführen. Hiervon wird später noch die Rede sein müssen.

Einige der vorstehenden Abbildungen zeigen eine Korrosionswirkung des Speisewassers. Dies hat mit der der Natronlauge zugeschriebenen brüchig machenden Wirkung nichts zu tun, bei der ja kein Anfressen des Materials, sondern nur eine Lösung des Gefüges eintreten soll.

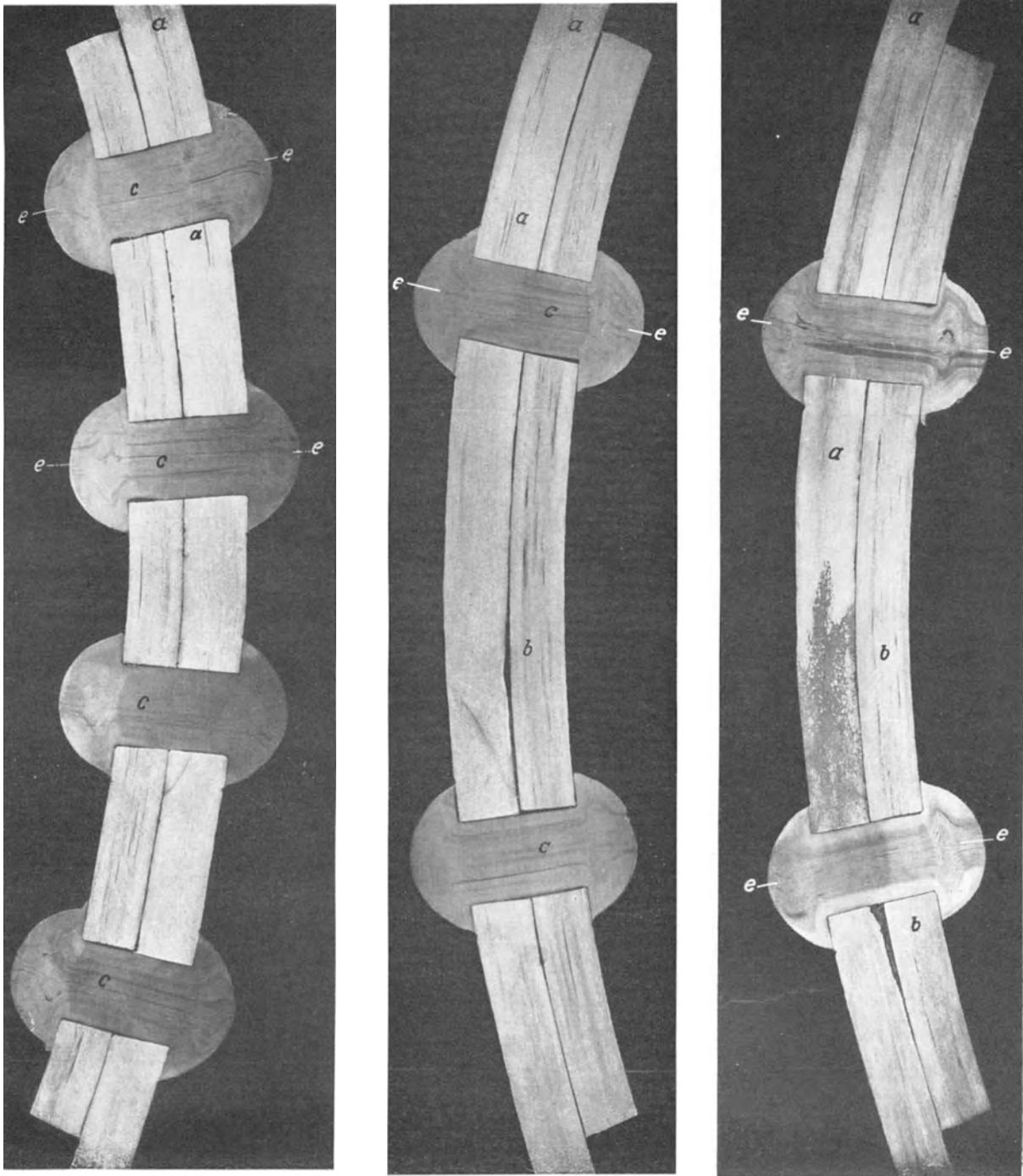


Abb. 46—48. Längsgeschweißte Trommel mit aufgenieteter Sicherheitslasche (Nietlöcher in der Schweißnaht).

Die drei nächsten Berichte X, XI und XII, wiederum von Stuttgart erstattet, behandeln Nietlochrisse an Steilrohrkesseln.

Bericht Nr. X, Stuttgart, 22. Dezember 1925, bezieht sich auf einen Steilrohrkessel mit zwei oberen und zwei unteren Trommeln, einer Heizfläche von 600 qm, einem Betriebsdruck von 16 atü, aus dem Baujahre 1917. Nach einer Betriebszeit von 33 726 Stunden sind Nietloch-

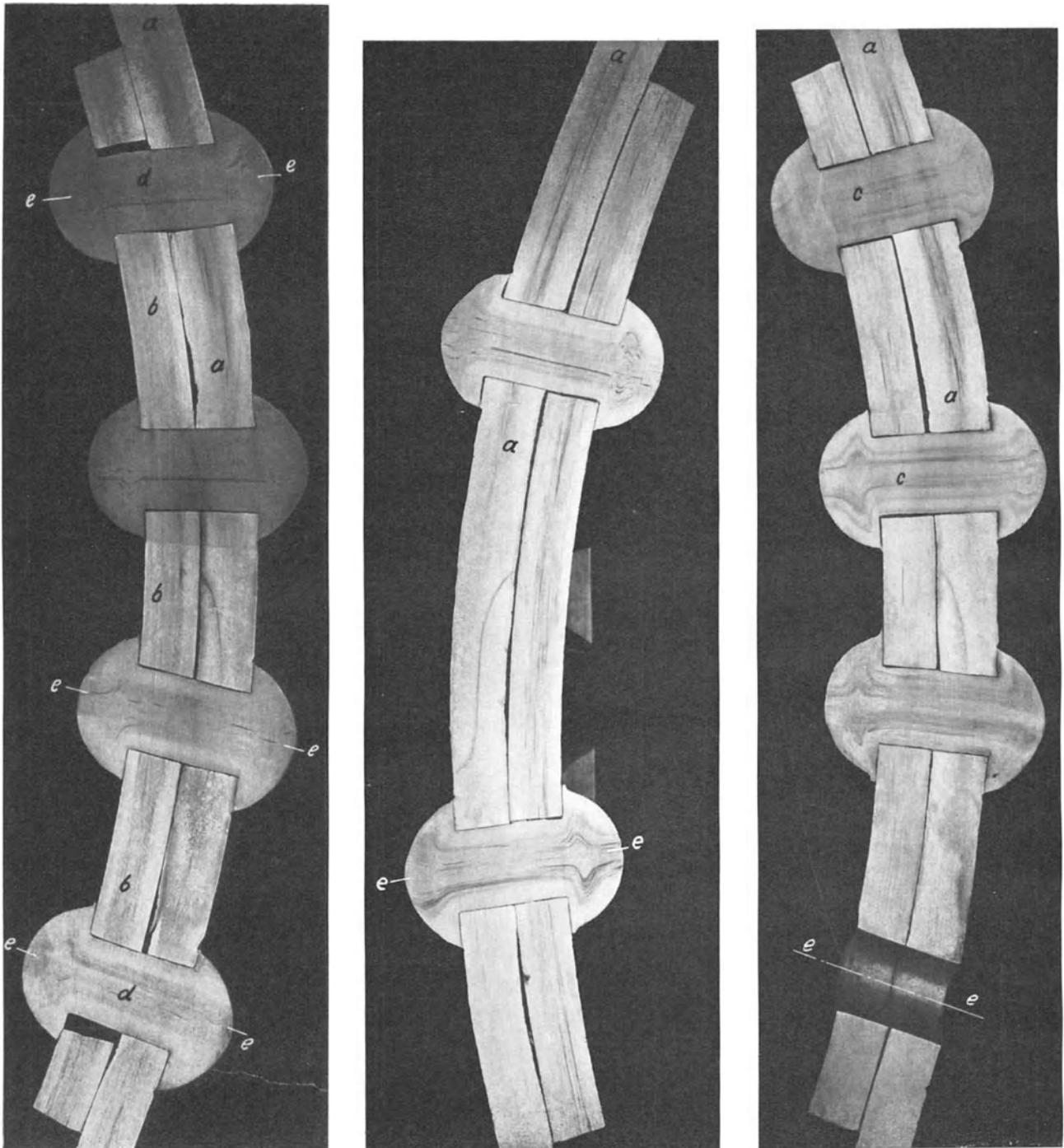


Abb. 49—51. Längsgeschweißte Trommel mit aufgenieteter Sicherheitslasche (Nietlöcher in der Schweißnaht).

risse in der hinteren Sicherheitslasche und den Mantelblechen der hinteren Untertrommel festgestellt worden.

Die geschädigte Trommel besteht aus zwei mit ihren Längsseiten aneinander geschweißten Blechplatten. Die Schweißnähte sind durch je eine innerhalb liegende aufgenietete Lasche gesichert. In den Nietlöchern der hinteren Lasche wurden über die ganze Länge verteilte Nietlochrisse gefunden. Die vorderen Naht war ohne Risse.

Die Prüfungsanstalt machte folgende Feststellungen: Abb. 46 ist ein Querschnitt der vorderen Schweißnaht. Abb. 47 desgleichen. Zu beanstanden ist, daß Nietlöcher in die Schweißnaht fallen. Die Nietlöcher sind schlecht ausgefüllt, die Lasche ist schlecht angepaßt.

Die folgenden vier Abb. 48, 49, 50, 51 sind Querschnitte durch die hintere Naht, also diejenige, an der die einzelnen Nietlochrisse festgestellt wurden.

Die Ausführung der Anpaßarbeit und der Nietung ist noch nachlässiger als in der Vordernaht. Das Mantelblech ist im Bereich der Schweißung in einer Breite von beiderseits etwa 12 cm zu hoher Erwärmung ausgesetzt worden und stellenweise verbrannt. Besondere Gefügebilder, bei 200facher Vergrößerung aufgenommen, hier nicht wiedergegeben, zeigen dies noch deutlicher.

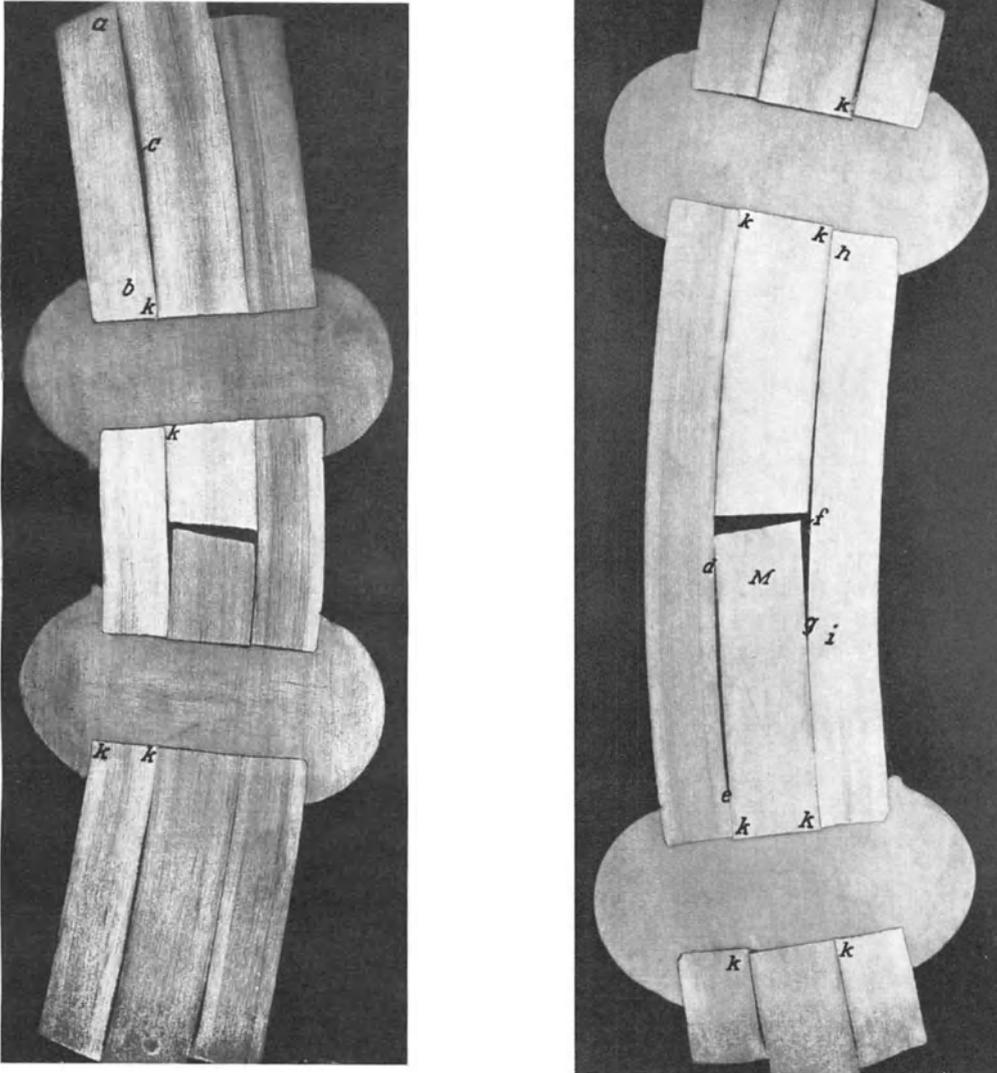


Abb. 52 und 53. Mangelhafte Doppelaschennietung.

Bei den Schnitten durch das Mantelblech fällt auf, daß die Zone der Seigerungen in ziemlicher Entfernung von der Schweißnaht aufhört. Schweißnaht und Nietnaht liegen in einem weicheren, kohlenstoffarmen Randmaterial, das, wie häufig festgestellt, besonders hohe Empfindlichkeit gegen alle Einflüsse der Bearbeitung besitzt.

In den Schliffflächen und Gefügebildern sind Anzeichen einer starken Beanspruchung des Materials über die Streckgrenze hinaus festzustellen.

Die Kerbzähigkeit im Bereich der Nietnähte ist sehr gering.

Daß in den hohlen Stellen unter der Sicherheitslasche Speisewasser eingedrungen ist, ist bei der nachlässigen Art der Ausführung kein Wunder. Vorgefundene Rückstände wurden sorgfältig gesammelt und chemisch geprüft mit dem Ergebnis, daß Chlorid und Sulfat in deutlichen Mengen, ferner solche in karbonatisch alkalischer, nicht aber in kaustischer Form enthalten sind.

Das Amt spricht aus: „Als Ursache für die im Mantelblech aufgetretene Reißbildung dürfte vorwiegend die ungünstige Wärmebehandlung in Betracht kommen, welche das Blech in der Nähe der Schweißnaht erfahren hat.“

Bericht Nr. XI, Stuttgart, 11. März 1926. Ein Garbekessel mit zwei oberen und zwei unteren Trommeln, mit einer Heizfläche von 550 qm, einem Betriebsdruck von 16 atü, aus dem Baujahr 1921, ist nach einer Betriebszeit von 10552 Stunden infolge von Nietlochrissen in der Rundnaht des Mannlochbodens an der hinteren Untertrommel auf Veranlassung des Revisionsvereins außer Betrieb gesetzt worden.

Es besteht darüber kein Zweifel, daß das Material des Kessels ursprünglich den gesetzlichen Anforderungen voll entsprochen hat, denn es ist durch Sachverständige der großen Studienprobe unterworfen worden.

Das Amt stellt fest:

Die Gefügeuntersuchung des Garbebleches bewies in seinem groben Korn eine stattgehabte recht ungünstige Wärmebehandlung. Ein Ausglühen des Kessels im Betriebe hat nicht statt-

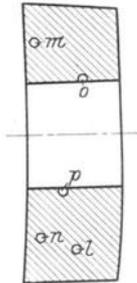


Abb. 54a. Zur Gefügeuntersuchung der Garbeplatte in der Nähe des Nietloches.

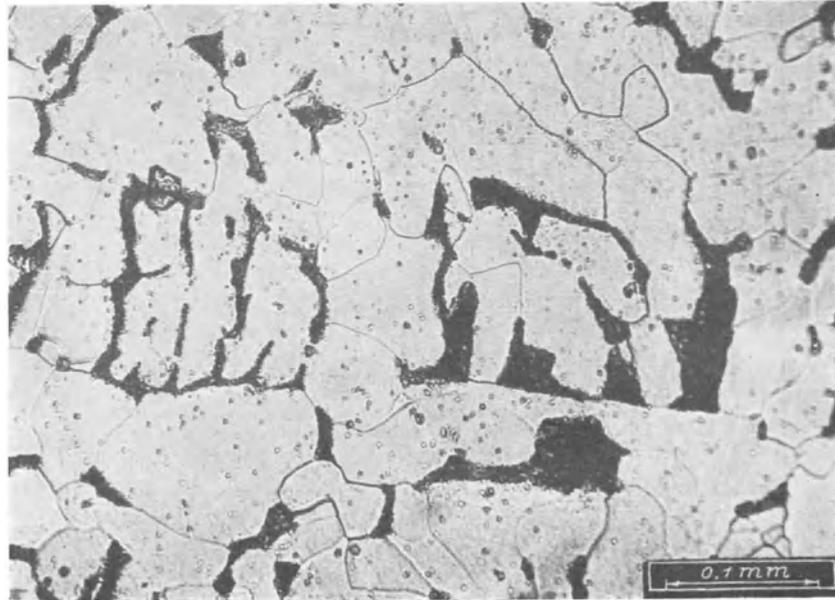


Abb. 54b. Grobes Korn infolge Überhitzung (Stelle I, Abb. 54a). V = 200.

gefunden, es bleibt also nur eine ungünstige Glühbehandlung bei der Formgebung der Garbeplatte.

Die Kerbzähigkeit war an den Nietlochrändern außerordentlich gering, im vollen Blech war sie genügend. Die Gefügebilder zeigen starke Zerquetschungen an den Nietlochrändern, die von tiefen Eindrücken unter den Nietköpfen herrühren, die wiederum auf den starken Nietdruck zurückzuführen sind. Kräftig ausgeprägte Gleitlinien zeigen, daß im Bereich der Nietlochrinne örtliche Überschreitungen der Streckgrenze stattgefunden haben.

Der Nietdruck betrug 10 t.

Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, festzustellen, ob in den Nietnähten Rückstände aus dem Speisewasser vorhanden waren. Solche Rückstände wurden in der Tat gefunden im Bereich der Risse, sowohl wie in nichtgerissenen Nähten. Es ist also der Beweis gegeben, daß die Nähte teilweise undicht waren. Die Rückstände erwiesen sich teilweise als eingedampftes Kesselspeisewasser, die teilweise auch Laugenbestandteile enthalten.

Das Amt stellt aber fest:

in der rissigen Bodennaht keine Laugenbestandteile,

in den Längsnähten, in welchen keine Risse gefunden wurden, deutliche Mengen von Laugenbestandteilen.

Eine Einflußnahme laugenhaltiger Ablagerungen kommt also nicht in Frage.

Bericht Nr. XII, Stuttgart, 12. März 1926. Ein Garbekessel mit zwei oberen und zwei unteren Trommeln, mit einer Heizfläche von 550 qm und einem Betriebsdruck von 16 atü, aus dem Baujahre 1921, ist nach einer Betriebszeit von 21476 Stunden durch Nietlochriss in den beiden Längsnähten des rechten Schusses der vorderen Untertrommel außer Betrieb gesetzt worden. Der Bericht ist von ganz besonderem Interesse.

Besondere Bemerkungen: Der linke Schuß der beschädigten Trommel und alle übrigen Trommeln waren ohne Risse. Der Revisionsverein hatte eine Weiterverwendung der beschädigten Trommel verboten.

Der Kessel war als Ersatzkessel für einen durch Nietlochrisse zerstörten geliefert worden. Zur Vermeidung von erneutem Auftreten von Nietlochrisse waren folgende Maßnahmen getroffen worden:

1. Durch Sachverständigenprüfungen war sorgfältig festgestellt worden, daß das Material

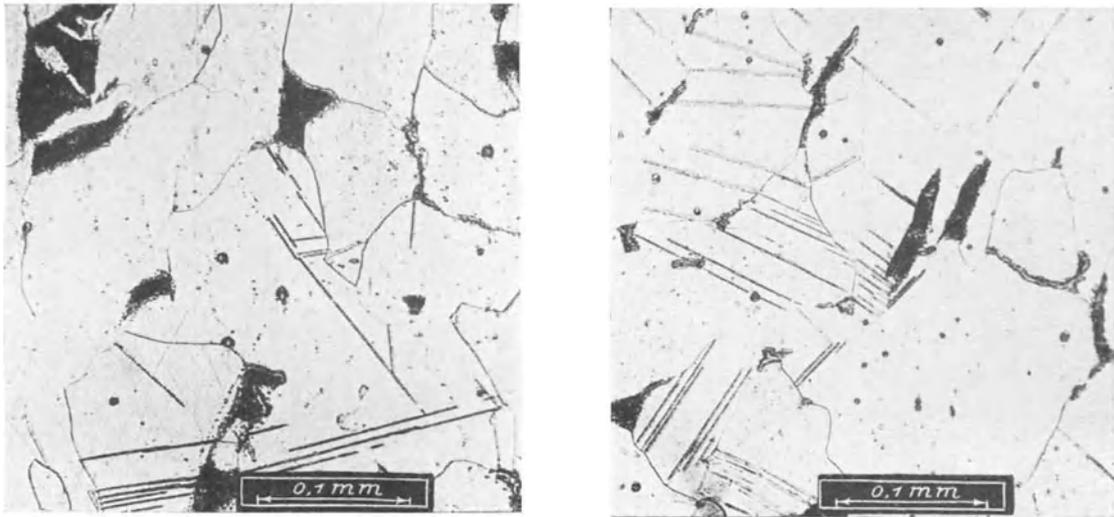


Abb. 55a, b. Grobes Korn (Stelle *m* und *n*, Abb. 54a).

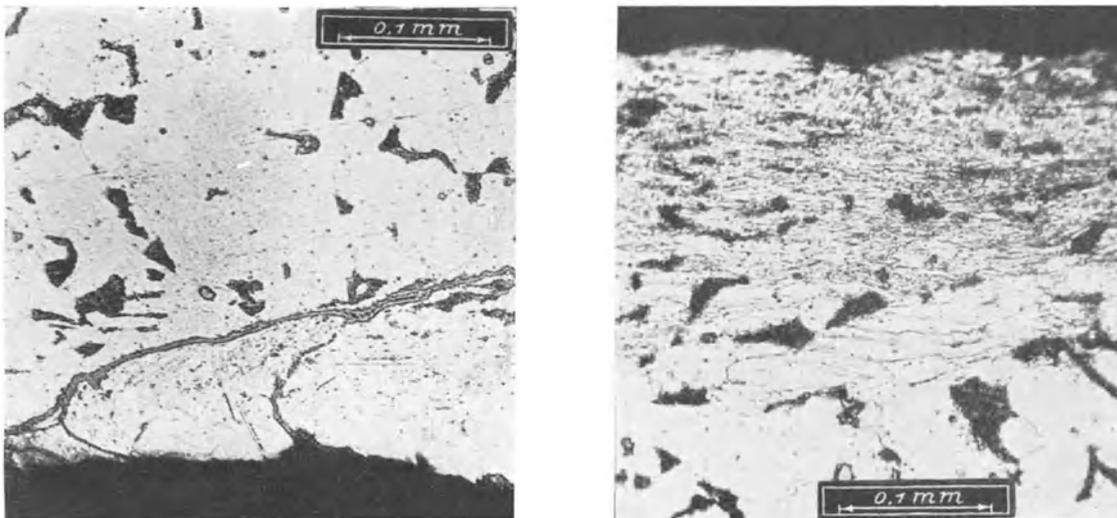


Abb. 55c, d. Gequetschtes Material am Nietloch (Stelle *o*, *p*, Abb. 54a). $V = 200$.

den gesetzlichen Bestimmungen genügte, was bei der ersten Lieferung in großem Umfange nicht der Fall war,

2. die verwendeten Bleche hatten eine Prüfung ihrer Kerbzähigkeit zu bestehen, für die man einen Standardwert von 8 mkg/qcm als untere Grenze der Brauchbarkeit festgelegt hatte.

Die Prüfungen 1 und 2 erfolgten allerdings bei den Mantelblechen vor dem Biegen, bei den Garbeplatten vor dem Pressen und bei den Bodenblechen vor dem Kümpehn. Inwieweit die Bearbeitung die Güte der Bleche verringert hatte, wurde nicht geprüft.

3. Die früher überlappten Nähte, die auf Biegung zusätzlich beansprucht wurden, ohne daß aber diese Beanspruchung bei der Berechnung der Blechstärke berücksichtigt worden wäre, wurden durch Doppellaschennietungen ersetzt.

4. Bleche und Garbplatten erhielten gleiche Dicke.
5. Statt der steifen Verbindungsstutzen der beiden Unterkessel wurden zahlreiche elastische Verbindungsrohre eingewalzt.

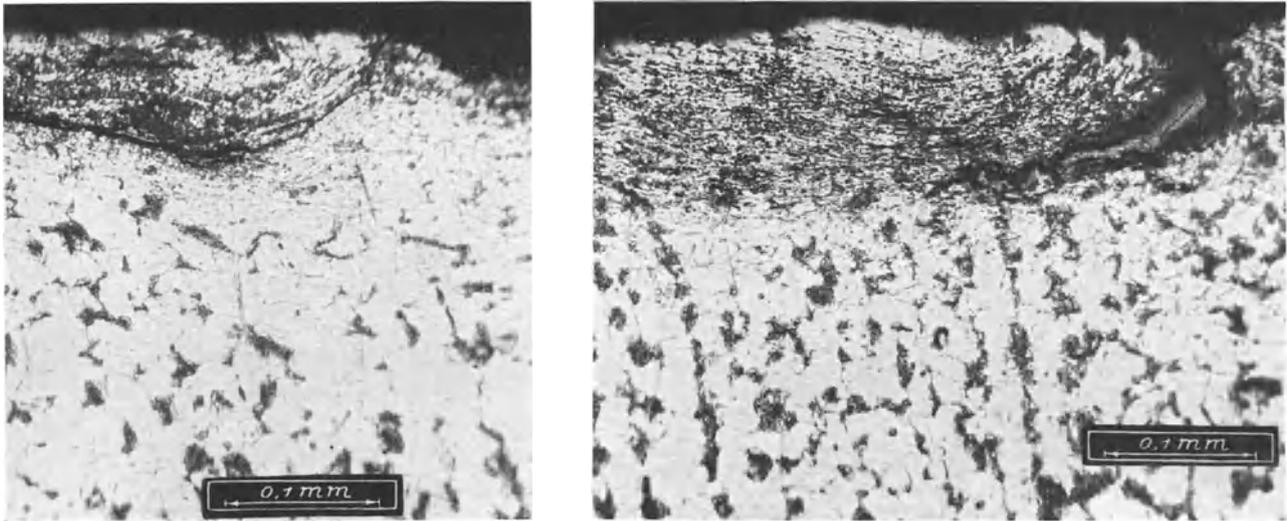


Abb. 56a, b. Gefüge-Untersuchung der äußeren Lasche: Materialquetschung am Nietloch. $V = 200$.

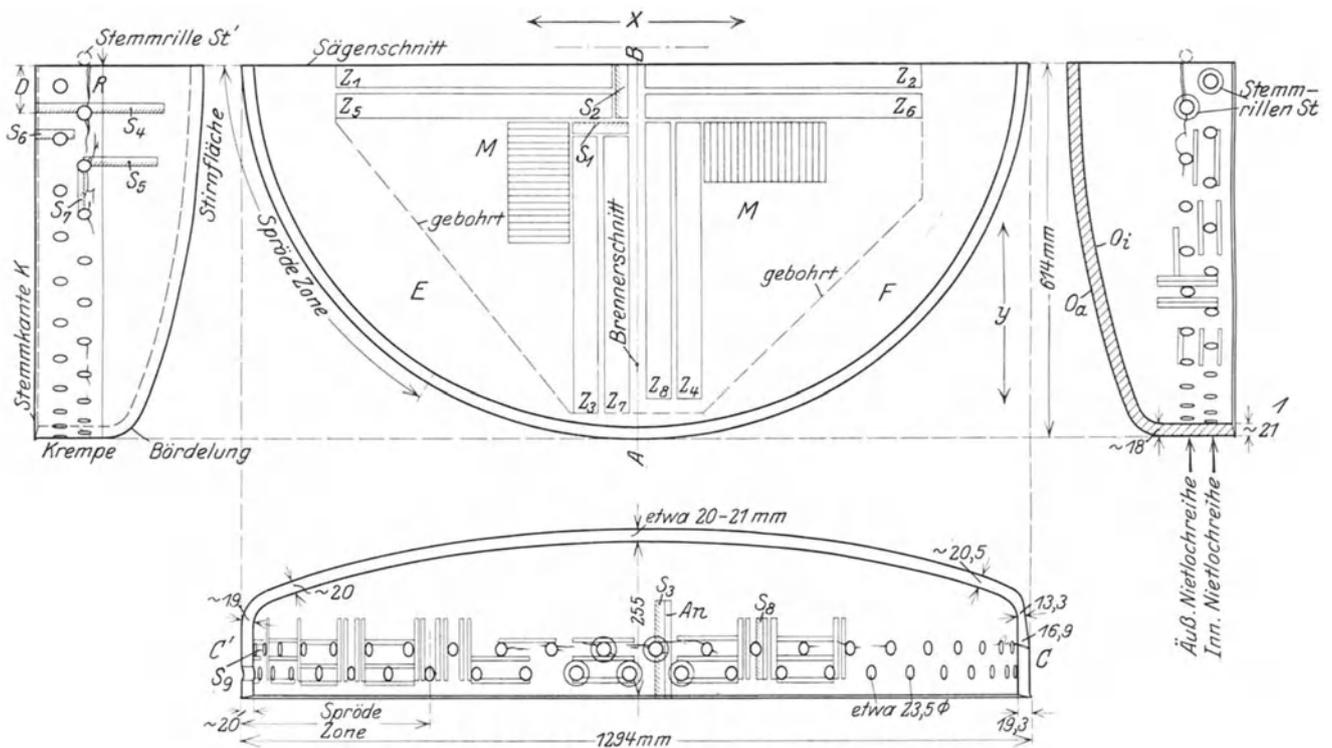


Abb. 57. Nietloch-Rißschaden an einem Trommelboden.

6. Eine Bauüberwachung durch den Revisionsverein Düsseldorf wurde ausgeübt, die besonders auf gute Anpaßarbeit, sorgfältige Behandlung der Nietlöcher, Vermeidung von Bearbeitung in der Blauwärme und sorgfältige Stemmarbeit achten sollte.
7. Der früher 16 t und mehr betragende Nietdruck wurde auf 10 t ermäßigt.
8. Bearbeitung in der Blauwärme war peinlichst zu vermeiden.
9. Die Stemmarbeit sollte besonders sorgfältig ausgeführt werden.

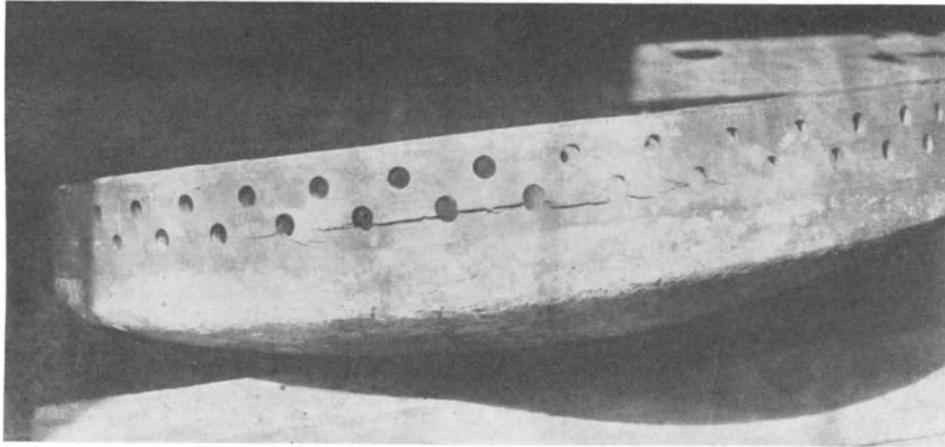


Abb. 58. Verlauf des Risses in der äußeren Nietlochreihe der Bodenrundnaht.

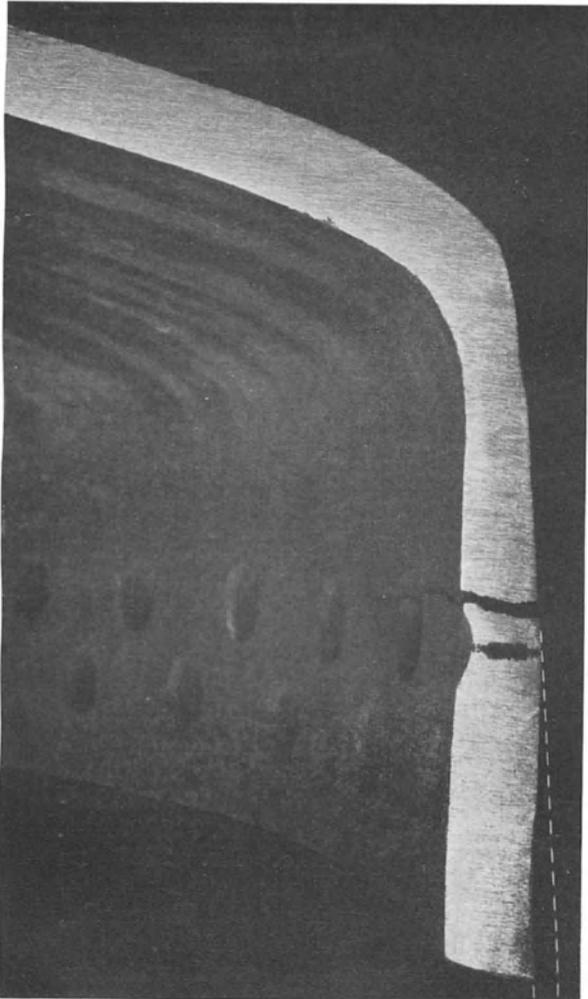


Abb. 59. Radialer Schnitt durch den RiB bei C (Abb. 57).

→ | | ←
~ 5 mm

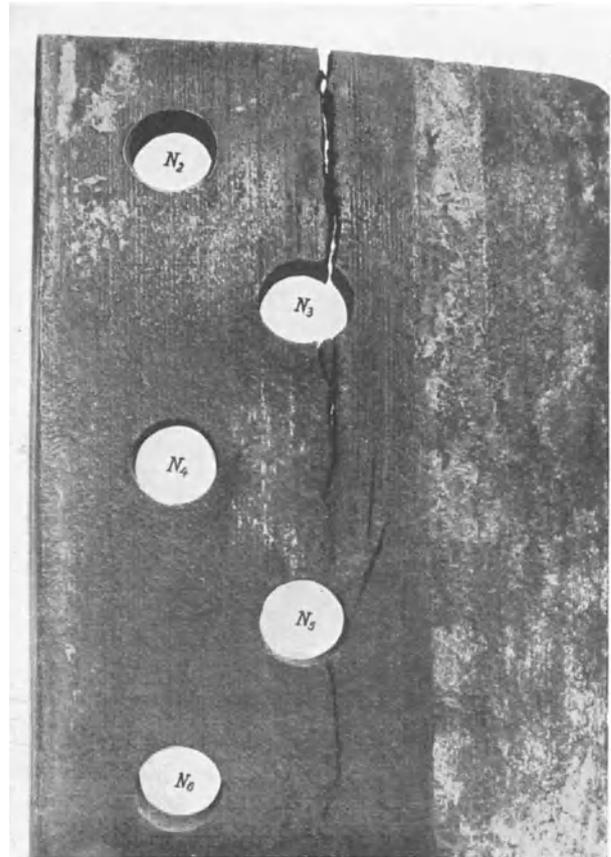


Abb. 60. Bruchstelle von außen.

Im Betriebe des Kessels wurden gegen früher keinerlei Änderungen vorgenommen.

Die erneut aufgetretenen Nietlochrisse zeigen, daß die getroffenen Maßnahmen nicht genügt haben.

Feststellungen des Amtes:

1. Wie die Abb. 52 und 53 zeigen, sind die Blechenden und Laschen gegenseitig mangelhaft angerichtet; sie sind stellenweise nicht dem Trommeldurchmesser entsprechend gekrümmt. Hierdurch sind zwischen den aneinander gelegten Teilen Hohlräume entstanden, die an den Stemmkannten durch kräftiges Bearbeiten geschlossen worden sind.

2. Das Material der Garbplatte befindet sich in ungünstigem Glühzustand, wie die Abb. 54 b und 55 a, b, c an den großen Eisenkörnern der Randzone zeigen. Da ein Ausglühen der Platte im Betriebe nicht stattgefunden hat, so ist auf ungünstige Wärmebehandlung bei der Formgebung zu schließen.

3. Zahlreiche Gefügeuntersuchungen, wie sie z. B. die Abb. 55 c, d und 56 a, b darstellen, beweisen, daß das Material der Nietlöcher in der Nähe der Nieten gequetscht worden ist, eine Wirkung des 10 t betragenden Nietdruckes, der als unzulässig hoch zu bezeichnen ist (siehe „Forschungsarbeiten“ von Baumann).

4. Der Kohlenstoffgehalt der Innenlasche ist erheblich geringer als derjenige der anderen Bleche. Dies trägt mit zur Entstehung der Nietlochrisse bei, da kohlenstoffarmes Material erfahrungsgemäß besonders empfindlich ist.

5. An den Nietlöchern war die Kerbzähigkeit sehr gering. Im vollen Blech lag die Kerbzähigkeit höher, ist aber nicht gleichmäßig, so daß auf ungleichmäßigen Zustand des Materials zu schließen ist.

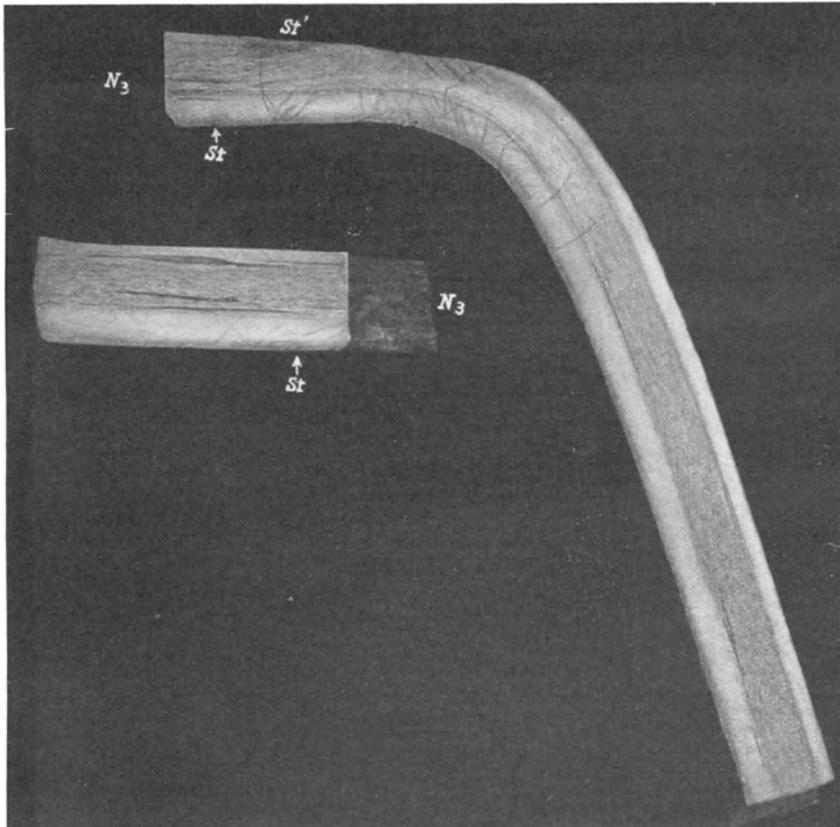


Abb. 61. Spannungen in der Krempe infolge von Kaltbearbeitung, Schnitt S_4 der Abb. 57, auf Kraftwirkungsfiguren geätzt.

Es handelt sich um einen Steilrohrkessel mit zwei oberen und zwei unteren Trommeln, einer Heizfläche von 500 qm, einem Betriebsdruck von 16 atü, aus dem Baujahr 1917.

Der Schaden besteht aus einem Riß von 320 mm Länge in der Rundnaht des vollen Bodens an der hinteren Untertrommel.

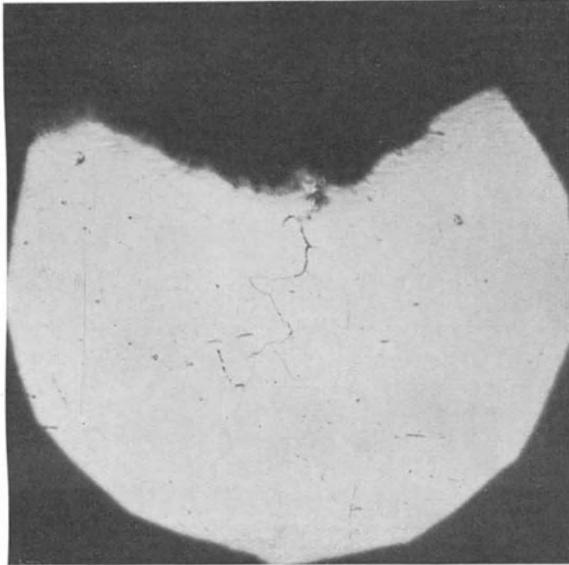
Feststellungen des Amtes: Abb. 57, 58, 59 und 60 zeigen den Boden und die Lage der Risse. Das Material des schadhaften Kesselbodens ist sehr kohlenstoffarmes Flußeisen mit schwacher Zonenbildung infolge Seigerung, wie sie häufig in Kesselblechen aufzutreten pflegt. Die Kernzone ist etwas nach der Außenseite des Bodens verschoben. In der Krempe

zähigkeit höher, ist aber nicht gleichmäßig, so daß auf ungleichmäßigen Zustand des Materials zu schließen ist.

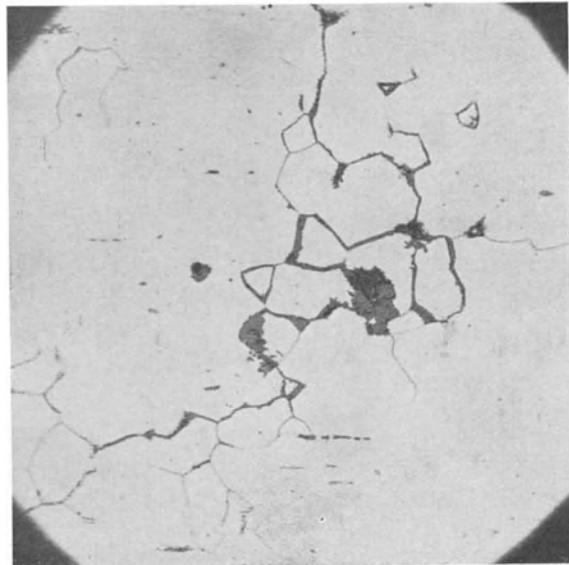
6. Es ist kein Wunder, daß in die Nähte der mit so wenig Sorgfalt aufeinander gepaßten Bleche Speisewasser eingetreten ist. Die vorgefundenen Rückstände wurden untersucht. Man fand deutliche Mengen Eisenoxydulsalze als Reste des Angriffes des Eisens durch korrosive Salze von Chloriden, ferner kristalline Magnetite in Form eines schwarzen Belages. Bestandteile des Kesselwassers in kaustischer Form konnten nicht festgestellt werden.

Im letzten, XIII. Bericht kommt noch einmal das Staatliche Amt Dahlem mit Bericht Nr. 98039. Abt. IIIc, Nr. 2721 zu Wort:

tritt die Kernzone zum Teil an der Außenseite aus. Das verwendete Blechmaterial weist im Durchschnitt geringen Phosphor- und hohen Schwefelgehalt auf. Es ist durch zahlreiche, zum Teil grobe nichtmetallische Einschlüsse meist sulfidischer Art stark verunreinigt. Die



a



b

Verunreinigungen haben bei den Zug- und Kerbschlagproben zu Spaltungen der Bruchfläche geführt.

Infolge des niedrigen Kohlenstoffgehaltes ist die Zugfestigkeit des Bodenbleches nur gering. Sie erreicht weder im Zustande der Einlieferung ins Amt, noch im geglühten Zustande die gesetzlich vorgeschriebene Mindestgrenze von 3400 kg/qcm.

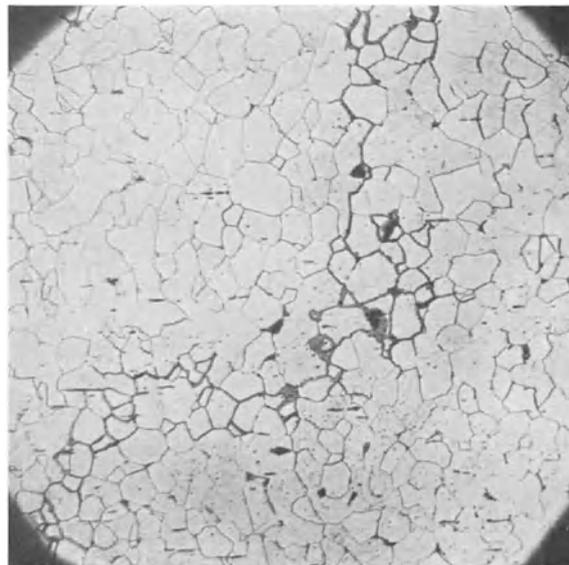
Die Nietlöcher sind gebohrt; Aufdornen beim Nieten hat nicht stattgefunden.

Der Kesselboden ist auf der Außenseite und der Stemmante der Kreme abgedreht. Dabei ist der Boden auf der Drehbank nicht genau zentriert worden, so daß einseitiges Abdrehen der Wandung erfolgte. Die 20 bis 21 mm betragende Wandstärke des Bodens ist dadurch an der schwächsten Stelle der Kreme bis auf 13,3 mm gesunken.

Nach Angabe des Antragstellers zeigte der Boden und der zugehörige Mantel beim Ausbau eine Abplattung von 15,5 mm.

Da der Boden nach dem Abdrehen völlig rund gewesen sein muß, kann die Abplattung erst später, entweder beim Einbau in den Kessel oder, was wahrscheinlicher ist, im Betrieb erfolgt sein. Hierfür spricht der Umstand, daß der aufgeweitete Durchmesser des Bodens durch die schwächste Stelle der Kreme geht. Kaltverformung und Spannungen waren die unvermeidliche Folge.

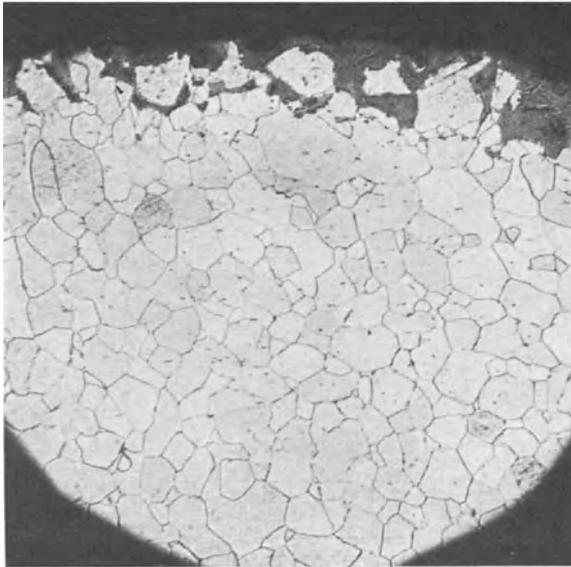
Der Boden hat bei der Herstellung eine fehlerhafte Wärmebehandlung erfahren, durch die ein erheblicher Teil der Kreme erhitzt worden ist. Das Blechmaterial ist an dieser Stelle über den ganzen Blechquerschnitt äußerst spröde. Im übrigen Teil des Bodens hat die ungünstige Wärmebehandlung die an und für sich ausreichende Kerbzähigkeit in den Randschichten stark vermindert.



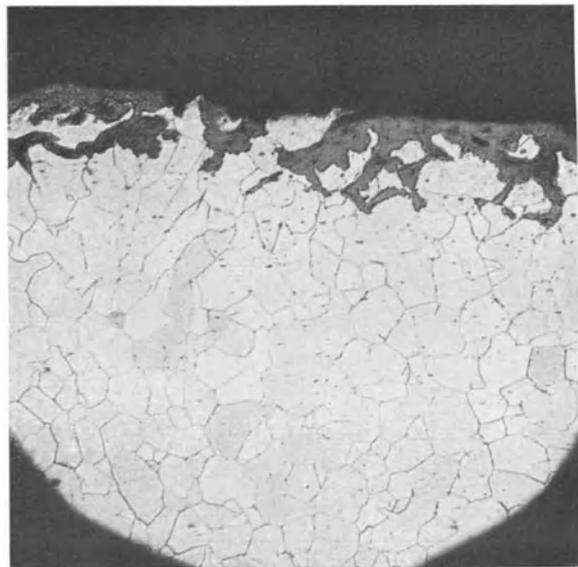
c

Abb. 62. Bildung von Rissen. a) Riß im Entstehen, $V = 200$. b) und c) Riß, den Korngrenzen folgend, $V = 200$ bzw. 100.

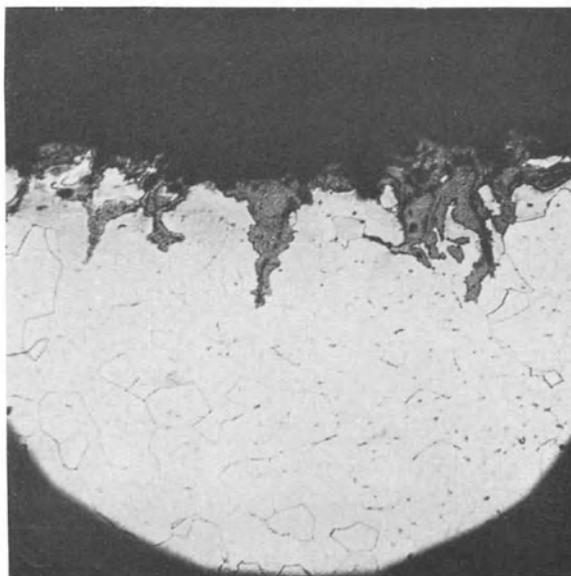
Weitere Materialverschlechterung hat der Boden durch Kaltverformung erlitten. Hier- von ist besonders die Krempe betroffen. Die Kaltverformung ist die Folge des Nietens, des fehlerhaften Verstemmens der Nietköpfe und der Stemm- kanten, der Aufweitung des Bodens und des Abklopfens von Kesselstein. Kaltbearbeitung kann aber auch dadurch eingetreten



a



b



c

Abb. 63. Rißartige oxydische Einfressungen auf der Innenwandung der Krempe an der Bruchstelle des Bodens. $V = 100$.

zu kleinen, winzigen Anrissen geführt haben (Abb. 63). Über die Entstehung dieser oxydischen Anfressungen kann das Amt zur Zeit nichts Bestimmtes sagen. Begünstigt wurden die Anfressungen durch die hier wohl hauptsächlich durch Entfernen des Kesselsteins hervorgerufene Kaltverformung der inneren Oberfläche.

Die Erklärung für die Entstehung der Risse dürfte also gegeben sein durch minderwertiges Material, erhebliche Schwächung der Wandstärke durch exzentrisches Abdrehen, bleibende

sein, daß bei der Herstellung des Bodens die letzte Formgebung bei zu niedrigen Wärme- graden erfolgt ist.

In der Krempe des Bodens sind starke Spannungen vorhanden (Abb. 61). Die Krempe des eingebauten Bodens hat demnach im unbelasteten Zustande bereits unter erheblichen inneren Reckspannungen gestanden, die durch die Beanspruchungen des Betriebes noch verstärkt wurden. Die hierdurch bedingte übermäßige Materialbeanspruchung hat zu Materialübermüdung und schließlich innerhalb der äußeren Nietlochreihe zu zahl- reichen feinen, den Korngrenzen folgenden Haarrissen, die sich allmählich zu groben Rissen zusammengeschlossen haben, geführt (Abb. 62). Ausgangspunkte der Risse sind die Berührungsflächen der Krempe mit dem Mantelblech, die äußeren Nietlochränder und die Wandung der Nietlöcher. An diesen Stellen wird das Material bereits beim Nie- ten stark beansprucht. Begünstigt wurde die Rißbildung durch die zum Teil nur geringe Kerbzähigkeit an den genannten Stellen.

Im unteren Teil des Kesselbodens treten auf der Innenseite kleine rißartige Anfres- sungen auf, die in der Bördelung der Krempe

Kaltverformung zur Eiform gerade in der geschwächten Stelle, hohen Nietdruck, hohe Beanspruchung einer an sich schon ungenügenden Materialstärke (alte Bodenform), falsche Wärmebehandlung.

Gegenüber dieser mechanischen Dauerbelastung über die Streckgrenze hinaus ist es ohne jede Bedeutung, ob hier die nach den beobachteten Rissen immerhin mögliche Einwirkung der Lauge den Bruch noch beschleunigt hat.

Die dreizehn Gutachten kurz überblickend sehen wir: An allen untersuchten, durch Risse geschädigten Stellen sind weitgehende innere Veränderungen des Materials festzustellen. Sie zeigen, daß das rissige Material außerordentliche Empfindlichkeit gegen alle Einflüsse der Bearbeitung besitzt, wie Nietten, Stemmen, Dornen, Hämmern, Walzen, Erwärmung, hohe Beanspruchung durch Betrieb und Wärme. Dabei ist ebenfalls festzustellen, daß nur die Stellen mit hoher Beanspruchung geschädigt werden, wenn das Material diese Eigenschaft hat. Dicht neben dem gerissenen Schuß sitzt im selben Kessel der unversehrte Schuß. Einwirkungen der Lauge sind an den gerissenen Stellen nur vereinzelt nachweisbar.

2. Die amerikanische Laugenhypothese.

Die Anhänger der Laugenhypothese führen als besonders kräftiges Beweisstück für die Wirkung der Lauge an, daß in einem größeren Werk:

1. alle Kesselsysteme Nietlochrisse bekommen hätten,
2. auch die mit aller Sorgfalt hergestellten, absolut herstellungsfehlerfreien Ersatzkessel erneut an Nietlochrissen erkrankt seien.

Auch Dr. Münzinger übernimmt in dem nachträglich angefertigten Schlußwort zur Diskussion seines Vortrages auf der vorjährigen Hauptversammlung des V.D.I. diese Behauptung offenbar vom Hersteller der Kessel, ohne durch Rückfrage beim Besitzer den wahren Sachverhalt festzustellen. Seine Angaben sind in mehrfacher Beziehung unzutreffend:

Zwar sind in jenem Werk alle dort ursprünglich eingebauten Kesselsysteme, die alle mit gleichem Speisewasser behandelt waren, von Rissen betroffen worden, aber bei weitem nicht alle Kessel und bei weitem nicht in gleichem Grade. Die Risse treten am verheerendsten auf bei der Konstruktion, bei der nachweislich minderwertiges Material, Überlappungsnähte, steife Stutzen, und ein Nietdruck von 16—20 t verwendet worden war. Besser gearbeitete, elastischere Konstruktionen zeigten auch verhältnismäßig geringere Schäden. Sie beschränkten sich auf die am höchsten beanspruchten Stellen der aufgenieteten Sicherheitslaschen. Durchaus nicht alle Kessel waren gerissen, und in den gerissenen durchaus nicht alle Nähte. Ja, in ein- und derselben Trommel fand sich ein vollkommen gerissener Schuß neben einem vollständig rissfreien. Wie soll sich dies erklären lassen, wenn die Lauge der alleinige Verbrecher sein soll? Offenbar sind doch hier die Festigkeitsverhältnisse, begründet in Materialqualität, Bearbeitung, Wärme usw. das Ausschlaggebende gewesen. Wenn die geschädigten Nähte aus gleich gutem Material bei gleicher Bearbeitung hergestellt worden wären, wie die unversehrten Nietreihen, dann ständen die Kessel heute noch. Die Schädigungen des Materials durch Überanstrengung, verursacht durch Fehler der Bearbeitung, Wärmespannungen, fehlerhaften Zusammenbau sind in Stößen von Berichten und Gutachten nachgewiesen worden. Den Unterschied im Verhalten der Kessel kennzeichnet die Tatsache, daß von zwei Systemen noch zahlreiche ursprüngliche Kessel mit teilweise mehr als 40 000 Stunden anstandslos im Betrieb sind.

Und wie verhält es sich mit den sogenannten fehlerfreien Ersatzkesseln? Vergleichen Sie Bericht XII, über den gerissenen Ersatzgarbekessel. Halten Sie einen Nietdruck von 10 t bei derartig empfindlichem Material nach den heutigen Erkenntnissen noch für zulässig? Zwar war die Senkung des Nietdruckes von 20 auf 16 t, später auf 10 t eine Tat, aber erst die letzten Ersatzkessel wurden unter dem ständigen Drucke einer durch einen Beamten des Bestellers ausgeführten Bauüberwachung mit 8 t, vereinzelt mit 6 t genietet, was auch nur möglich war bei einer tadellosen Anpaßarbeit, auf deren Besserung mit größter Energie hingewirkt wurde. Kann man aber die Anpaßarbeit im Bericht XII als vorbildlich bezeichnen?

Und wenn auch noch die wirklich mit der größten Sorgfalt hergestellten Kessel reißen sollten, wovon heute noch nichts zu bemerken ist, so wäre immer erst zu prüfen, ob nicht auch niedriger Nietdruck bei dem heutigen Material niederer Festigkeit eine schädliche Kaltreckung hervorruft, die bei der nachfolgenden Blauwärme, die der Kessel im Betriebe erhält, zu Rissen führen muß.

Was uns auf der V.D.I.-Tagung 1925 als amerikanische Auffassung über die Ursache der Nietlochrisse entwickelt wurde, von der man sich nun endlich eine Aufklärung der Ursache der Nietlochrise und Abhilfe versprach, beruhte in der Hauptsache auf einer Arbeit von Parr,

die bereits im Januar 1917, also vor beinahe 10 Jahren, erschienen ist: „Brüchigkeit, eine Einwirkung von Ätznatron auf weiches Flußeisen.“ Die Zahl der Kesselschäden in Amerika hat sich in den letzten Jahren rasch vermehrt. Die dabei gemachten Erfahrungen und nachweislich auch das Studium der deutschen Arbeiten von Bach, Baumann und unserer Vereinigung haben eine einschneidende Wandlung der amerikanischen Auffassung herbeigeführt. Dies zeigt besonders deutlich die neueste Arbeit von Parr und Straub: „Die Ursache der Brüchigkeit von Kesselblechen und ihre Verhütung.“ Die Arbeit wurde im Juni dieses Jahres der Amerikanischen Gesellschaft für Materialprüfung vorgelegt, ist also ganz neuen Datums. Von unseren amerikanischen Freunden wurde sie uns zur Verwertung bei der heutigen Tagung zugeleitet. Die Übersetzung der Arbeit, durch die Vereinigung veranlaßt, findet sich auf Seite 121 dieses Buches. Der Inhalt der Arbeit ist kurz zusammengefaßt folgender:

Bei der ersten Betrachtung der Nietlochrisse in Amerika hat sich ergeben, daß die Kessel-speisewässer der geschädigten Kessel einen Überschuß von Ätznatron zeigen. Man hat daraus geschlossen, daß zwischen der Brüchigkeit, die sich in Nietlochrissen äußert, und dem Ätznatron ein ursächlicher Zusammenhang bestände. Daraus ergab sich im Jahre 1917 der Bericht Nr. 94 der Technischen Prüfungskommission der Universität Illinois: „Die Brüchigkeit, eine Wirkung von Ätznatron auf weiches Flußeisen“, von S. W. Parr. Parr macht im neuen Bericht darauf aufmerksam, daß zur Zeit dieser Arbeit die Kenntnisse der Amerikaner von der Ursache der Brüchigkeit und den Mitteln zur Verhütung noch sehr dürftig gewesen sind. Diese Tatsache und ferner die zunehmende Zahl von Kesselschäden veranlaßte die Wiederaufnahme der Arbeit. Zunächst war festzustellen, ob überhaupt Brüchigkeit vorhanden wäre, denn von vielen wurde dies bestritten. Daher brauchte man genaue Erkennungsmerkmale für die verschiedenen im Kesselblech auftretenden Risse und Brüche. Parr unterscheidet:

Korrosionsrisse,
Ermüdungsrisse,
Brüchigkeitsrisse.

Als besondere Eigentümlichkeit der Korrosionsrisse stellt er fest, daß sie meist der Richtung der Gleitlinien, die bei Beanspruchung über die Streckgrenze entstehen, folgen und daß die Risse quer durch die Eisenkörner durchgehen, sich nicht etwa an die Korngrenzen halten.

Die Ermüdungsrisse verlaufen ebenfalls ohne Rücksicht auf die Korngrenzen quer durch die Körner durch.

Im Gegensatz hierzu laufen nach Angabe von Parr die Brüchigkeitsrisse nur entlang den Korngrenzen. Mit einigen typischen Bildern werden diese Anschauungen belegt.

Die frühere Auffassung, daß die Nietlochrisse in bestimmten Landstrichen mit eigentümlichen Wässern auftreten, wird nicht mehr aufrecht erhalten. Parr hält es für richtiger, die Eigentümlichkeiten des Kesselwassers zu studieren. Er lehnt es ab, daß sich die Brüchigkeit auf besondere Kesselarten beschränkt, ferner lehnt er es ab, daß sie eine Folge der fehlerhaften Zusammensetzung des Eisens sein kann.

Parr macht dann Angaben über die besonderen Merkmale der Brüchigkeitsrisse. Sie sind im allgemeinen übereinstimmend mit den Merkmalen, die wir an den Nietlochrissen ebenfalls beobachtet haben. Er fügt noch hinzu:

1. Die Risse liegen immer unterhalb des praktischen Wasserspiegels.
2. Alle Risse befinden sich an beanspruchten Nietnähten.
3. Sie treten an Stellen auf, an denen die höchsten örtlichen Beanspruchungen vorhanden sind.

Es folgt dann der Bericht über die versuchsmäßige Herbeiführung der Brüchigkeit und eine eingehende Beschreibung sowohl des verwendeten Materials wie der verwendeten Apparate. Es ist ihm gelungen, bei bestimmten Konzentrationen von Ätznatron Probestäbe zu zerreißen. Die metallographische Untersuchung zeigt, daß die Brüche genau so aussehen wie die brüchig gewordenen Stellen der geschädigten Kesselbleche. Es ergeben sich interkristalline Risse. Er entwickelt dann daraus seine bekannte Theorie, daß man durch Erhöhung des Sulfatgehaltes des Speisewassers die Risse verhindern könne, und bringt einige praktische Beispiele von Kesselanlagen, die mit so behandeltem Wasser arbeiteten und dadurch seiner Angabe nach die Risse vermieden haben, während andere, die mit unbehandeltem Wasser arbeiteten, erneut Risse bekamen.

Es muß mit ganz besonderem Nachdruck festgestellt werden, daß während der Einwirkung der Lauge die Probestäbe über die Streckgrenze hinaus beansprucht waren und daß nur so die Brüchigkeit herbeigeführt werden konnte. Es ist ihm nicht gelungen, Laugenbrüche herbeizuführen, ohne daß gleichzeitig die Streckgrenze überschritten worden wäre.

Parr entwickelt dann ausführlich seine Anschauung über den inneren Vorgang bei der Entwicklung der Brüchigkeit. Hier kommt besonders zum Ausdruck die Bedeutung der Kaltreckung mit Überschreitung der Streckgrenze, ferner die elektrolytischen Vorgänge. Parr sagt dann wörtlich:

„Wie bereits gezeigt, können interkristalline Risse im weichen Stahl nur entstehen durch die vereinigte Wirkung einer mechanischen Beanspruchung und eines rein chemischen Angriffes. Außerdem ist zu bemerken, daß bei den Brüchigkeitsversuchen das Metall von der hochkonzentrierten Lösung umgeben ist, während bei Kesseln die Lösung in einer dünnen Schicht zwischen die Kesselbleche eindringt. Daher können die Grenzen der Konzentration der Lösung, die notwendig ist, um eine Brüchigkeit hervorzurufen, im Kessel gänzlich andere sein. Da aber eine Brüchigkeit nur in Nietnähten eintritt, die unter Spannung stehen, so ist es trotzdem möglich, sich vorzustellen, daß die Beanspruchung die Streckgrenze überschreitet und daß gleichzeitig die Lösung die höchste Konzentration erreicht, die beim Versuch angewendet wurde. Wahrscheinlich erreichen bei allen Kesselblechen die Beanspruchungen an der Kante der Nietlöcher gelegentlich die Streckgrenze der Metalle. Es ist zu beachten, daß die mathematische Theorie der Festigkeitslehre angibt, daß die örtliche Beanspruchung an der Kante eines Loches in einem Blech beinahe 3mal so groß ist als die mittlere Beanspruchung im Blech. Diese Spannungskonzentration an der Kante von Löchern, z. B. Nietlöchern, würde schon allein eine genügend hohe Beanspruchung ergeben, um Brüchigkeit einzuleiten, wenn eine Lösung von passender Konzentration zu den Nietlöchern durchdringt. Nun werden während der Fabrikation der Kessel die Nähte durch Nietung zusammengebracht. Die Nietung wird heiß durchgeführt. Angenommen, daß man nur einen Nietdruck verwendet, der genügt, um die Naht dicht zu halten, so tritt doch noch eine sehr hohe örtliche Spannung um den Nietkopf und rund um die Löcher ein. Wenn man das Aussehen der Bleche und Laschen aus einem Kessel, der in Betrieb gewesen ist, betrachtet, und die Ringe rund um die Nietlöcher sieht, wo die Laschen und Bleche durch die Nieten aneinander gehalten wurden, dann kann man kaum noch bezweifeln, daß das Metall über die Streckgrenze hinaus beansprucht worden ist. Wenn diese Beanspruchung nun addiert wird zu der Beanspruchung, die bei dem Arbeiten des Kessels eintritt, so entwickeln sich örtliche Beanspruchungen, welche die Brüchigkeit noch mehr begünstigen. Der scharfe Winkel, den der Nietkopf und der Schaft miteinander bilden, zusammen mit der Beanspruchung des Nietkopfes für sich, erzeugt unzweifelhaft an diesem Punkte eine Beanspruchung, die genügt, um die Brüchigkeit einzuleiten. Nicht selten springen an einem brüchig gewordenen Kessel die Nietköpfe ab, lange ehe die Bleche so genügend brüchig geworden sind, daß eine Entdeckung der Risse möglich wäre. Die Spannungen in Blechen, die durch das Nieten hervorgerufen werden, wurden durch R. Baumann studiert, der zeigte, daß die Bleche örtlich mit Spannungen beansprucht werden, die über die Streckgrenze hinausgehen, selbst wenn niedrige Nietdrücke angewendet werden. H. T. Moore stellte in seinem Bericht vor der Amerikanischen Gesellschaft für Stahlbehandlung im September 1925 fest, daß kein Zweifel mehr an dem Bestehen örtlicher Beanspruchungen existiere, die in genieteten Teilen um die Nietlöcher herum über die Streckgrenze des Metalls hinausgehen.“

Nach Parr müssen also zwei Faktoren gleichzeitig erfüllt sein, um Brüchigkeit hervorzurufen, erstens, eine genügende Konzentration der kaustischen Soda in den Nietnähten in Abwesenheit von einem Sulfat- oder Karbonatüberschuß, und zweitens gleichzeitig örtliche Beanspruchungen über die Streckgrenze hinaus.

Parr spricht dann noch von der Verhinderung der Brüchigkeit und ist der Meinung, daß sich bei der Verwendung von Nietungen eine Überschreitung der Streckgrenze nicht verhindern ließe, daß allerdings die Versuche, die Nietnähte abzudichten gegen das Eindringen von Lauge, Erfolg haben würden. Den größten Erfolg verspricht er sich von der Änderung des Speisewassers. Hier ist es aber ganz wesentlich, daß er lediglich die Konzentration des Ätznatrons und das Laugenverhältnis in einigen Kesselanlagen angibt, ohne, wie es in der früheren Arbeit geschah, ein bestimmtes Rezept zu geben. Er drückt vielmehr aus, daß es nur bei genauem Studium der örtlichen Eigentümlichkeiten durch erfahrene Chemiker möglich sein könnte, die Menge der nötigen Zusätze ohne andere Gefährdung des Kessels zu bestimmen.

3. Kritik der Laugenhypothese.

Zur Kritik der neuen Arbeit von Parr ist folgendes anzuführen:

1. Es ist kein Zweifel darüber, daß die Gefügebilder vieler Haarrisse um die Nietlöcher herum völlige Gleichartigkeit mit den von Parr in seinen Versuchen erzeugten Brüchigkeits-

rissen aufweisen. Es müßte aber bewiesen werden, daß solche interkristalline Risse nur unter der gleichzeitigen Einwirkung von Ätznatronlauge und mechanischer Beanspruchung entstehen können. Dieser Nachweis liegt noch nicht vor, vielmehr kann man lediglich mit mechanischer Beanspruchung bei gleichzeitiger Verhinderung der Querkontraktion gleichartige interkristalline Risse erzeugen. Die bei Kerben durch Dauerbeanspruchung erzeugten Risse können ebenfalls interkristallin sein. Es ist anzunehmen, daß die hohe Temperatur des Bleches im Betriebe, die der Blauwärme, auch das Zustandekommen interkristalliner Risse begünstigt. In Nr. 15 der Zeitschrift des Bayerischen Revisionsvereins von 1925 gibt Baumann dieser Anschauung ganz unzweideutigen Ausdruck, und die von Bauer in den oben behandelten Gutachten des Dahlemer Amtes geäußerte Ansicht über die Entstehung der Nietlochrisse läßt interkristalline Risse auf Grund der hohen Beanspruchung kaltgereckten und auf Blauwärme gebrachten Materials zu. Entscheidend wäre ein praktischer Versuch, bei dem in Abwesenheit von Wasser oder wenigstens von Ätznatronlauge interkristalline Risse erzeugt werden können.

2. Professor Parr bestreitet jeden Einfluß von Materialqualität. In Hunderten von Fällen ist in Deutschland festgestellt, daß das Material, an dem Nietlochrisse festgestellt wurden, sogenanntes weiches Flußeisen ist, also solches, dessen Festigkeit etwa um 3400, vielfach noch darunter liegt. Das kohlenstoffärmere, weiche Flußeisen ist bequemer zu bearbeiten, Schädigungen durch die Bearbeitung machen sich nicht sofort bemerkbar. Demgegenüber neigt das Material höherer Festigkeit, etwa 4500, nicht in solchem Maße zum Sprödwerden nach Beanspruchung über die Streckgrenze hinaus, und es wird nach einer Quetschung beim Ausglühen nicht grobkörnig. Aber es ist schwerer zu bearbeiten und daher beim Fabrikanten unbeliebt.

Es ist vielfach beobachtet worden, daß in ein und derselben Trommel der eine Schuß Risse zeigte, der andere unversehrt ist. Der unversehrte Schuß zeigte kohlenstoffreicheres Material von höherer Festigkeit.

Es ist doch ferner kein Zufall, daß fast alle durch Nietlochrisse gerissenen Nähte in der ungesieberten, kohlenstoffärmeren Randzone des Bleches liegen, die eine um 200—300 kg geringere Festigkeit hat, als das volle Blech, und eine besonders hohe Empfindlichkeit gegen die Einflüsse der Bearbeitung.

Über die Abhängigkeit der Nietlochrisse von der Blechqualität lese man auch den oben bereits erwähnten Aufsatz von Baumann in den V.d.I.-Forschungsarbeiten Nr. 252 nach.

Parr gestattet in seiner Arbeit viel zu geringen Einblick in das gesamte Forschungsmaterial, so daß man den Eindruck nicht verliert, daß hier Zufallswerte möglich sind.

3. Parr behauptet, daß die Richtigkeit seiner Theorie durch die Praxis erwiesen sei. Er führt einen zehnjährigen Versuch der Universität Illinois an, bei welchem durch Schwefelsäurezusatz der Sulfatgehalt erhöht worden war und wo seitdem keine Risse mehr beobachtet wurden. Er bringt auch noch andere Beispiele von Kesselanlagen, die einen rissig, die anderen rissfrei, entsprechend der Wasserbehandlung.

Diese Beispiele sind solange nicht als beweiskräftig anzusehen; als man sich nicht durch genaue Prüfung davon überzeugt hat, daß es sich bei den in Vergleich gestellten Fällen um dieselben Kessel, um gleiches Material, um gleiche innere Spannungen handelt, kurz, daß alle sonstigen Verhältnisse dieselben waren. Es ist sehr leicht denkbar, daß die fortschrittlichen Kesselerbauer nach den ersten größeren Schäden, die bezeichnender Weise auch in Amerika erst im Kriege und nach demselben sich in bedrohlicher Weise häufen, selbst schon Fehler des Materials, der Werkstattarbeit, hohe Beanspruchungen durch Wärmespannungen erkannt haben und, ohne viel zu reden, durch Verbesserung dieser Verhältnisse das Auftreten der Risse verhindert haben. Auch in Amerika besteht eine zeitliche Übereinstimmung der Nietlochrisse mit der Steigerung des Druckes und der spezifischen Leistung. Das ist gleichbedeutend mit höherer Beanspruchung des Materials.

Man muß sehr bedauern, daß uns bis heute noch keine Untersuchung eines an Nietlochrisse erkrankten amerikanischen Kessels zu Gesicht gekommen ist, die in gleicher Weise das Material der geschädigten Stellen prüft und durchforscht wie die heute vorgetragenen dreizehn Berichte und hunderte andere unserer deutschen Prüfungsanstalten. Es ist zu bezweifeln, daß man solche Untersuchungen überhaupt drüben angestellt hat.

Es ist klar, daß man die Laugenhypothese mit ganz anderen Augen ansieht und ihr geringere Beweiskraft beimißt, wenn man aus den Materialuntersuchungen das Vorhandensein und die Bedeutung der inneren Spannungen erkannt hat.

4. Parr gibt zu, daß die Konzentrationsverhältnisse im Kessel natürlich ganz andere sein müssen als bei seinen Versuchen. Da die Schäden aber fast immer an den inneren, aufeinanderliegenden Blechflächen, die von Kesselwasser nicht berührt sind, ihren Anfang nehmen, so bleibt ihm nichts anderes übrig, als anzunehmen, daß das Kesselwasser in die Nietnaht ein-

dringt und dort konzentriert wird. Die weit klaffenden Fugen und Lücken in den Nietnähten, über die heute berichtet wurde, zwingen dazu, diese Möglichkeit des Eindringens zuzugeben. Ob die eingedrungene Flüssigkeit dort bis zu solchen Konzentrationen eingedampft werden kann, ist heute noch mindestens zweifelhaft. Professor Baumann hat auf der Rothenburger Tagung unseres Speisewasserausschusses im Mai dieses Jahres über Versuche berichtet, die bezweckten, ein Urteil über die Höhe der in Nietnähten auftretenden Laugenkonzentration zu gewinnen. Seine Arbeit: „Über die in Verbindungen von Kesselblechen auftretenden Laugenkonzentrationen“ findet sich auf Seite 109 dieses Buches. Auch Prof. Thiel wird vermutlich heute noch darauf zurückkommen. Prof. Baumann kommt zu dem Schluß, daß solch hohe Konzentrationen von etwa 30%, wie sie Prof. Parr angewandt hat, sich in den Nähten bei ordnungsgemäß hergestellten Kesseln nicht ausbilden können, solange der Kesselinhalt nicht ganz unzulässigen Salzgehalt aufweist. Nach seinen Versuchen, die mit Natronlauge von 1% Konzentration unternommen wurden, würde die Konzentration auf 2,5% steigen können. Eine Konzentration von 1% ist aber für Kesselwasser bisher eine Ausnahme und kommt auch in den Werken nicht vor, in denen besonders zahlreiche Schäden eingetreten sind. Es ist aber zu berücksichtigen, daß die Versuche bei Atmosphärendruck vorgenommen wurden. Die Verhältnisse könnten sich bei höheren Drücken noch ändern, nicht aber in solchem Maß, daß man zu hohen Konzentrationen käme. Wenn solche Konzentrationen möglich wären, müßte man auch gerade in den geschädigten Stellen Rückstände finden, die auf das Vorhandensein solcher Konzentrationen schließen lassen. Rückstände sind zwar, wenn auch selten, in den Nietnähten gefunden worden.

Vorläufig kann man also nur von einer Hypothese für die Laugenbrüchigkeit sprechen. Die Untersuchung der Löslichkeitsverhältnisse und der chemischen Reaktion bei höheren Drücken in den Kesseln ist notwendig, damit man klarer sieht. Auch muß man an gerissenen Stellen Reste von Ätznatron nachweisen können.

5. Wenn Parr in seinen Arbeiten zum Schlusse kommt: Die Nietlochrisse sind eine Folge der durch Lauge verursachten Brüchigkeit, die jedoch nur bei gleichzeitig vorhandener Beanspruchung des Materials über die Streckgrenze hinaus möglich ist, so erwartet man, daß er zur Verhinderung der Schädigung außer einer chemischen Änderung des Charakters des Speisewassers auch verlangt, daß die Überschreitung der Streckgrenze vermieden wird. Er begnügt sich aber mit der Behandlung des Speisewassers und mit dem Hinweis, daß die Abdichtung der Nähte nützlich wäre. Die Überschreitung der Streckgrenze erklärt er bei Nietungen für unvermeidlich.

Hierin können wir ihm nicht folgen. Er hat hier wohl mangels anderer Erfahrungen die Arbeit von Baumann mißverstanden, der nachwies, daß selbst bei niedrigstem Nietdruck die Streckgrenze überschritten wird. Es kommt aber, worauf Baumann im Forschungsheft V. d. I. Nr. 252 ausdrücklich hinweist, hierauf gar nicht an, sondern darauf, ob das Material hierdurch und unter dem Einfluß der gleichzeitigen Erwärmung spröde wird. Baumann weist ausdrücklich auf das verschiedene Verhalten der Materialien hin. Ferner denkt Parr offenbar nicht an den schädigenden Einfluß von weiterer Materialquetschung, wie Hämmern, Stemmen, Dornen, und an zusätzliche Beanspruchungen durch Wärmespannungen, Verformung beim Zusammenbau und dergleichen. Er verfügt offenbar nicht über so reichhaltiges und beweiskräftiges Untersuchungsmaterial wie unsere deutschen Forscher. Man könnte sich viel Nutzen davon versprechen, wenn man einmal dem Prof. Parr einen umfassenden Einblick in das vorliegende deutsche Versuchsmaterial geben würde. Da es ja nach zahlreichen Berichten in amerikanischen Zeitschriften in Amerika genau ebenso Nietlochrisse gibt wie bei uns, und die amerikanische Werkstattarbeit an Güte der unseren nachsteht, so sind die so häufig geäußerten Besorgnisse einer Schädigung des deutschen Kesselbaues dadurch nicht mehr haltbar.

4. Schlußfolgerungen.

Die Lehren, die wir aus den heutigen Betrachtungen zu ziehen haben, sind etwa folgende:

1. Wir wissen schon seit langen Jahren, daß Laugenbrüchigkeit möglich ist; auch zur Zeit laufende Versuche, die mit den schwebenden Fragen im Zusammenhang stehen, bestätigen es von neuem. Die dabei obwaltenden inneren chemischen und mechanischen Vorgänge, besonders bei den im Kessel herrschenden Temperaturen, sind noch so wenig geklärt, daß es nicht möglich ist, sich auf Grund der Parrschen Laboratoriumsversuche und der wenigen, von unsicheren Nebeneinflüssen behafteten Versuche an einigen amerikanischen Kesselanlagen lediglich auf eine empirische Änderung der Speisewasserbeschaffenheit zu verlassen.

2. Eine Laugenbrüchigkeit ohne gleichzeitige Überschreitung der Streckgrenze gibt es nicht.

Zur Verhinderung der Nietlochrissse ist daher das Dringendste:

1. Dichte Nietnähte herzustellen. Dies ist nur bei allerbesten Anpaßarbeit möglich. Die zu vernietenden Blechteile müssen ohne Fugen überall dicht aufeinanderliegen. Bei Überlappung ist dies nicht so gut zu erreichen wie bei Laschennietung. Sachgemäßes Abdrehen oder sonstige maschinelle Bearbeitung der aufeinander zu passenden Flächen ist zu bevorzugen. Zu hoher Nietdruck ergibt ein Klaffen der Bleche. Je weniger Stemmarbeit zu leisten ist, um so besser ist die Anpassung der Bleche.

2. Alle Maßnahmen, die geeignet sind, zu den durch die äußeren Kräfte schon vorhandenen Spannungen noch weitere zusätzliche innere Spannungen zu erzeugen, sind zu vermeiden. Dazu gehören: Kaltreckungen durch hohen Nietdruck, Stemmarbeit, Dornen, Hammerschläge, Wärmespannungen, Formveränderungen beim Zusammenbau.

3. Noch viel wichtiger aber ist, Materialien zum Bau von Dampfkesseln zu verwenden, die möglichst unempfindlich sind gegenüber den Einflüssen der Bearbeitung und Beanspruchung, also entweder Stähle höherer Festigkeit, wie z. B. legierte Stähle, oder aber weiches Flußeisen der heute üblichen Festigkeit ohne solch gefährliche Empfindlichkeit. Gerade das letztere zu schaffen, ist eine außerordentlich dankbare Aufgabe für die Eisenhüttenleute. Daß diese Aufgabe nicht unlösbar ist, darf man nach Äußerungen von Prof. Baumann in Zürich auf der Tagung des internationalen Verbandes der Dampfkesselüberwachungsvereine hoffen.

Die dreizehn Gutachten des heutigen Berichtes zeigen wieder einmal sehr anschaulich, was gegenüber diesen drei Forderungen als nicht einwandfrei hinsichtlich Material, Konstruktion und Werkstattdarbeit bezeichnet werden muß. Je mehr wir die Möglichkeit einer Laugenbrüchigkeit bei gewissen Speisewerverhältnissen zugeben, um so nachdrücklicher muß auf der Forderung absolut einwandfreier Nietung bestanden werden. Die Forderung ist schon bei den heutigen Dampfdrücken schwer zu erfüllen. Bei höheren Drücken ist die Nietung ein Wagnis, welches um so weniger verantwortet werden kann, je sicherer die Herstellung einwandfreier, nahtlos geschmiedeter und gekümpelter Trommeln gelingt. In diesen Trommeln ist keine Stelle mehr vorhanden, die ähnlichen Einflüssen unterworfen ist wie die Nietnaht, auch die Einwalzstelle der Siederohre kann keine Bedenken erregen. Denn das Einwalzen geschieht bei Zimmertemperatur, während am Nietloch eine Quetschung in der Blauwärme eintritt. Die Beanspruchung durch das Walzen ist im Kesselblech niedrig. Die Walzstelle ist absolut dicht, also die Bildung hoher Konzentrationen unmöglich. In der Tat sind ja auch bisher an diesen Stellen niemals Schäden beobachtet worden.

Zum Schlusse bleibt mir nur noch übrig, denjenigen unserer Mitglieder und den sonstigen Stellen, die uns so wertvolles Studienmaterial zur Verfügung stellten, und dafür außer ihrem Kesselschaden auch teilweise nicht unerhebliche Ausgaben für die Gutachten und damit verbundene Forschungsarbeiten opferwillig übernommen haben, den herzlichsten Dank der Vereinigung auszusprechen. Wir sprechen die Bitte aus, uns auch weiterhin solches Material zur Verfügung stellen zu wollen, zum Besten nicht nur der Vereinigung selbst, sondern aller, die an der Erhaltung und der Steigerung der Betriebssicherheit der Dampfkessel interessiert sind.

Izett-Flußeisen,

ein neuer Kesselbaustoff der Firma Fried. Krupp A.-G.

Von Dr.-Ing. Ad. Fry, Fried. Krupp A.-G., Essen-Ruhr.

Wenn man die Untersuchungen durchsieht, die im Lauf der letzten Jahre über Kesselbaustoffe ausgeführt worden sind, so drängt sich die Frage auf: Sind die Kesselbaustoffe, über die wir heute verfügen, so einwandfrei, wie es entsprechend der Wichtigkeit der Kessel gefordert werden muß?

Leider ist die Antwort auf diese Frage nicht eben völlig beruhigend. Zwar hat man auf Grund langjähriger Erfahrungen und wissenschaftlicher Untersuchungen Vorschriften ausgearbeitet, die z. B. für Kesselbleche nur die Verwendung von Flußeisen mit sehr guten Festigkeitseigenschaften zulassen. Wir müssen aber dabei im Auge behalten, daß die Abnahmeprüfung Eigenschaften untersucht, die sich mit den im Kesselbetrieb geforderten Eigenschaften nicht völlig decken. Dazu kommt noch, daß Flußeisen bei der Herstellung

und beim Betrieb von Kesseln vielfach Änderungen seiner Eigenschaften erleidet, und daß häufig die Prüfung des Werkstoffs nach einiger Betriebszeit andere Werte ergibt, als man sie bei der Abnahme des Bleches erhalten hatte.

Hiernach ist festzustellen, daß wir die Eigenschaften der Kesselbaustoffe nicht im vollen Maße beherrschen.

Wollen wir aber auf irgendeinem Gebiet Fortschritte machen, so ist es erforderlich, daß wir uns von der Art der bestehenden Fehler und Unsicherheiten zunächst rückhaltlos Rechenschaft geben. Auf Anregung Ihres Vorsitzenden, Herrn Oberingenieur Quack, will ich nun versuchen, Ihnen über das Verhalten der Kesselbaustoffe im Betrieb zusammenfassend zu berichten. Ich werde dabei naturgemäß auf viele Ihnen bekannte Dinge zurückgreifen müssen, hoffe aber, daraus einige Sie interessierende neue Richtlinien ableiten zu können.

1. Anforderungen, die an Kesselbaustoffe gestellt werden, und ihre Erfüllung durch das heutige Kesselflußeisen.

Die Verwendungsgebiete der Kesselbaustoffe sind in der Hauptsache: Kesselblech, geschmiedete Kesseltrommeln, Rohre und Niete. Vergegenwärtigen wir uns zunächst, welche Anforderungen an die Kesselbaustoffe hinsichtlich der Herstellungsverfahren und hinsichtlich der Betriebsbrauchbarkeit gestellt und wie diese Anforderungen erfüllt werden.

Zunächst müssen Kesselbaustoffe gute Warmverarbeitbarkeit besitzen. Sie müssen sich also gut walzen und schmieden lassen sowie sich zum Warmnieten eignen.

Ferner ist auch weitgehende Kaltbearbeitbarkeit zu fordern, da bei der Herstellung der Kessel vielfach Kaltverformungen unvermeidlich sind, wie z. B. das Biegen der Bleche, das Einwalzen¹⁾ der Rohre, das Verstemmen der Niete usw.

Sodann wird man im allgemeinen gute Schweißbarkeit verlangen.

Man kann nun sagen, daß die bisher genannten Anforderungen von unsern heutigen Kesselbaustoffen anstandslos erfüllt werden.

Weitere Forderungen ergeben sich hinsichtlich des Verhaltens der Baustoffe im Kesselbetrieb. Hier ist zunächst eine genügende Festigkeit bzw. Streckgrenze sowie gute Zähigkeit des Flußeisens zu verlangen, insbesondere auch bei höheren Temperaturen, die im Kesselbetrieb bis 450° C und darüber steigen können².

Wie Ihnen bekannt ist, werden diese Anforderungen von unsern heutigen Kesselbaustoffen wenigstens bei der Abnahmeprüfung erfüllt. Für normale Verhältnisse reicht durchweg unser übliches unlegiertes Kessel-Flußeisen aus. Für besonders hohe Drucke stehen Nickelflußeisen zur Verfügung. Wie Ihnen Abb. 1 zeigt, übertreffen letztere das unlegierte Flußeisen in bezug auf die Streckgrenze in der Wärme sehr wesentlich und stellen ein vorzügliches Kesselbaumaterial dar, wie aus dem Bericht von P. Goerens vom Jahre 1924³ mit aller Deutlichkeit hervorgeht. Der allgemeinen Einführung von Nickelflußeisen steht leider sein höherer Preis entgegen. Andererseits ist Nickelflußeisen der einzige Kesselbaustoff, der den höchsten Anforderungen des Kesselbaubetriebes gerecht wird.

Außer guten Festigkeitseigenschaften wird im Kesselbetrieb eine ausreichende Korrosionssicherheit des Eisens verlangt. Auch diese Forderung wird durch die heutigen Kesselbaustoffe meist ausreichend erfüllt.

Nun aber treten noch zwei weitere Anforderungen von besonderer Wichtigkeit auf. Zunächst soll der Kesselbaustoff nach der Abnahmeprüfung, also bei der Herstellung der Kessel und bei ihrem Betrieb, keine wesentlichen Veränderungen seiner Eigenschaften erleiden. Die Kesselbaustoffe sollen also nach Fertigstellung und Betrieb der Kessel noch annähernd die gleichen Festigkeitseigenschaften und die gleiche Zähigkeit besitzen, wie sie bei der Abnahme der Bleche erreicht wurden. Ferner sollen die Kesselbaustoffe gegen die Bildung der gefürchteten Betriebsrisse gesichert sein, die Ihnen als Nietlochrisse, Risse an der Stemmkannte usw. bekannt sind.

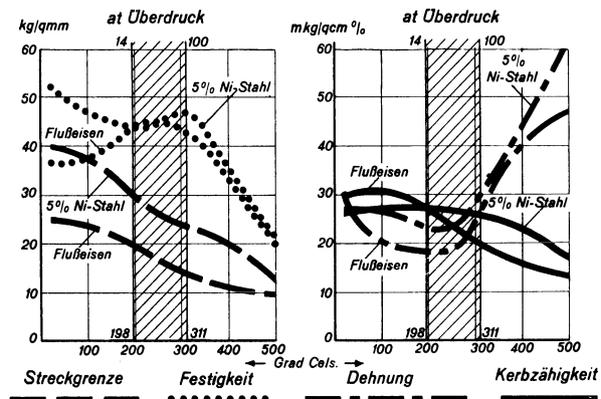


Abb. 1. Festigkeit bei höheren Temperaturen. Flußeisen und Nickelstahl. (P. Goerens.)

¹⁾ Die Hinweise und Literaturangaben befinden sich auf Seite 54.

Die Stahlindustrie aller Länder hat mit aller Sorgfalt und aller Energie versucht, auch diese letzteren Anforderungen zu erfüllen. Trotzdem sind, wie Sie wissen, die alten Schäden des Sprödewerdens der Kesselbaustoffe und der Bildung von Betriebsrissen noch nicht verschwunden. Wir stehen somit vor der ernstesten Tatsache, daß unsere Kesselbaustoffe zwar die Abnahmeprüfung erfüllen, aber durch Kesselherstellung und Betrieb teilweise Änderungen ihrer Eigenschaften erleiden, die in manchen Fällen eine Zerstörung von Kesselteilen oder ganzer Kessel zur Folge haben können.

2. Ursachen des teils schlechten Verhaltens der Kesselbaustoffe im Betrieb.

Wie 1915 von Baumann⁴ festgestellt wurde, werden die erwähnten Eigenschaftsänderungen des Flußeisens vornehmlich durch Kaltverformung hervorgebracht und durch die Erwärmung im Betrieb beeinflußt. Auf diesen Punkt wird später noch näher einzugehen sein. Unter Kaltverformungen sind hierbei in üblicher Weise alle Verformungen zu verstehen, die unterhalb der Glüh-temperatur des Eisens (etwa 550°), also z. B. auch bei der Kesseltemperatur vor sich gehen.

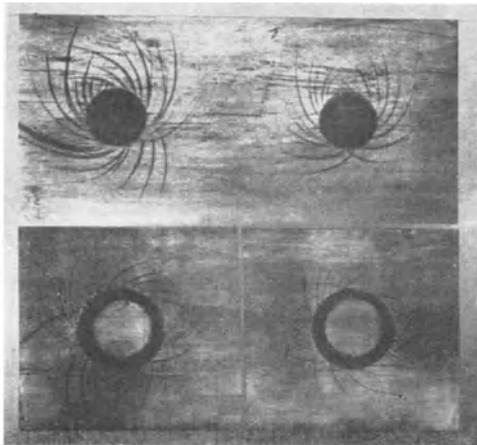


Abb. 2. Kraftwirkungsfiguren durch Stempeldruck.

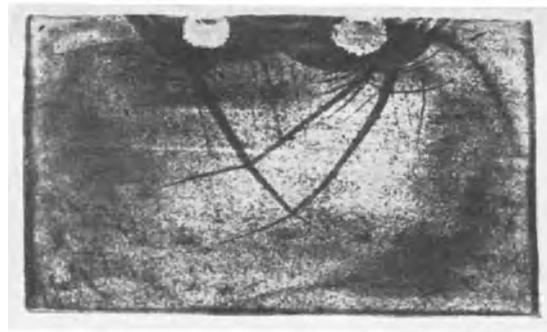


Abb. 3. Kraftwirkungsfiguren durch Eindrücken eines Ringes.

Wir müssen somit sagen, wie es auch schon 1921 in einer Sitzung der Vereinigung der Großkesselbesitzer von Bauer ausgesprochen worden ist, daß die heute übliche Prüfung der Kesselbaustoffe nicht an der richtigen Stelle des Herstellungsvorganges eingeschaltet

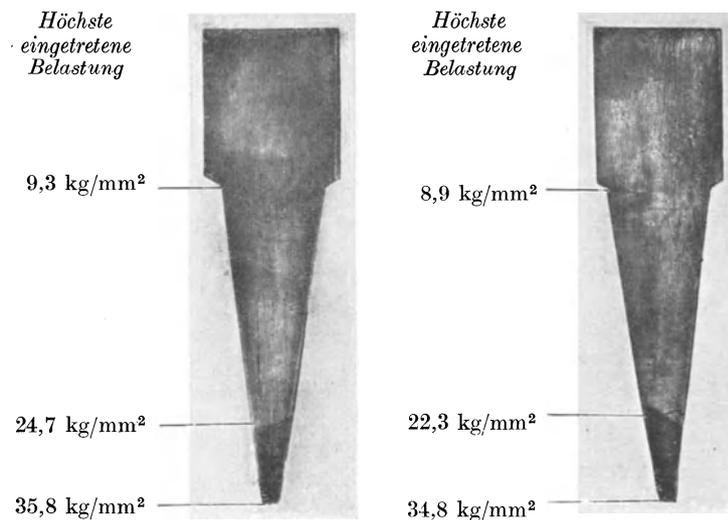


Abb. 4. Kraftwirkungsfiguren und Streckgrenze. Versuche mit konischen Zerreißstäben.

oder nicht in der den Betriebsverhältnissen entsprechenden Weise ausgeführt wird. Nach heutigem Brauch prüfen wir z. B. die Kesselbleche nur in ausgeglühtem, normalisiertem Zustand und erfassen damit nicht die Veränderungen, denen das Eisen bei der Herstellung und beim Betrieb der Kessel ausgesetzt ist.

Man gewinnt hierüber besondere Klarheit, wenn man sich an Hand des Herstellungsvorganges vergegenwärtigt, welche Arbeitsstadien z. B. ein Kesselblech von der Bramme bis zum fertigen Kessel zu durchlaufen hat und an welcher Stelle die Abnahmeprüfung eingeschaltet ist.

Zunächst wird die Bramme zum Blech ausgewalzt, darauf wird das Blech geglüht und anschließend die Abnahmeprüfung

durch Zerreißversuch, teils auch unter Berücksichtigung des Kerbschlagversuchs vorgenommen.

Hierauf erst erfolgt die Weiterverarbeitung. Das Blech wird mit der Kaltschere geschnitten, gebogen und dann genietet oder geschweißt. Diese sämtlichen Arbeitsvorgänge bewirken Kaltverformung des Blechs.

Nun ist man allerdings in der Lage, die Schädigung der Kaltverformung durch nachträgliches Glühen des Flußeisens bei etwa 920° zu beseitigen. Eine Glühung der fertigen Kessel, wie sie 1921 von Strauß und Fry⁵ angeregt wurde, ist beispielsweise bei geschweißten Kesseln möglich und wird in der Praxis von einer deutschen Firma ausgeführt. Man ist also gegebenenfalls in der Lage, bei geschweißten Kesseln die in den Vorstadien der Herstellung entstandenen Kaltbearbeitungseinflüsse durch Glühen zu beseitigen. Auf alle Fälle treten aber selbst bei ausgeglühten, geschweißten Kesseln weitere Kaltverformungen unvermeidlich auf, und zwar sowohl durch das Einwalzen der Rohre als auch später durch Formänderungen, die der Kessel infolge von Wärmespannungen im Betrieb erleidet und die zu örtlicher Überspannung des Werkstoffs führen können. Wie also auch die Herstellung des Kessels erfolgt sein mag, auf alle Fälle haben wir im fertigen Kessel mit Stellen örtlicher Kaltverformung zu rechnen.

Es wurde bereits bemerkt, daß diese Kaltverformungen des Flußeisens eine wesentliche Änderung seiner ursprünglichen Eigenschaften hervorrufen können und daß man tatsächlich bei der Prüfung benutzter Kesselbleche häufig viel ungünstigere Eigenschaften des Fluß-

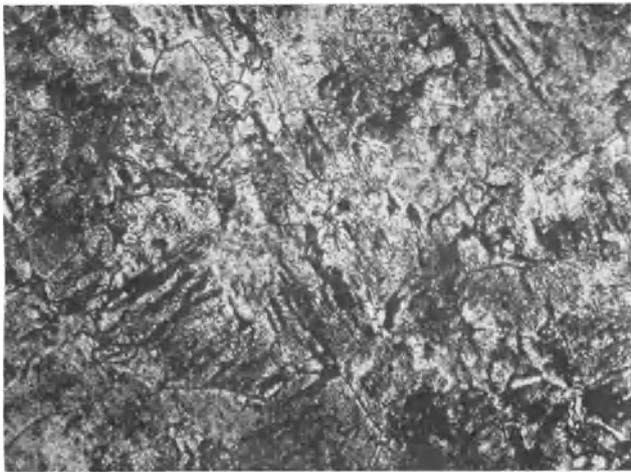


Abb. 5. Störungen im Feingefüge von weichem Flußeisen durch Kraftwirkungserscheinungen. Ätzung für mikroskopische Betrachtung.

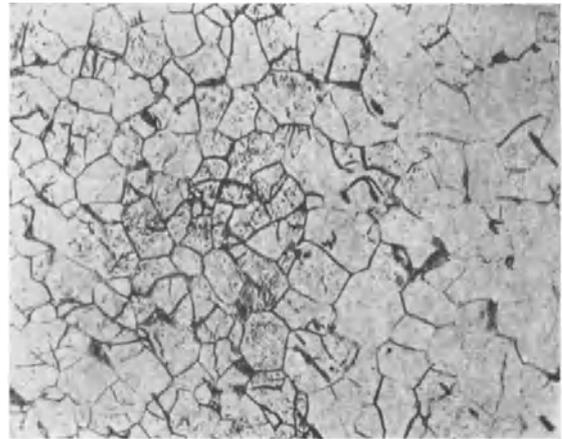


Abb. 6. Korngrenzenstörungen in einem Kraftwirkungsstreifen.

eisens findet, als sie bei der Abnahmeprüfung festgestellt wurden⁶. Hat die Kaltverformung bei etwa Zimmertemperatur stattgefunden, so werden ihre Wirkungen noch wesentlich verschlimmert, wenn nachträglich das Eisen einige Zeit auf etwa $100\text{--}300^{\circ}$ erhitzt wird, ja sogar auch wenn das Eisen bei Zimmertemperatur längere Zeit lagert. Man spricht dann von „gealtertem Flußeisen“ und versteht darunter im strengeren Sinne ein Flußeisen, das eine Kaltverformung und nachfolgende kürzere Anlaßbehandlung bei etwa $100\text{--}300^{\circ}$ oder längere Lagerung bei etwa Zimmertemperatur durchgemacht hat. Gleichfalls kommt Flußeisen in den gealterten Zustand, wenn die Verformung bei etwa $100\text{--}300^{\circ}$ vorgenommen wird. Diese Voraussetzungen sind im Kesselbetrieb immer gegeben. In unseren Kesseln liegt also stets mindestens örtlich das Flußeisen im gealterten Zustand vor.

Über die Art, wie sich Kaltverformungen im Kesselbau auswirken können, mögen Ihnen folgende Bilder Aufschluß geben. Man ist häufig durch geeignete Ätzung gealterten Flußeisens in der Lage, diejenigen Stellen nachträglich sichtbar zu machen, an denen durch Überschreitung der Streckgrenze eine Verformung des Eisens um mehr als etwa $0,2\%$ stattgefunden hat⁷. An diesen Stellen treten bei der Ätzung dunkle Figuren, die sogenannten Kraftwirkungsfiguren, in Erscheinung. Ich zeige Ihnen zunächst einige Bilder, die kennzeichnende Kraftwirkungsfiguren aufweisen (Abb. 2—4), sodann die Einwirkung der Kraftwirkungsfiguren auf das Feingefüge (Abb. 5—6) und anschließend die Ausbildung von Kraftwirkungsfiguren durch Beanspruchung, wie sie im Kesselbau auftreten (Abb. 7—22). Die Bilder lassen erkennen, daß selbst schwache Kaltverformungen bei nachfolgender Lagerung oder Erwärmung tiefgreifende Veränderungen des Eisens hervorrufen können.

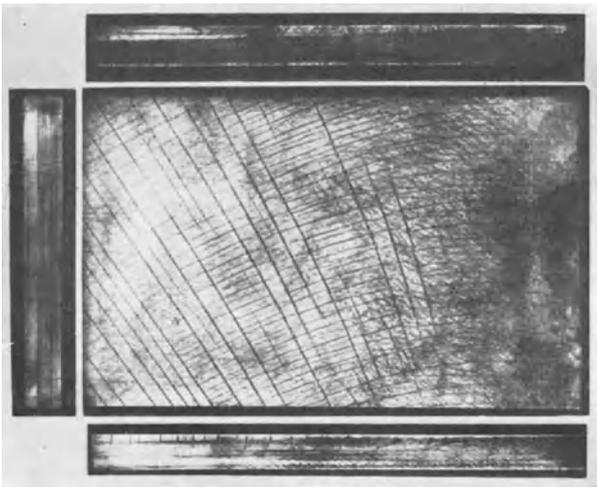


Abb. 7. Kraftwirkungsfiguren durch Scherenschnitt. Oberflächenätzung, Längs- und Querschnitte.

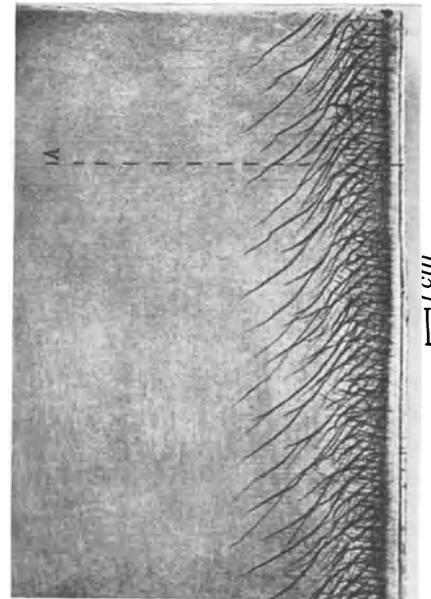


Abb. 10. Brennschnitt durch ein 36 mm-Blech (Kraftwirkungsfiguren).

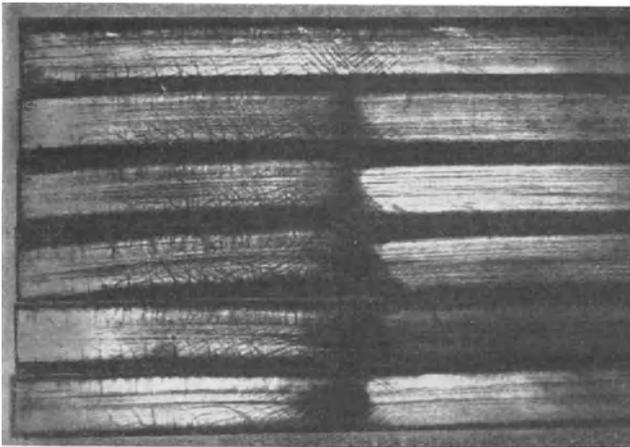


Abb. 8. Kraftwirkungsfiguren in verschiedenen Stadien eines Scherenschnittes (Querschnitt).

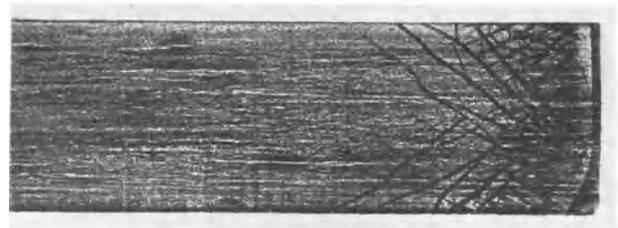


Abb. 11. Querschnitt zu Abb. 10.

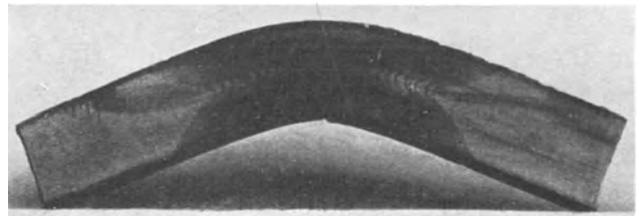


Abb. 12. Kraftwirkungsfiguren durch Biegung (Längsschnitt).

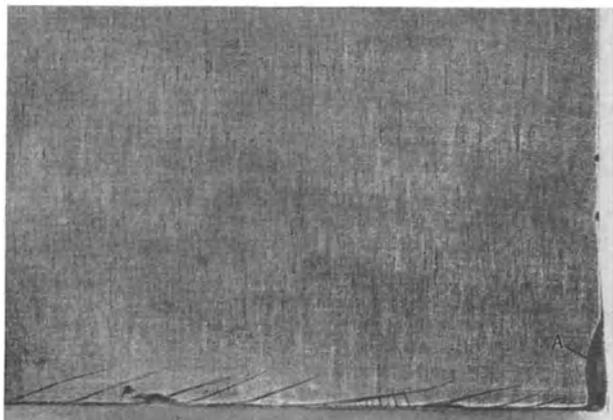
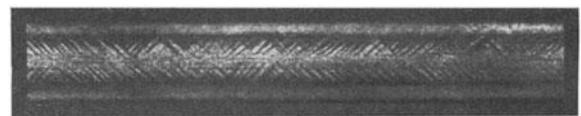
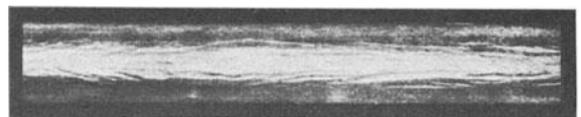


Abb. 9. Kraftwirkungsfiguren durch Kaltsägen im 23 mm-Blech (Oberflächenätzung).



Längsprobe



Querprobe

Blechstärke 20 mm

Abb. 13. Kraftwirkungsfiguren in gealtertem Kesselblech.

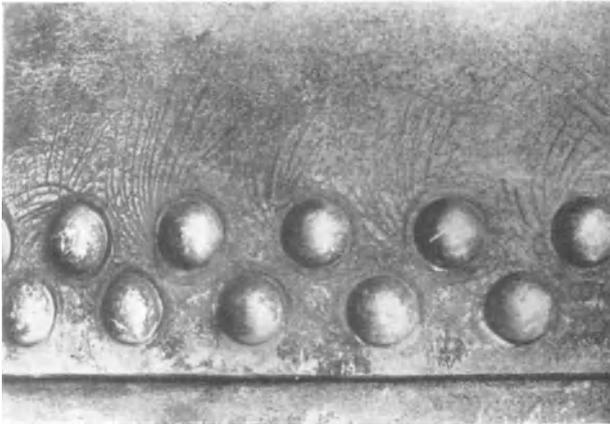


Abb. 14. Fließfiguren, von Nieten ausgehend

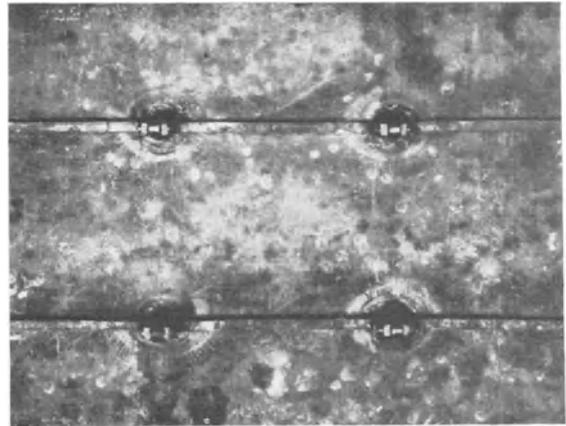


Abb. 19. Fließfiguren durch Schweißung.

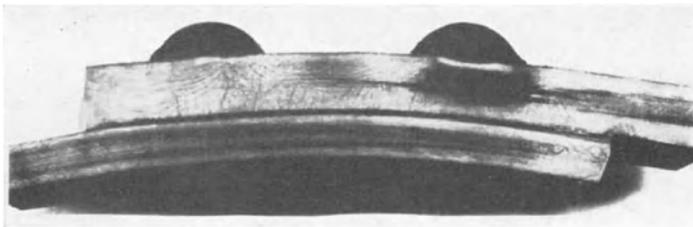


Abb. 15. Genietetes Kesselblech. Kraftwirkungsfiguren durch Nietung (Querschnitt).



Abb. 16. Kraftwirkungsfiguren um ein Nietloch.

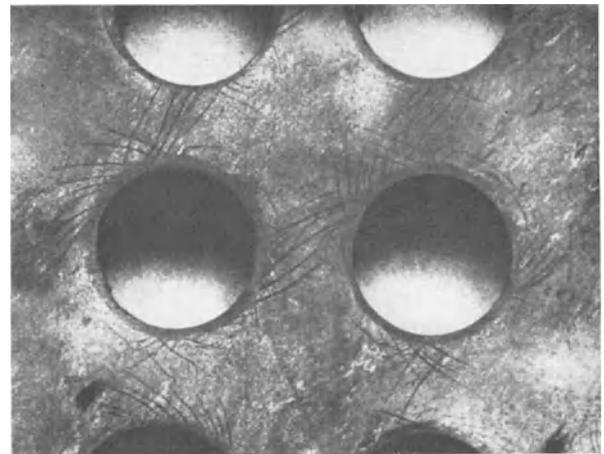


Abb. 20. Kraftwirkungsfiguren durch Einwalzen von Rohren.

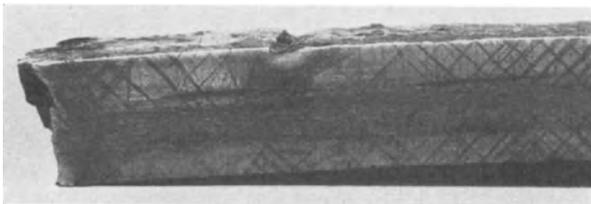


Abb. 17. Kraftwirkungsfiguren durch Verstemmen.

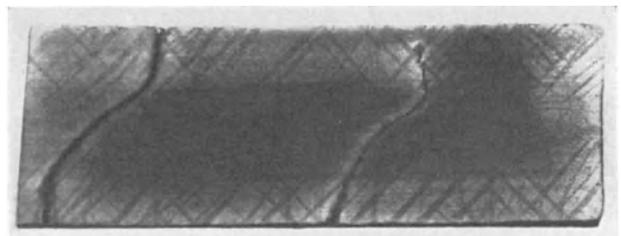


Abb. 21. Risse in einem Kesselblech mit Kraftwirkungsfiguren.

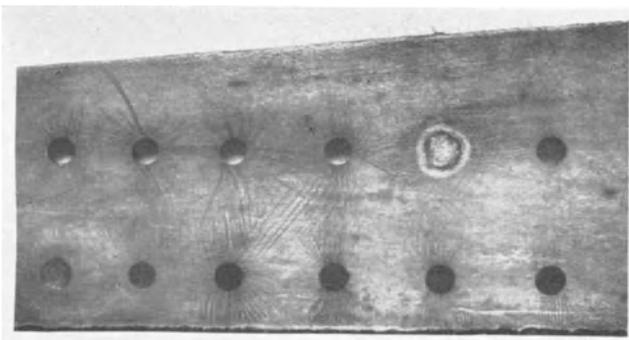


Abb. 18. Kraftwirkungslinien durch Nachschweißung von Nietlöchern.
Sicherheit des Dampfkesselbetriebes.

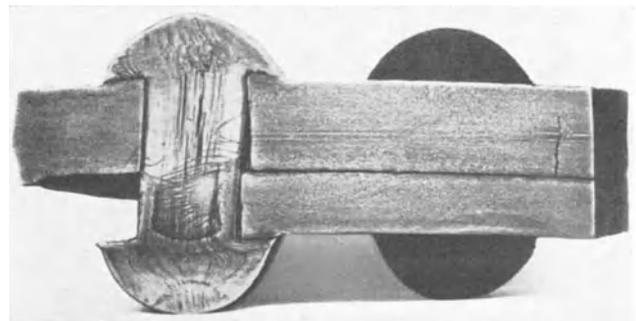


Abb. 22. Kraftwirkungsfiguren durch Scherbeanspruchungen in einem Niet.

3. Wirkung der Alterung auf Kesselbaustoffe.

Die Eigenschaftsänderungen des Flußeisens durch Alterung lassen sich bereits mittels der Zerreißprobe feststellen. Besonders scharf werden sie jedoch durch die Kerbschlagprüfung erfaßt. In Abb. 23 sehen Sie den Einfluß des Reckens und des Anlassens auf die Kernzähigkeit von unlegiertem und von nickellegiertem Flußeisen dargestellt. Während nickellegiertes Flußeisen durch die Alterung keine wesentliche Verminderung seiner Kernzähigkeit erleidet, nimmt die Kernzähigkeit des normalen Kesselflußeisens bei den vorliegenden Versuchsbedingungen durch Alterung von 25 mkg/qcm auf 2,8 mkg/qcm ab. Es ist bekannt, daß derartig niedrige Kernzähigkeiten in Kesselblechen, die im Betrieb versagt hatten, häufig gefunden werden.

Aber nicht allein die Zähigkeit des Flußeisens wird durch die Alterung erheblich beeinflußt. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß auch die Empfindlichkeit des Flußeisens gegen Ribbildung unter Einwirkung des Speisewassers eng mit dem gealterten Zustand zusammenhängt⁸. Soweit bisher bekannt ist, sind solche Ribbildungen nur dort aufgetreten, wo das Flußeisen in gespanntem oder gealtertem Zustand vorlag, während nicht verformtes, gegluhtes Flußeisen gegen die Einwirkung des Speisewassers wenig empfindlich zu sein scheint. Es ist auch hier hervorzuheben, daß wir in unseren Kesseln stets mit Stellen zu rechnen haben, an denen das Flußeisen in gespanntem und gealtertem Zustand vorliegt.

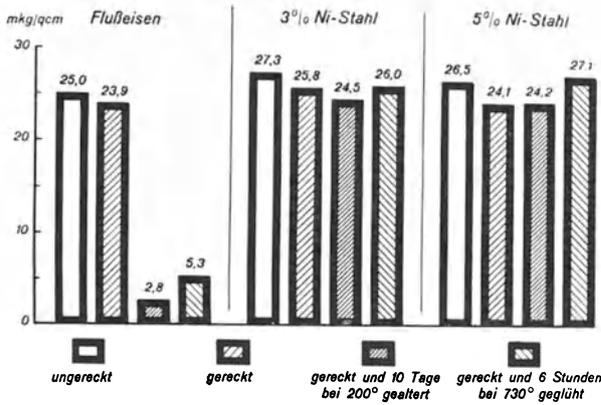


Abb. 23. Kaltreckung, Alterung und Rekristallisation. Einfluß auf die Kernzähigkeit (P. Goerens).

Ähnliche, aber stärkere Wirkungen als Kesselspeisewasser haben konzentrierte Laugen. Es hat sich gezeigt, daß die Zerstörung gealterten Flußeisens um so schneller eintritt, je höher die Konzentration und je höher die Temperatur der Laugen ist⁹. Ferner deuten neuere Versuche der Firma

Krupp darauf hin, daß auch etwaige elektrolytische Vorgänge hierbei von sehr starkem Einfluß sein können.

Auch auf die Korrosionsfähigkeit des Flußeisens hat der gealterte Zustand starken Einfluß, wie auf der vorjährigen Tagung der Vereinigung der Großkesselbesitzer in Darmstadt Dr. Werner¹⁰ festgestellt hat. Werner zeigte, daß z. B. in Milchsäurekesseln eben die Stellen örtlich stark zerfressen waren, an denen Kraftwirkungsfiguren, also Kaltverformung, vorgelegen hatten.

Nach allen diesen Beobachtungen unterliegt es keinem Zweifel, daß ein außerordentlich hoher Prozentsatz der heute beobachteten Kesselschäden darauf zurückzuführen ist, daß der verwandte Kesselbaustoff durch Alterung in seinen Eigenschaften merklich geschädigt worden ist.

Man könnte nun aus den vorstehenden Mitteilungen folgern, daß alle Kessel, die heute betrieben werden, sich schlecht verhalten müßten. Hier treten aber zwei Momente zugunsten der Kessel in Erscheinung. Einerseits hat sich gezeigt, daß auch durch Alterung sprödes Flußeisen bei Temperaturen oberhalb etwa 100° hohe Kernzähigkeit besitzt, wie Sie aus Abb. 24 ersehen¹¹. Bei den für Kessel üblichen Betriebstemperaturen befindet sich demgemäß stets das Eisen in zähem Zustand. Allerdings wird, wie schon bemerkt, die Empfindlichkeit gegen alkalische Speisewässer durch die Temperatur gesteigert. Ein zweites günstiges Moment leitet sich aus der Beobachtung ab, daß nicht alle Flußeisenlieferungen durch Alterung in gleichem Maße verschlechtert werden¹². Ich werde darauf noch zurückkommen. Es ist aber bisher nicht möglich gewesen, auf diese Eigenschaften des Flußeisens bewußt einzuwirken¹³.

Es ist nun wichtig, sich einmal Rechenschaft zu geben, in welchem Umfang überhaupt Schäden im Kesselbetrieb auftreten. In Abb. 25 zeige ich Ihnen die Kurve der Kesselexplosionen in den Jahren 1877—1923 nach Bach. Die Kurve zeigt allerdings einen erfreulichen Abfall der Explosionen im Lauf der letzten Jahre trotz Erhöhung der Kesselzahl. Immerhin ist zu erkennen, daß wir auch heute noch im Jahresdurchschnitt mit etwa 7 bis 8 Kesselexplosionen zu rechnen haben, und es bleibt dem Zufall überlassen, ob hierbei größerer oder geringerer Schaden entsteht.

Darüber hinaus haben wir jedoch die viel zahlreicheren Fälle zu betrachten, wo durch rechtzeitiges Eingreifen der Betriebsleitung oder durch Prüfung der Dampfkesselüber-

wachungsvereine Unglücksfälle vermieden werden und der Schaden sich auf Erneuerung des Kessels oder einzelner Kesselteile, wie Kesselschüsse, Rohre usw. beschränkt. Die Zahl dieser Schäden beläuft sich jährlich auf Hunderte von Fällen und zeigt nicht die abnehmende Tendenz wie die Zahl der Explosionen.

Wenn wir nun auch bei Kesselexplosionen deren Ursachen nicht ohne weiteres auf fehlerhafte Eigenschaften des Werkstoffs zurückführen dürfen, so ist bei den letztgenannten allmählichen Zerstörungen die Qualität des Flußeisens von einschneidender Bedeutung.

Diese Betrachtungen lassen erkennen, daß wir im Kesselbau heute noch vor Unsicherheiten stehen, deren Beseitigung gefordert werden muß.

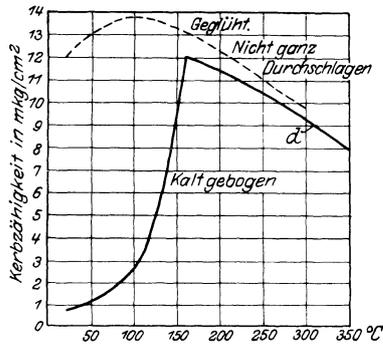


Abb. 24. Warm-Kerbschlagversuche mit geglühtem und kaltgebogenem Kesselblech (Strauß und Fry).

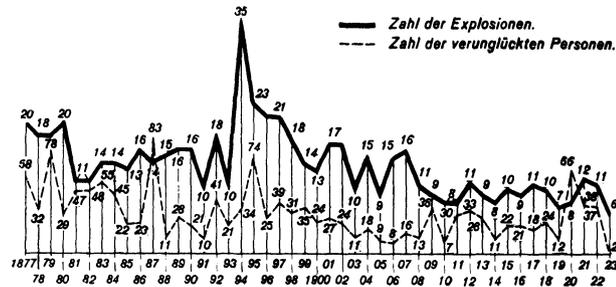


Abb. 25. Zahl der Dampfkesselexplosionen 1877 bis 1923 (nach C. Bach).

4. Wege zur Einschränkung der durch Alterung des Flußeisens entstehenden Schäden.

Wir hatten gesehen, daß normales Kesselflußeisen durch Kaltverformung Veränderungen erleidet, die einerseits zur Herabsetzung seiner Kerbzähigkeit führen, andererseits auch die Sicherheit gegen Kesselspeisewasser beeinträchtigen. Nun ist, wie bereits gesagt, wiederholt beobachtet worden, daß sich in dieser Hinsicht nicht alle Flußeisenlieferungen gleichmäßig verhalten. Insbesondere hat kürzlich in Zürich Baumann¹⁴ auf diesen Punkt aufmerksam gemacht. Weiter sei erwähnt, daß z. B. Ludwik¹⁵ 1926 über ein Flußeisen berichtet hat, das durch Alterung nicht spröde wurde. Andere Beobachtungen gehen dahin, daß auch bei der Ätzung auf Kraftwirkungsfiguren Unterschiede im Verhalten verschiedener Flußeisensorten zu beobachten sind.

Alle diese Beobachtungen deuten darauf hin, daß unsere heutigen Flußeisenqualitäten in ihren Eigenschaften noch nicht sicher erfaßt sind. Jedenfalls sind chemische Analysen und Zerreißversuche nicht ausreichend, um ein Flußeisen genau zu kennzeichnen. Man gewinnt weiter den Eindruck, daß entgegen der heute üblichen Auffassung, die Alterungsempfindlichkeit weichen Flußeisens nicht eine Eigenschaft dieses Werkstoffs an sich ist, sondern daß irgendwelche bisher unbekanntes Verhältnisse die Alterungsempfindlichkeit des Flußeisens wesentlich beeinflussen.

Diese Auffassung hat sich im Lauf längerer Untersuchungen, über die ich Ihnen im folgenden berichten will, als richtig erwiesen. Es ist gelungen, ein unlegiertes Flußeisen herzustellen, das alle an gutes Kesselflußeisen zu stellenden Anforderungen insbesondere hinsichtlich Festigkeitseigenschaften und Schweißbarkeit leicht erfüllt und das darüber hinaus die Eigenschaft besitzt, selbst durch 10proz. Kaltverformung und nachfolgendes Anlassen nicht spröde zu werden. Ich will Ihre Zeit nicht durch Schilderungen der zur Herstellung dieses Flußeisens von mir beschrittenen Wege in Anspruch nehmen, will auch nicht auf die etwas verwickelten theoretischen Verhältnisse eingehen, sondern beschränke mich darauf, über einige mit dem neuen Sonderflußeisen erzielten Ergebnisse zu berichten.

Zunächst zeige ich Ihnen in Abb. 26 das Ätzbild einer Tiefätzung auf Kraftwirkungsfiguren von üblichem Kesselflußeisen und dem neuen Sonderflußeisen. Sie erkennen, daß letzterer Werkstoff im Gegensatz zu dem üblichen Kesselflußeisen praktisch keine Kraftwirkungsfiguren bei der Ätzung annimmt.

Sodann zeige ich Ihnen in Abb. 27 Kurven, die die Kerbzähigkeit von normalem Kesselflußeisen und dem neuen Sonderflußeisen nach verschiedenen Reckgraden und teilweise nach dem Anlassen in Vergleich setzen. Die Kurven entstammen einem Versuchsbericht der Materialprüfungs-Anstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart. Über die weiteren Ergebnisse dieser Vergleichsversuche wurde bereits von Herrn Prof. Baumann auf der Tagung des Allgemeinen Verbandes der Deutschen Dampfkesselüberwachungsvereine in Zürich am 7. September 1926 Bericht erstattet. Die Kurven lassen klar erkennen, daß das neue Sonder-

flußeisen selbst nach 20proz. Reckung und Anlassen noch fast seine ursprüngliche Kerbzähigkeit besitzt, während das normale Kesselflußeisen bereits bei 5proz. Reckung und Anlassen spröde geworden war. In den Abb. 28 a und 28 b sind Kerbschlagproben von gealtertem Kesselflußeisen und Kruppschem Sonderflußeisen dargestellt.

Ich erwähnte bereits, daß auch alterungsprödes Flußeisen beträchtliche Kerbzähigkeit aufweist, wenn die Kerbschlagprüfung bei höheren Temperaturen vorgenommen wird, etwa bei den in den Dampfkesseln herrschenden Temperaturen. Man könnte daraus folgern, daß die Sprödigkeit des gealterten Eisens bei Zimmertemperatur bedeutungslos ist. Das ist jedoch keineswegs der Fall. Wird nämlich ein Kessel etwa zur Revision abgekühlt, so entstehen im Material Spannungen, die zur Zerstörung führen können, falls das Kesselflußeisen seine ursprüngliche Kerbzähigkeit eingebüßt hat. Dieser Um-

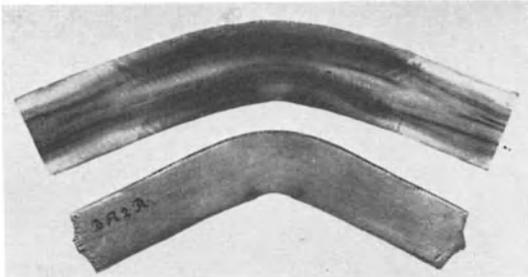


Abb. 26. Tiefätzungen gealterter Biegeproben auf Kraftwirkungsfiguren.

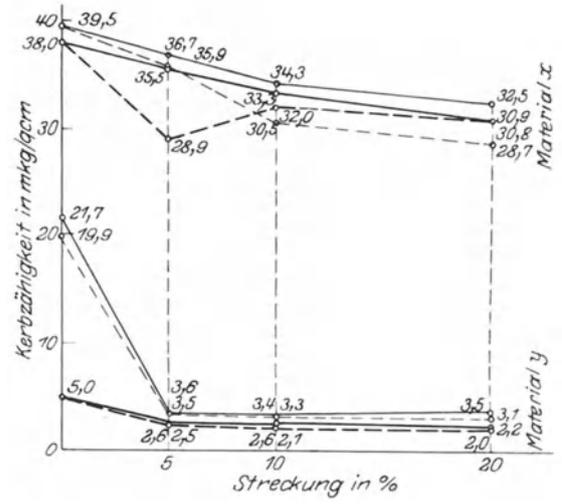


Abb. 27. Kerbzähigkeit von gerecktem, normalem Flußeisen (y) und Kruppschem Sonderflußeisen (x) (R. Baumann).

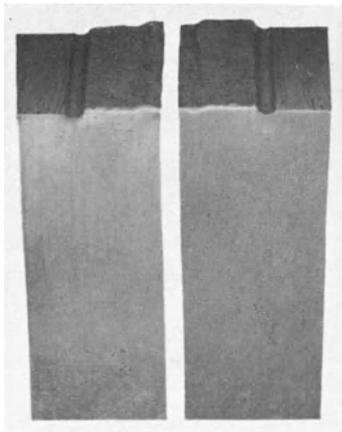


Abb. 28a. Kesselflußeisen. 10% gereckt, 1/2 Stunde auf 200° angelassen. Kerbzähigkeit 2,1 mkg/qcm.

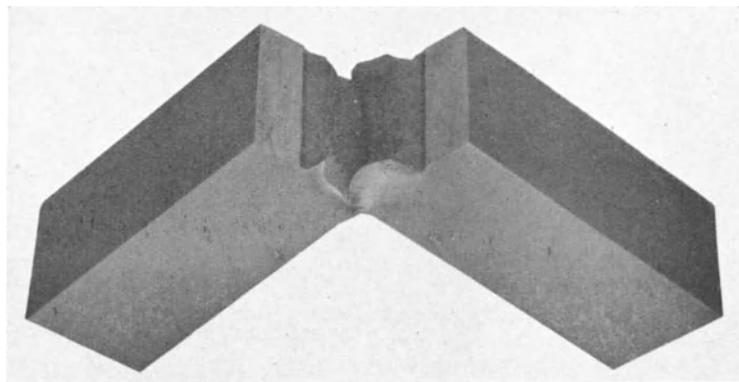


Abb. 28b. Kruppsches Sonderflußeisen. 10% gereckt, 1/2 Stunde auf 200° angelassen. Kerbzähigkeit > 31 mkg/qcm.

stand tritt sowohl bei genieteten als auch bei geschmiedeten oder geschweißten Kesseln in Erscheinung.

Es schien nun wichtig zu prüfen, bei welchen Temperaturen die verschiedenen Flußeisensorten in spröden bzw. zähen Zustand gelangen. Mailänder¹⁶ sowie Maurer und Mailänder¹⁷ haben festgestellt, daß dieser Übergang ziemlich plötzlich bei Temperaturen stattfindet, die für die verschiedenen Werkstoffe verschiedene Höhe besitzen (Abb. 29).

Bei tiefen Temperaturen findet man geringe, bei hohen Temperaturen hohe Kerbzähigkeiten des Flußeisens. Dazwischen treten in der Temperaturzone, wo die Kerbzähigkeit plötzlich absinkt, Streuwerte auf. Diese Erscheinung ist sowohl bei geglühtem als auch bei gealtertem Flußeisen zu beobachten.

Die Lage dieses Abfalls der Kerbzähigkeit wird allerdings bei verschiedenen Temperaturen gefunden, je nachdem man größere oder geringere Breite der Kerbschlagprobe wählt.

Schlaggeschwindigkeit und Kerbform spielen dabei eine weitere Rolle. Die Kerbform kann hier außer Betracht gelassen werden, da sie bei gleichmäßiger Gestaltung den Vergleich nicht beeinträchtigt. Auf den Einfluß der Versuchsgeschwindigkeit komme ich noch zurück.

Man gelangt nun zu einem klaren Vergleich der Kerbzähigkeiten verschiedener Werkstoffe, wenn man in Abhängigkeit von Temperatur und Probenbreite die Grenze darstellt, wo die Kerbzähigkeit plötzlich absinkt. Es ist das in Abb. 30 für übliches Kesselblechflußeisen und das neue Sonderflußeisen geschehen. Die Grenze wurde so gewählt, daß unter Berücksichtigung der Streuwerte nur diejenigen Proben als zähe bezeichnet wurden, deren Kerbzähigkeit mindestens 8 mkg/qcm betrug. Es ist hervorzuheben, daß bei mehreren hundert Proben, die zerschlagen wurden, nur ein einziger Ausreißer auftrat, der sich dem Bild nicht einfügte. Man sieht daraus, daß die Kerbschlagprobe wohl geeignet ist, bei richtiger Anwendung eine sehr klare Kennzeichnung des Werkstoffes zu ermöglichen.

Die Kurven besagen, daß für übliches Kesselflußeisen zwischen der Zähigkeit im geglähten und im gealterten Zustand ein starker Unterschied besteht, und daß dieses Flußeisen im gealterten Zustand bei Temperaturen, die weit über der Zimmertemperatur liegen, noch spröde ist. Die Kerbzähigkeit des neuen Sonderflußeisens wird dagegen durch die Alterung recht wenig beeinflusst. Das Sonderflußeisen besitzt auch im gealterten Zustand oberhalb 0° C gute Zähigkeit. In vergütetem Zustand tritt der Abfall der Kerbzähigkeit bei

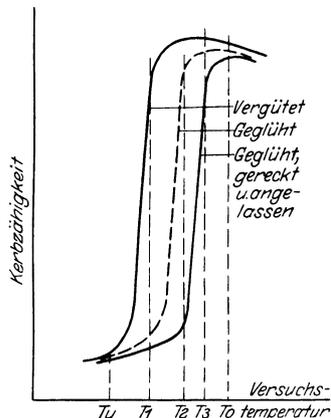


Abb. 29. Abfall der Kerbzähigkeit nach verschiedenen Vorbehandlungen (Maurer und Mailänder).

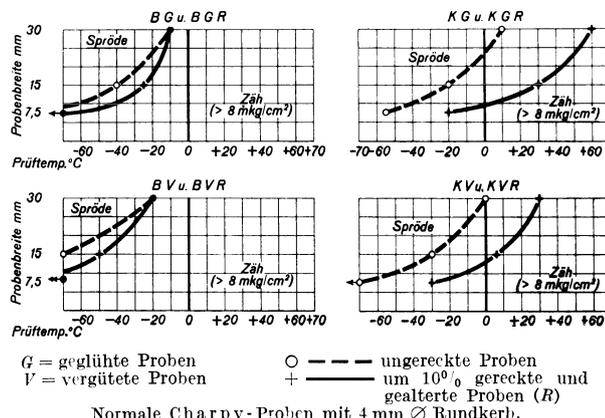


Abb. 30. Lage des Abfalls der Kerbzähigkeit bei Kruppschem Sonderflußeisen (B) und Kesselblech (K) in Abhängigkeit von Probenbreite und Prüftemperatur.

beiden Werkstoffen sowohl in ungealtertem als auch in gealtertem Zustand erst bei tieferer Temperatur ein.

Nun mag man sich allerdings fragen, ob die Kerbschlagprüfung ihrem Wesen nach geeignet ist, zur Untersuchung von Kesselbaustoffen herangezogen zu werden, da sie immerhin eine Prüfung darstellt, die den Beanspruchungen im Kesselbetrieb nicht entspricht. Demgemäß wäre zweifellos eine langsam wirkende statische Prüfung geeigneter, die Verhältnisse richtig zu erfassen.

Es wurden daher Nachprüfungen der gefundenen Werte mittels der statischen Kerbbiegeprobe vorgenommen. Diese Ergebnisse bestätigten vollauf die Ergebnisse der Kerbschlagprüfung, wie sie in Abb. 30 dargestellt sind. Es erscheint damit zulässig, an Stelle der schwieriger ausführbaren statischen Biegeprobe die Kerbschlagprobe zur Kennzeichnung der Werkstoffeigenschaften heranzuziehen.

Demgemäß muß der Kerbschlagprüfung von Flußeisen in gealtertem Zustand besondere Bedeutung beigemessen werden.

Wir hatten erkannt, daß die Alterung normalen Kesselflußeisens nicht nur häufig ein Sprödewerden des Flußeisens hervorruft, sondern gleichfalls mit der Bildung von Betriebsrissen unter dem Einfluß von Kesselspeisewässern in ursächlichem Zusammenhang steht. Teils aus diesen Beobachtungen, teils aus theoretischen Überlegungen wurde gefolgert, daß das neue Sonderflußeisen sich auch in dieser Richtung besonders günstig verhalten würde. Die Nachprüfung wurde mittels gealterter, gespannter Biegeproben, wie sie in Abb. 31 dargestellt sind, vorgenommen. Dabei ergab sich, daß Biegeproben aus üblichem Kesselflußeisen bei den gewählten Versuchsbedingungen (es handelte sich um heiße konzentrierte Natronlauge) schon nach 2—7 Tagen aufrissen, wie es in Abb. 31 dargestellt ist, während Proben des neuen Sonderflußeisens bei geeigneter Wärmebehandlung nach mehrwöchigem Versuch unzerstört blieben. Nach Mitteilung von Baumann wächst die Schnelligkeit der Zerstörung mit der Temperatur. Da Kesselspeisewasser vielfach als sehr schwache Laugen hoher

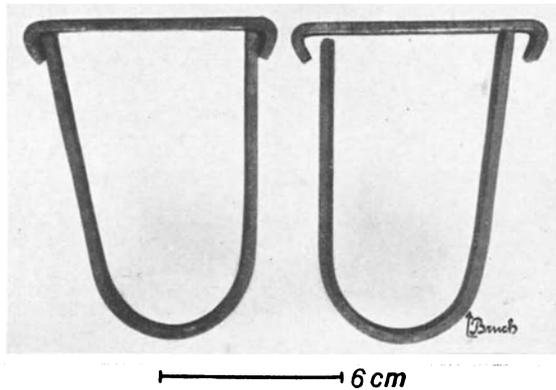
Temperatur anzusehen sind, ist zu vermuten, daß sich die Ergebnisse dieser Prüfungen auf das Verhalten der untersuchten Flußeisensorten gegen Kesselspeisewässer übertragen lassen.

Weiterhin wurden einige Versuche über den korrodierenden Angriff verdünnter Schwefelsäure 1:40 bei Zimmertemperatur vorgenommen. Nach 100stündigem Versuch war die durchschnittliche Gewichtsabnahme der gealterten Proben bei normalem Kesselflußeisen 4,0 g/qm pro Stunde, bei dem neuen Sonderflußeisen nur 1,3 g/qm pro Stunde.

Es würde zu weit führen, über die Einzelheiten der unternommenen Versuche zu berichten. Jedenfalls gewinnt man bereits aus den mitgeteilten Ergebnissen den Eindruck, daß die Kerbschlagprüfung des Flußeisens im gealterten Zustand außerordentlich wichtige Aufschlüsse über die Eignung eines Flußeisens im Kesselbetrieb vermittelt, und zwar sowohl hinsichtlich der Zähigkeit des Werkstoffs im Betrieb, als auch hinsichtlich der Sicherheit gegen Ribbildung unter dem Einfluß des Speisewassers und hinsichtlich Korrosionssicherheit.

Die Berechtigung und die Notwendigkeit einer solchen Prüfung leitet sich aus der Tatsache her, daß in den Dampfkesseln das Flußeisen stets mindestens örtlich in gealtertem Zustand vorliegt, und daß die Ergebnisse der leicht ausführbaren Kerbschlagprobe mit denen der schwierigeren Kerbbiegeprobe nach den bisherigen Untersuchungen gut übereinstimmen.

Wenn wir die Ergebnisse der Betrachtungen und geschilderten Untersuchungen zusammenfassen, so ist etwa festzustellen, daß unser heute verwandtes Kesselflußeisen Unsicherheiten



Sonderflußeisen Kesselflußeisen
Abb. 31. Flußeisenproben für Laugenprüfung.

in sich trägt, die wir bisher nicht genügend beherrscht haben. Neben guten Ergebnissen sind nicht selten Fälle beobachtet worden, in denen der Kesselbaustoff, sei es in Form von Blechen, Rohren oder Nieten, trotz guten Verhaltens bei der Abnahmeprüfung später im Betrieb versagt hat. In sehr vielen Fällen läßt sich dieses Versagen auf die Wirkung vorausgegangener Kaltverformung zurückführen, und zwar sowohl dort, wo ein Sprödwerden des Flußeisens auftritt als auch dort, wo Zerstörungen durch Kesselspeisewässer oder Laugen zu verzeichnen sind.

Es ist nun gelungen, eine Flußeisenqualität herzustellen, die im Gegensatz zu dem bisher verwandten Kesselflußeisen die Eigenschaft besitzt, ihre Kerbzähigkeit auch nach starker Kaltverformung und nachfolgendem Anlassen

beizubehalten. Zugleich ergab sich, daß dieses Flußeisen erhöhte Sicherheit gegen Schädigung durch Kesselspeisewasser, Laugen und schwache Säuren besitzt.

Sie werden nun die Frage stellen, ob das neue Sonderflußeisen, über das ich berichtet habe, volle Gewähr bietet, die im Kesselbetrieb beobachteten Schäden mit einem Schläge zu beheben. Es wäre verfrüht, hierauf bereits heute mit einem klaren Ja zu antworten. Ich würde es aber vermieden haben, Ihnen Hoffnungen zu erwecken, wenn nicht lange Versuchsreihen dahin deuteten, daß uns das neue Flußeisen dem Ziel wesentlich näher bringt.

Literatur.

- ¹ Siehe z. B. C. Bach: Z. V. d. I. 1913, S. 461ff.
- ² Siehe insbesondere C. Bach im Protokoll des Int. Verbandes der Dampfkesselüberwachungsvereine 1904, (Barmen-Elberfeld), sowie Forsch.-Arb. V. d. I. Nr. 28.
- ³ Goerens, P.: Z. V. d. I. 1924, S. 41ff.
- ⁴ Baumann, R.: Z. V. d. I. 1915, S. 628ff. — Siehe ferner O. Bauer: Mitt. Materialpr.-Amt Berlin-Dahlem 1917, S. 194ff. — Fettweis: Stahleisen 1919, S. 34ff. — Pomp, A.: Stahleisen 1920, S. 1261ff. — Bauer, O.: Mitt. Materialpr.-Amt Berlin-Dahlem 1921, S. 251ff.
- ⁵ Strauß und Fry: Stahleisen 1921, S. 1133ff.
- ⁶ Siehe auch C. Bach im Protokoll des Int. Verbandes der Dampf-Kesselüberwachungsvereine, 1904 (Barmen-Elberfeld) sowie Forsch.-Arb. V. d. I. Nr. 28.
- ⁷ Fry: Stahleisen 1921, S. 1093ff.
- ⁸ Siehe das Buch: „Speisewasserpflge“. Selbstverlag der Vereinigung der Groß-Kesselbesitzer E.V., Berlin-Charlottenburg 1926. Vorträge von Baumann, Thiel, Kriegsheim, Ries, Werner, Steinmüller, sowie die in diesem Buch wiedergegebenen Arbeiten von Rosenhain, Jones mit Zitierungen der englischen Forscher. Ferner die neueren Arbeiten von Parr, sowie R. Baumann, Vortrag auf der Tagung des allgemeinen Verbandes der deutschen Dampfkesselüberwachungsvereine, Zürich 1926 und Dr. Guilleaume: Hauptversammlung der Vereinigung der Großkesselbesitzer, Cassel 1926.
- ⁹ Baumann, R.: Vortrag, Tagung des allgemeinen Verbandes der deutschen Dampfkesselüberwachungsvereine. Zürich 1926.

- ¹⁰ Werner, M.: Speisewasserpflege. Berlin-Charlottenburg: Selbstverlag der Vereinigung der Großkesselbesitzer E.V., 1926.
- ¹¹ Strauß und Fry: a. a. O.
- ¹² Charpy: Comptes Rendues Bd. 158. 1914. Vgl. Stahleisen 1914, S. 845.
- ¹³ Meyer und Eichholz: Werkstoffausschuß-Ber. Nr. 20 d. V. d. Eisenhüttenleute, S. 6. — Oberhoffer, P.: Das technische Eisen. Berlin: Julius Springer 1925. S. 397ff. — Ludwik, P.: V. d. I. 1926, S. 382.
- ¹⁴ Baumann, R.: Tagung des allgemeinen Verbandes der deutschen Dampfkesselüberwachungsvereine. Zürich 1926.
- ¹⁵ Ludwik, P.: a. a. O.
- ¹⁶ Mailänder, R.: Kruppsche Monatsh. 1924, S. 16ff.
- ¹⁷ Maurer, E. und R. Mailänder: Stahleisen 1924, S. 409ff.

Äußerung zum Vortrag Dr.-Ing. Fry.

Von Dr.-Ing. K. Daeves, Forschungsabteilung der Vereinigten Stahlwerke A.-G., Düsseldorf.

Die Frage der Alterung von Kesselbaustoffen hat die Vereinigung der Großkesselbesitzer seit Jahren eingehend beschäftigt.

In einem Vortrage vor Ihrer Vereinigung in Nürnberg am 27. Februar 1923 über die Eigenschaften von Kesselblechen bei höheren Temperaturen¹⁾ habe ich auf die Wirkungen der Alterserscheinungen, die bei normalem, weichem Flußeisen nach jeder Kaltstreckung im Laufe der Zeit und verstärkt dann eintreten, wenn das Material Temperaturen zwischen 100—300° ausgesetzt wird, hingewiesen.

Wie die hochinteressante Untersuchung von 13 Kesselschäden im Vortrage von Herrn Dr. Guilleaume zeigt, läßt sich diese Alterungstheorie als Erklärung für alle von ihm genannten Beispiele anwenden. Wenn auch in einigen Fällen das Material seiner Zusammensetzung und Warmbehandlung nach zu beanstanden war, so sind doch stets, wie alle Gutachten zeigen, die Schäden nur durch Zusammentreffen der durch übermäßige Biegung oder die beim Nieten stets eintretende Kaltstreckung hervorgerufene Alterungsanlage in Erscheinung getreten. Die Risse treten in einigen Fällen auch da auf, wo durch die scharfe Abnahme der großen Studienprobe über die Zuverlässigkeit des Materials kein Zweifel herrschen konnte. Die später aufgekommene Erklärungstheorie, nach der dem Kesselspeisewasser eine ausschlaggebende Wirkung zukommen soll, findet jedenfalls in den erwähnten dreizehn Beispielen keine besondere Stütze, wenn auch diese Beispiele keinen schlüssigen Beweis dagegen bringen, daß nicht gealtertes Material durch ungeeignetes Kesselspeisewasser erheblich verschlechtert werden kann.

Es gab nun zwei Wege, um die bedenklichen Wirkungen der Alterungserscheinungen zu beheben. Der eine von der Firma Thyssen eingeschlagene Weg bestand darin, daß unter Verzicht auf Nietarbeit überhaupt jede Kaltbearbeitung zu vermeiden und die geschweißten oder nahtlosen Kesseltrommeln nach vorherigem Abpressen auf den mehrfachen Betriebsdruck auszuglühen, so daß sie nachweislich sicher sowie spannungs- und alterungsfrei zur Ablieferung kamen. Das Verfahren hat sich in umfangreicher Weise rasch durchgesetzt.

Der andere Weg wurde durch Herrn Dr. Fry und die Firma Krupp in der Weise eingeschlagen, daß man planmäßig nach einem Kesselbaustoff suchte, der trotz Kaltbearbeitung und nachfolgendem Altern keinerlei Abnahme der Kerbzähigkeit erkennen läßt. Wie uns der Vortrag von Herrn Dr. Fry gezeigt hat, sind die planmäßigen Untersuchungen heute von einem vollen Erfolg gekrönt worden, indem ein weiches Flußeisen vorliegt, das praktisch alterungsfrei ist. Es ist ja bekannt, daß manche Werke infolge der Eigenart ihres Herstellungsverfahrens Kesselbleche und Kesselrohre erzeugt haben, die ebenfalls nur sehr geringe Abnahme der Kerbzähigkeit durch die Alterung aufwiesen. Herrn Dr. Fry gebührt aber das Verdienst, hier offenbar ganz neue Wege zur Herstellung eines derartigen Materials gefunden zu haben. Dem Material kommt vor allem für die Verwendungszwecke eine besondere Bedeutung zu, bei denen sich eine Kaltbearbeitung und nachfolgende Alterung nicht vermeiden läßt. Das gilt z. B. für genietete Kesselteile für schwächere Drücke.

Allerdings glaube ich nicht, daß das neue Material nunmehr einen Ersatz von geschmiedeten und geschweißten Trommeln durch Nietarbeit bringen wird. Wie bereits Oberingenieur Höhn in Zürich zeigt, liegt in jeder Nietverbindung eine Materialunstetigkeit vor, die notwendigerweise zu erheblichen Spannungsansammlungen in der Nietnaht führen muß und die darüber hinaus für die Gesamtelastizität des Trommelkörpers stets nachteilig ist.

Man wird deshalb für hoch- und höchstbeanspruchte Kesselteile lieber von geschmiedeten und geschweißten Trommeln, die in sich ein einheitliches, stetiges Ganze von günstigsten elastischen Eigenschaften bilden, Gebrauch machen. Daß durch das Einwalzen der Röhren praktisch bemerkbare Schädigungen in geschmiedeten oder geschweißten Trommeln nicht

¹⁾ Veröffentlicht: Z. bayr. Rev.-V. Bd. 27, S. 65/9. 1923; vgl. auch Stahleisen Bl. 43, S. 1204. 1923.

auftreten, wurde bereits von Herrn Dr. Guilleaume festgestellt. Dies kann auf Grund längerer Erfahrungen bestätigt werden, die beim Einwalzen von Röhren in ausgeglühte, einheitliche Trommeln auftretenden Kaltbearbeitungen sind so geringfügig, daß sie zu keiner die Sicherheit des Kessels schädigenden Alterswirkung führen können.

Dazu kommt, daß die Kessel erbauende Industrie heute schon die Wege gewiesen hat, um durch elastische Aufhängung des gesamten Kessels und Schutz der Trommeln eine vollständige Sicherung des Materials vor zusätzlichen Spannungsbeanspruchungen zu erreichen.

Ich möchte nicht verfehlen, ausdrücklich darauf hinzuweisen, daß es durch die Zusammenarbeit von Materialerzeugern, Kesselherstellern und Kesselbesitzern in den Tagungen der Vereinigung der Großkesselbesitzer der deutschen Industrie jetzt im Verlauf von knapp drei Jahren gelungen ist, einerseits vollelastische, spannungs- und alterungsfreie Kessel für hohe und höchste Drücke zu schaffen und andererseits ein Material zu finden, das auch dann, wenn es kaltbearbeitet und gealtert wird, praktisch keinerlei Schädigungen bezüglich seiner Kerbzähigkeit aufweist. Mit diesen beiden Lösungen, zwischen denen der Kesselbesteller je nach der Lage des Einfalles zu wählen hat, dürfte die Frage der Nietlochrisse bei Kesselteilen praktisch gelöst sein.

Schlußbemerkung.

Von Dr.-Ing. Fry, Essen.

Die Beachtung der Konstruktion, Ausbildung von Kesseln und die Wahl von Kesselformen hoher Elastizität, wie sie Herr Dr. Daeves vorschlägt, scheint mir sehr wichtig. Allerdings wird man sich auf diesem Weg dem Ideal nur mehr oder weniger nähern. Eine vollständige Vermeidung von Materialspannungen oder auch überelastischen Verformungen in Kesseln wird durch konstruktive Mittel meines Erachtens nicht möglich sein.

Dem Einwalzen von Rohren sollte man doch einige Beachtung schenken. Risse, die von Einwalzstellen ausgehen, sind mehrfach beobachtet worden. Vgl. z. B. Vogt: Protokoll der 32. Delegierten- und Ingenieur-Versammlung des Int. Verbandes der Dampfkesselüberwachungsvereine zu Stockholm 1903, S. 80. Barmen 1903. Ferner: C. Bach: V. d. I. 1913. S. 461. Die Einwirkungen des Einwalzens auf Kessel und Rohre werden z. B. durch die Vorträge von Baumann und Ries auf der vorjährigen Hauptversammlung deutlich (Speisewasserpflege, Baumann, Bericht 7 und 9, Ries, S. 127). Es fällt auf, daß die Ausbildungsform der an Einwalzstellen auftretenden Risse mit der Ausbildungsform der um Einwalzstellen auftretenden Kraftwirkungsfiguren eigenartig übereinstimmt (siehe Abb. 20). Man muß solche Risse demgemäß auf eine Änderung der Werkstoffeigenschaften durch das Einwalzen zurückführen.

Wir müssen uns darüber klar sein, daß auch die nach dem Schmieden oder Schweißen geglühten Kessel dieser Einwirkung ausgesetzt sind, da ja das Einwalzen der Rohre nach der Glühung erfolgen muß. Hier kann also nur ein Kesselbaustoff, der gegen Alterung praktisch unempfindlich ist, Abhilfe schaffen.

Trotz mancher befriedigender Ergebnisse ließen unsere bisherigen Kesselbaustoffe die erwünschte Sicherheit gegen Alterungsschäden vermissen. Es fehlte bislang die Erkenntnis, wie man der bestehenden Unsicherheiten Herr werden könnte. Durch die Zusammenarbeit von Verbrauchern und Herstellern von Kesselbaustoffen war das zu erstrebende Ziel vorgezeichnet.

B. Kessel- und Dampfrohe.

Schäden an Siederohren und deren Ursachen.

Von Prof. Dr.-Ing. e. h. R. Baumann, Stuttgart.

Die erhöhte Einführung des Wasserrohrkessels in den Dampfkesselbetrieb, sowie die Steigerung der Dampfdrücke, Temperaturen und Kesselleistungen, brachte naturgemäß auch ein Anwachsen der Rohrschäden mit sich, solange diesem Konstruktionselement nicht die ihm gebührende Achtung geschenkt wurde.

Hierher gehört in erster Linie die Rohrherstellung und die dabei auftretenden Fehler, sowie die Beachtung der Vorsichtsmaßnahmen zur Vermeidung dieser Fehler, sowohl hinsichtlich der mechanischen Vorgänge und der äußeren Beschaffenheit als auch in bezug auf die

Auswahl des Materials durch chemische Untersuchung und auf seine Behandlung zwecks Herbeiführung eines geeigneten Gefügestandes und zur Erzielung ganz bestimmter Festigkeitseigenschaften.

Für den verantwortlichen Ingenieur des Dampfkesselbetriebes ist es von ausschlaggebender Wichtigkeit, inwieweit er darauf rechnen kann, daß diese Ziele stets erreicht werden. Er muß wissen, welche Fehlermöglichkeiten bestehen und wie die Anwesenheit solcher Fehler sich äußert. Zur Förderung dieser Erkenntnis mögen einige Bilder von Rohr­schäden aufgeführt werden, die in der Materialprüfungsanstalt Stuttgart bei der Untersuchung von aus dem Betriebe stammenden Rohren

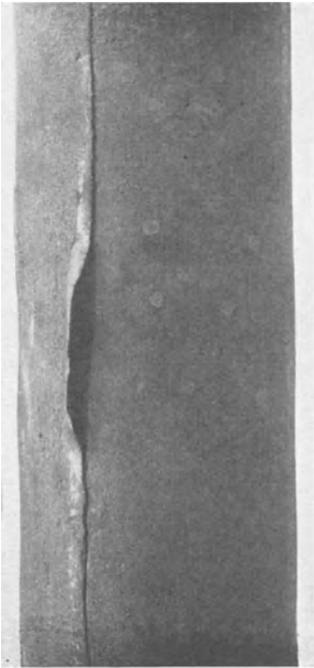


Abb. 1.
Lange Doppelungsstelle (Schale).

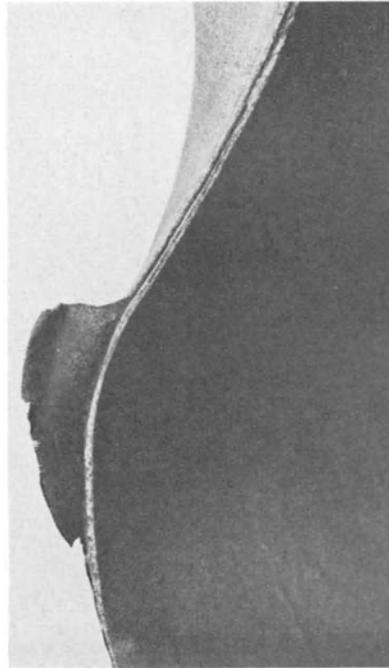


Abb. 2. Aufgerissene Beule; Doppelung im Blech erkennbar (infolgedessen höhere örtliche Erhitzung an dieser Stelle möglich).

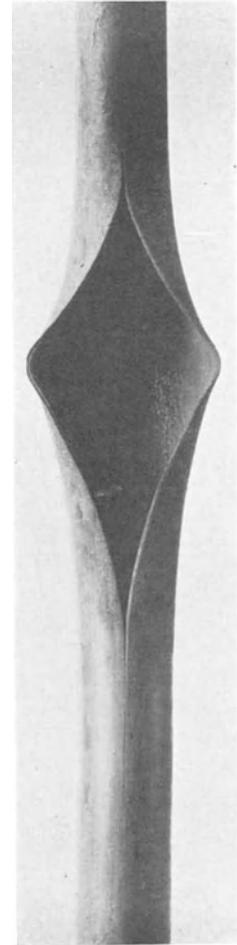


Abb. 3. Rohr an außen gelegener Längsriefe aufgerissen.

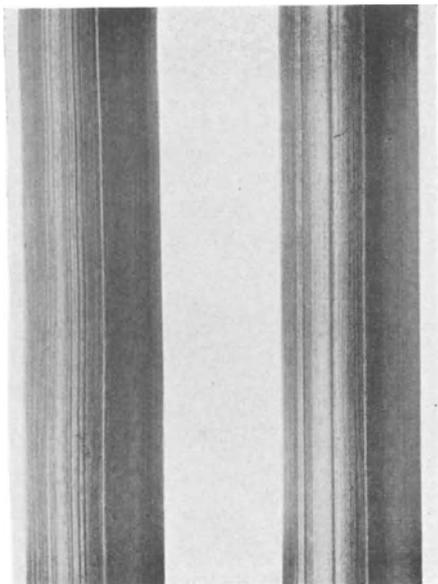


Abb. 4. Rohre mit Längsriefen.

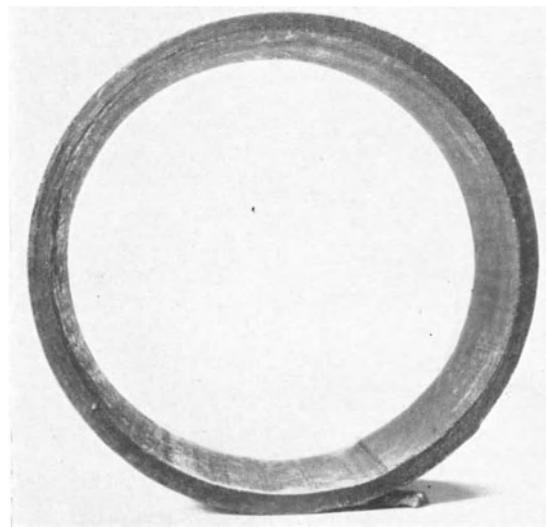


Abb. 5. Riefen an der Rohrinnenseite.

erlangt worden sind. Welche schwerwiegenden Folgen das Versagen eines Rohres unter den heutigen Verhältnissen nach sich ziehen kann, braucht an dieser Stelle nicht erörtert zu werden. Es besteht jedoch Veranlassung, darauf hinzuweisen, daß die gute Beschaffenheit jedes einzelnen Rohres größte Bedeutung gewonnen hat.

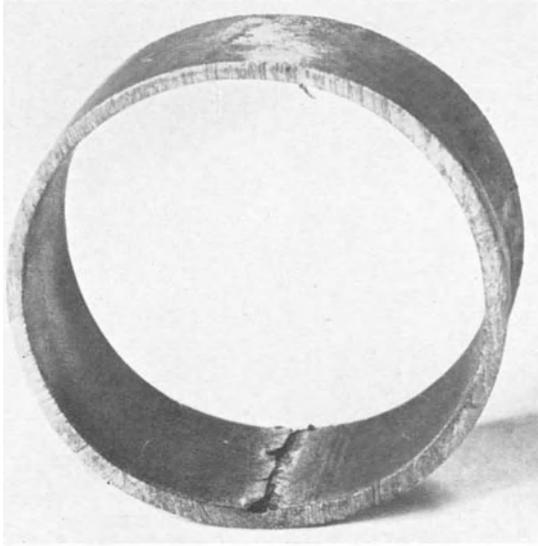


Abb. 6. Schalenbildung an der Rohrinneiseite.

Mit diesen Ausführungen soll jedoch in keiner Weise Vollständigkeit angestrebt werden. Sie haben den Zweck, im engen Rahmen ein bescheidenes Anschauungsmaterial vorzuführen. Die ausgewählten Beispiele betreffen z. B. Doppelungen, die unter den Verhältnissen des Betriebes, verbunden mit Wärmerestauungen, die sie begünstigen, viel stärkeren Einfluß ausüben können, als bei der bloßen Betrachtung der Festigkeitsverhältnisse anzunehmen wäre. Mehrere Beispiele betreffen die so häufig zu beobachtenden Riefen und zeigen, daß dieser Störung der Gleichmäßigkeit der Oberfläche in bezug auf die Widerstandsfähigkeit des Rohres eine recht große Einwirkung zustehen kann. Dazu gesellen sich Walzsplitter und dergleichen, die nach Art und Umfang recht verschieden zu beurteilen sein werden. Auch kommt es sehr darauf an, an welche Stelle sie beim Einwalzen des Rohres zu liegen kommen. Das letzte Beispiel stammt allerdings nicht von einem Siederrohr, sondern zeigt ein Überhitzerrohr, doch

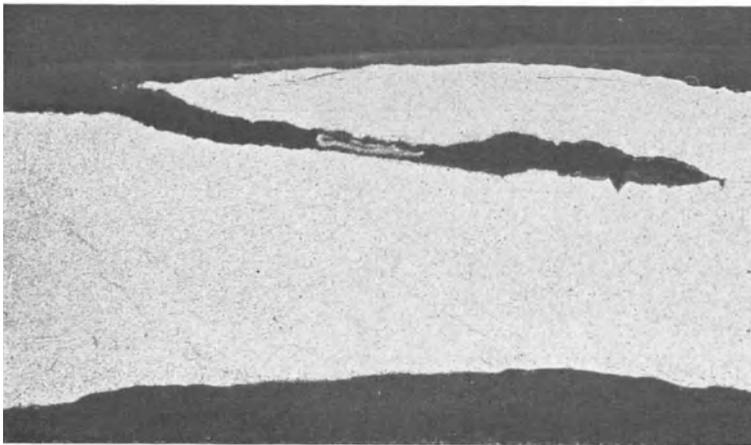


Abb. 7. Querschnitt durch eine Schale.

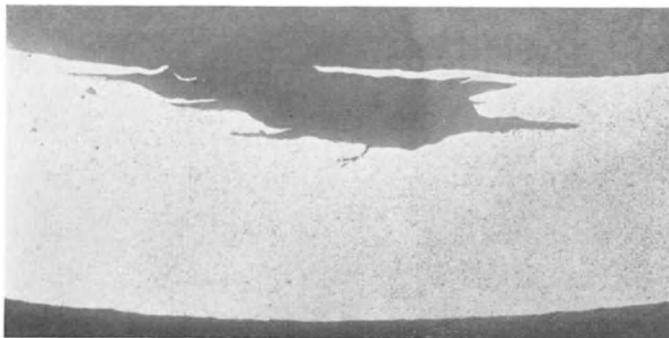


Abb. 8. Querschnitt durch eine langgestreckte „ganze“ Stelle, gefüllt mit nichtmetallischen Einschlüssen.



Abb. 9. Fehlstellen im Rohrinne, nahezu durch die ganze Wanddicke reichend.

könnte der ausgeprägte, für sich selbst sprechende Fehler ebensogut bei einem Siederrohr auftreten, bei dem sich dann in gleicher Weise stärkeres Beschneiden des Rohrblockes empfehlen würde. Im übrigen dürfte es genügen, auf den Text bei den einzelnen Abbildungen zu verweisen.

Berichte über Untersuchung von Rohrschäden.

Auszug aus den „Mitteilungen“ der Vereinigung der Großkesselbesitzer.

Der Vereinigung der Großkesselbesitzer sind aus den Kreisen ihrer Mitglieder eine große Anzahl von Schäden an Kessel- und Dampfrohren gemeldet worden, von denen die interessantesten Fälle an die Materialprüfungsanstalten Stuttgart und Dahlem zur Erforschung der Schadensursachen weitergegeben wurden. Die Bekanntgabe einiger dieser Schäden sowie einiger dieser Untersuchungsergebnisse dürfte von Wert sein und könnte dazu beitragen, durch sorgfältigere Auswahl des Ausgangsmaterials, sorgfältige Behandlung des Materials

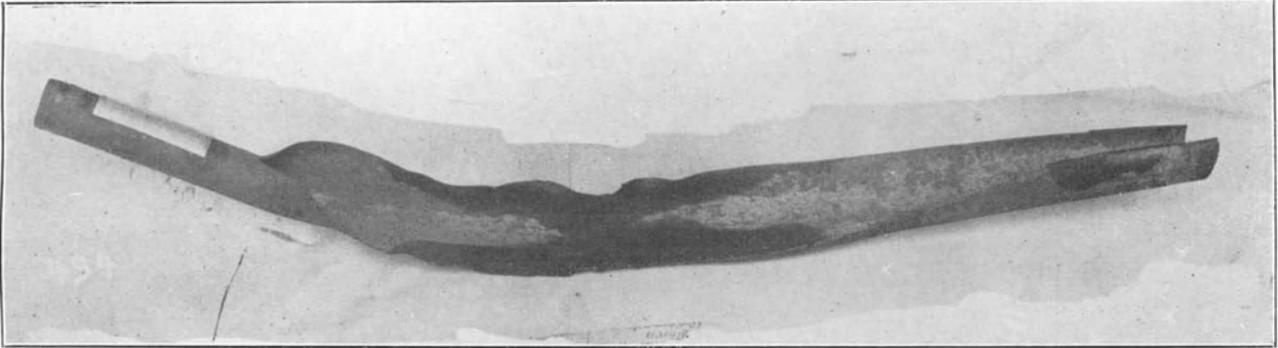


Abb. 1. Geplatzttes Rohr.

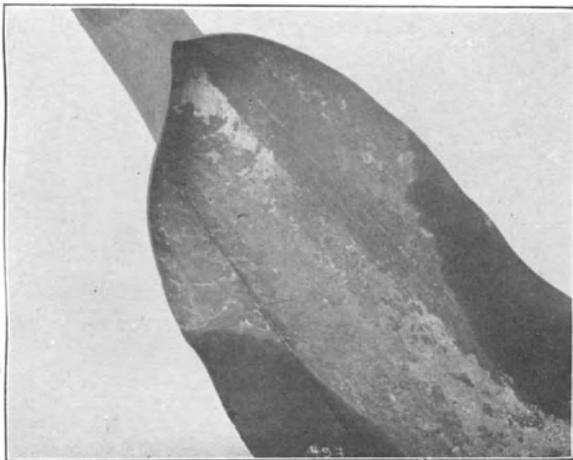


Abb. 2. Teilansicht, vergrößert.

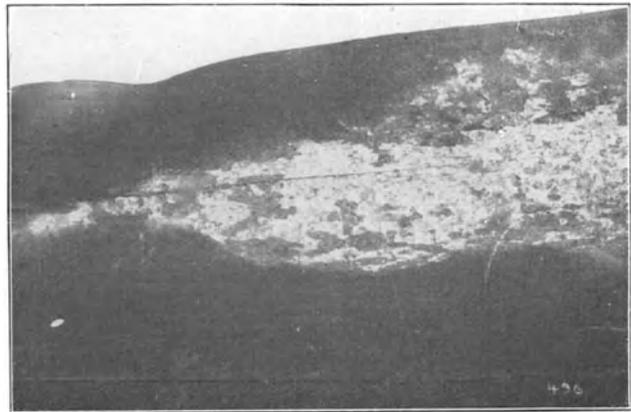


Abb. 3. Teilansicht, weiter vergrößert.

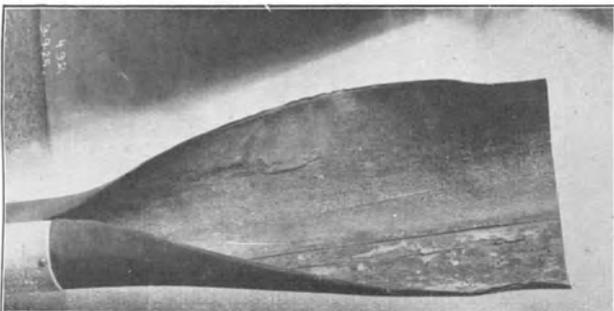


Abb. 4. Geplatzttes Rohr.

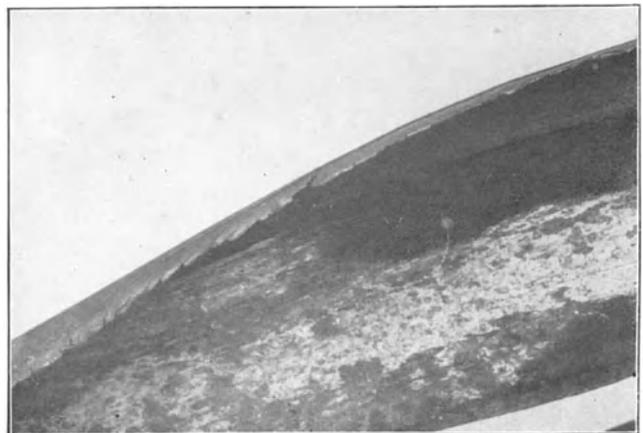


Abb. 5. Geplatzttes Rohr.

beim Auswalzen der Rohre mit darauffolgender Glühbehandlung sowie durch die Weiterverarbeitung der Rohre und ihre Behandlung im Betriebe beachtenswerte Fingerzeige zu

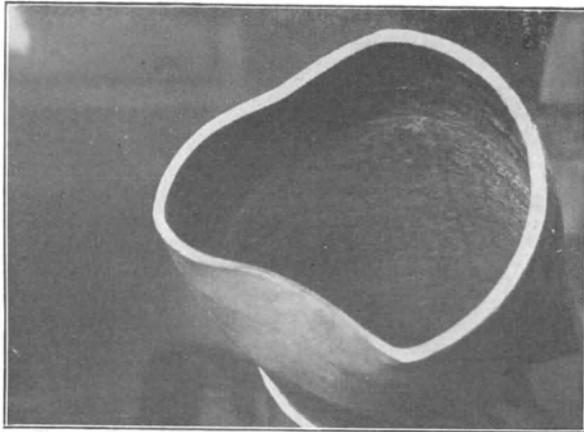


Abb. 6. Rohr mit Roststreifen.

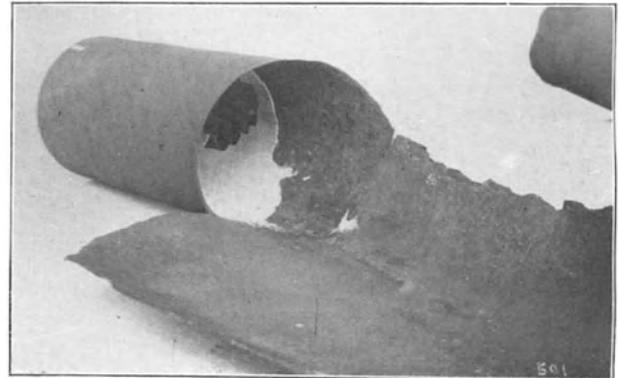


Abb. 7. Mittelstück eines Siederohres.

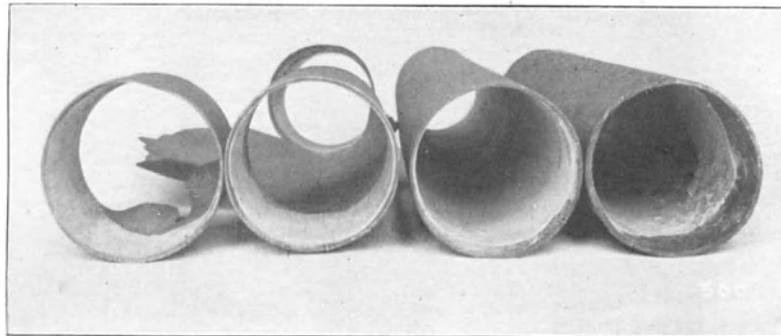


Abb. 8. Einzelstücke eines Siederohres mit verschiedener Wanddicke.

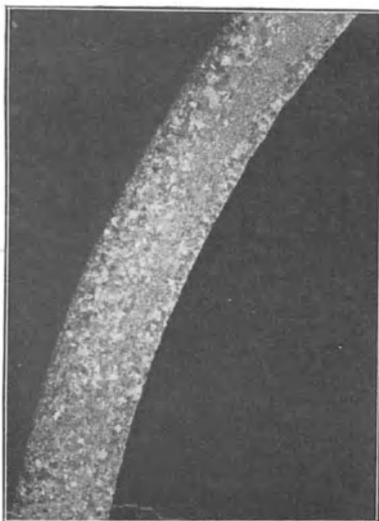


Abb. 9. Verschiedenes Gefüge eines Rohres ($V = 6$).
Teil G der Abb. 10.

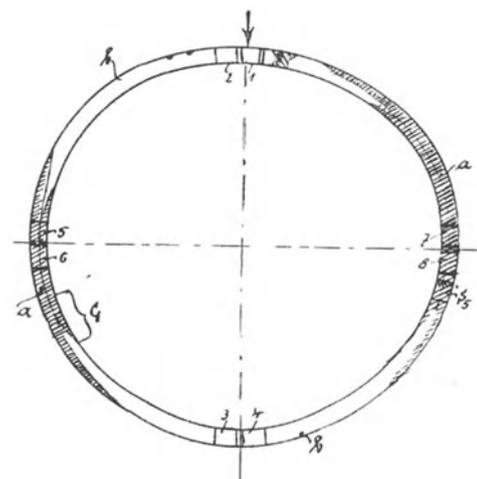


Abb. 10. Ausdehnung des Grobgefüges.

geben. Auch zeigen die nachfolgenden Berichte, daß die Abnahmeprüfungen der Kessel- und Dampfrohre trotz ihrer schon erfolgten Verschärfung noch nicht als vollkommen anzusehen sind und eines weiteren Ausbaues bedürfen.

Von den gemeldeten Kesselschäden sind zunächst zahlreiche Fälle von Ausbeulen und Ausglühen der Rohre in den nachstehenden Bericht nicht mit aufgenommen worden, da deren Ursachen, die Anwesenheit von Kesselstein und Schlamm, allgemein bekannt sind und, soweit andere Ursachen in Frage kommen, zurzeit einem besonderen Studium der zuständigen Stellen unterworfen werden. Dagegen sind einige bemerkenswerte Schäden untersucht worden, die teils auf Verwendung geseigerten

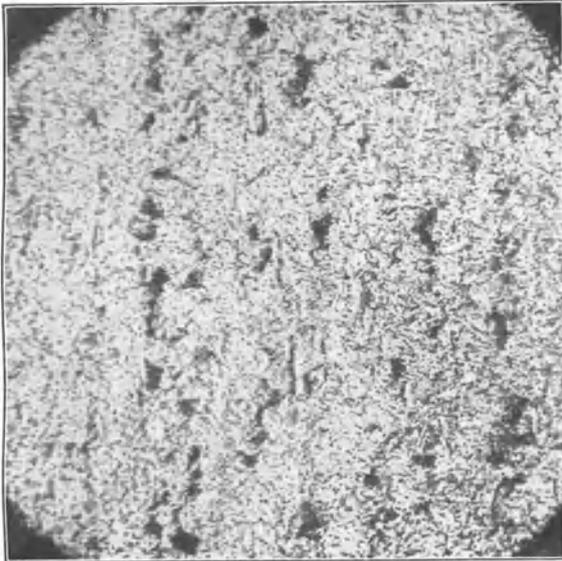


Abb. 11. Gefüge eines Längsschliffes im feinkörnigen Teil. $V = 200$.

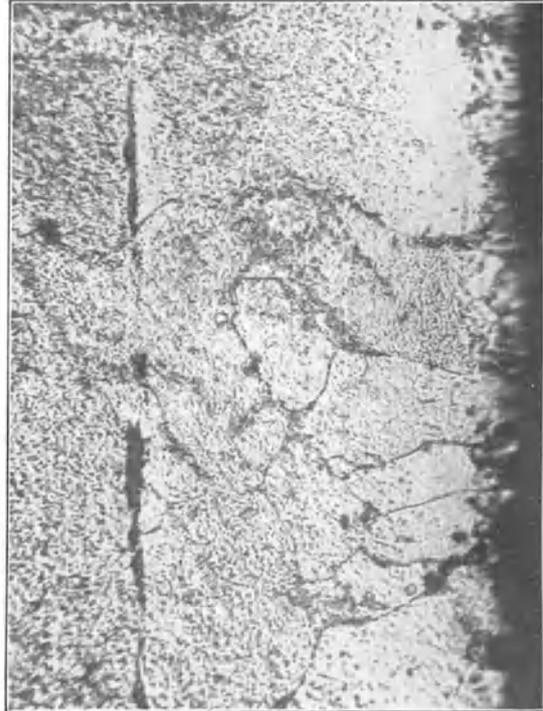


Abb. 12. Grobes Gefüge aus dem Längsschliff S_5 (Abb. 10). $V = 200$.

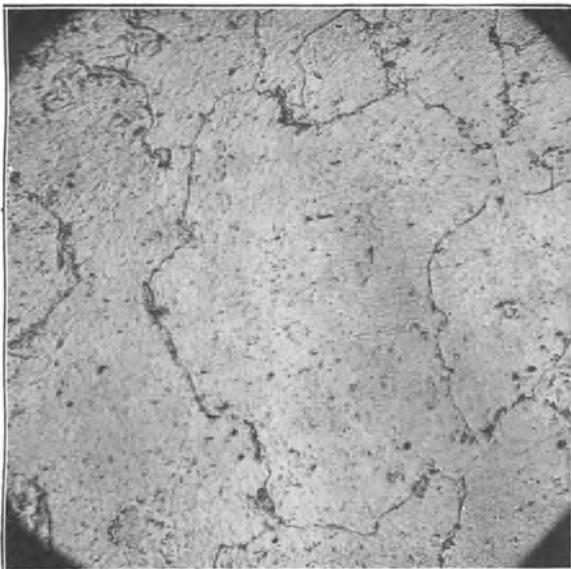


Abb. 13. Grobes Gefüge aus der neutralen Biegezone. $V = 200$.

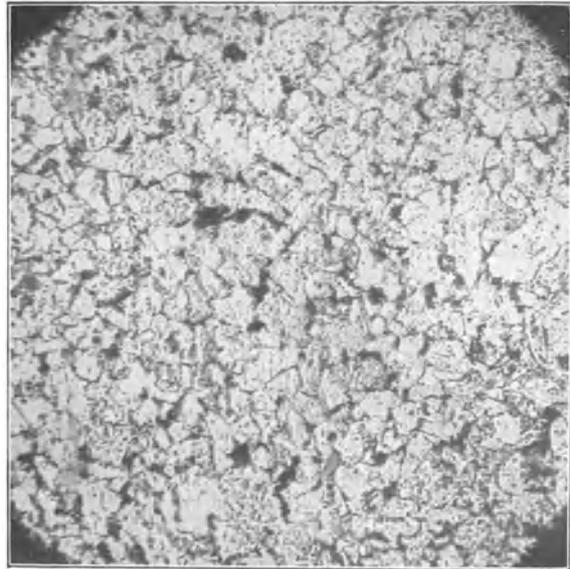


Abb. 14. Feinkristallinisches Gefüge des Schliffes bei b (Abb. 10). $V = 200$.

Ausgangsmaterials, teils auf Unregelmäßigkeiten beim Walzvorgang zurückzuführen sind. Wenn auch ein Teil dieser Schäden in engem Zusammenhang steht mit den Schwierigkeiten, mit denen unsere Industrie während des Krieges und in der Inflationszeit zu kämpfen hatte, so handelt es sich doch auch hierbei um Fehler, die heute noch bei der Herstellung der Rohre nicht immer vermieden werden.

Wir lassen die einzelnen Schäden mit den dazugehörigen Untersuchungsberichten folgen.

1. Die aufgerissene Stelle liegt in der Mitte des Rohres und zeigt grobe Walzfehler (siehe Abb. 1—3). Die beiden Enden des aufgeplatzten Rohres lassen äußerlich keine Fehler erkennen;

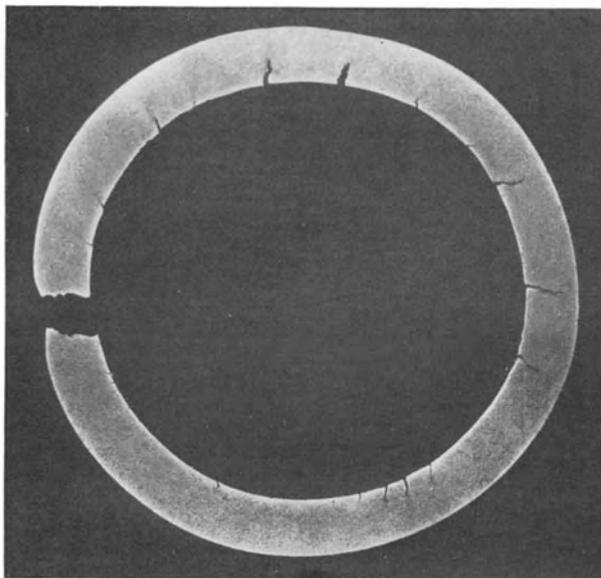


Abb. 15. Gerissene Aufdornprobe.

auch hat das Walzwerk ein Attest eingereicht, wonach das Rohr mit 75 at abgedrückt wurde und die Druckprobe bestanden hat. Ohne Zweifel würde aber ein Abnahmebeamter bei sorgfältiger Besichtigung des Rohres die Walzschiefer im Innern des Rohres gesehen haben. Auch ist anzunehmen, daß das Rohr die neue Aufweitprobe der heutigen Abnahmevorschriften nicht bestanden haben würde. Es muß auch damit gerechnet werden, daß solche Aufblätterungen, wie sie in dem schadhaften Rohr und einem andern Rohr, das aus Abb. 4 und 5 zu ersehen ist, erst nachträglich im Betrieb sichtbar werden. Daraus ergibt sich die Lehre, daß der Betriebsingenieur die Rohre in seinem Kessel von Zeit zu Zeit sorgfältig nachsehen muß.

2. Bei einem anderen Rohr in derselben Anlage, das später aufriß, hatte sich am Ende des Rohres an der Innenfläche ein deutlicher Roststreifen abgezeichnet, der auch in Gestalt eines feinen Risses am abgeschnittenen Ende sichtbar war (Abb. 6).

3. Ein weiterer Schadensfall (siehe Abb. 7 u. 8), bei dem das Rohr auf eine Länge von etwa 500 mm aufriß, ergab, daß die Wandstärke auf eine gleich lange Strecke unvermittelt von 3,5 mm auf 0,5 mm reduziert war. Wenn das Rohr, was man eigentlich annehmen sollte, trotzdem die Wasserdruckprobe im Walzwerk überstanden hat, so ist dieses Vorkommnis ein Beweis dafür, daß die Wasserdruckprobe allein noch keine genügende Sicherheit für die zuverlässige Beschaffenheit eines Kesselrohres bietet. Abb. 8 zeigt die verschiedene Wand-

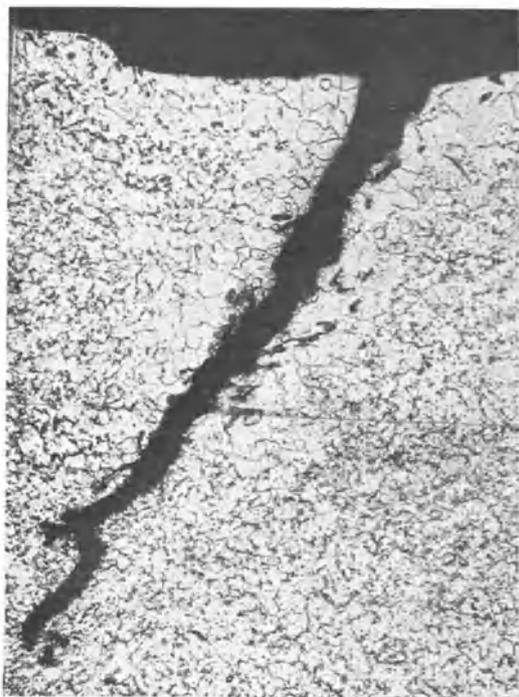


Abb. 16. Gefüge an den unganzen Stellen der Abb. 15.

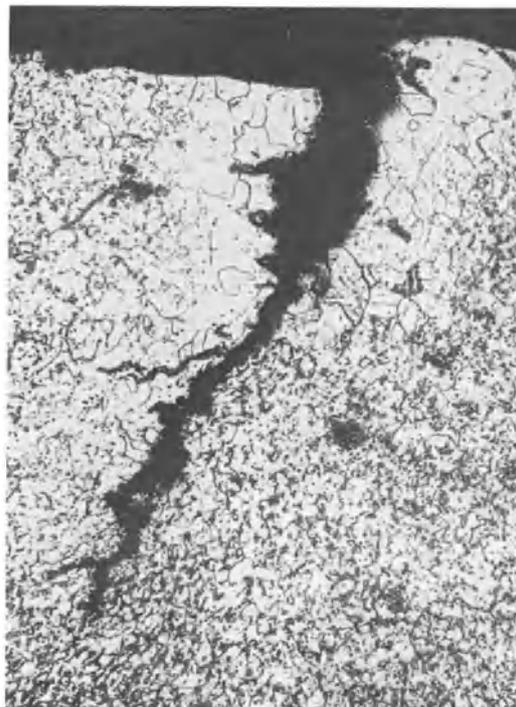


Abb. 17. Gefüge an den unganzen Stellen der Abb. 15.

stärke dieses Rohres. Man darf annehmen, daß dieser Fehler durch Abklopfen des Rohres vom Abnahmebeamten hätte gefunden werden müssen.

4. An einem Verbindungsdampfrohr zwischen den Obertrommeln eines Steilrohrkessels entstand ein Riß bei der Druckprobe des fertig montierten Kessels. Der Kessel ist für 35 at gebaut, das Rohr zweimal kalt gebogen. Eine Untersuchung des Rohres in der Materialprüfungsanstalt Dahlem hat ergeben, daß größere Mengen von nichtmetallischen Einschlüssen in dem Material des Rohres in erheblichem Maße zur Erhöhung seiner Sprödigkeit beigetragen haben. Die Schliffbilder des Rohrquerschnittes (Abb. 9—14) zeigen außerdem starke Unterschiede in der Korngröße (siehe hierzu auch Abb. 10). Das Materialprüfungsamt ist der Ansicht, daß die oxydischen Einschlüsse und das örtlich grobe kristallinische Gefüge das Aufreißen des Rohres begünstigt haben. Ob die Vergrößerung des Kornes eine Folge des Walzvorganges oder des Kaltbiegens des Rohres bei der Montage ist, ließ sich mit Sicherheit nicht feststellen. Auffallend ist, daß die groben Kristalle nicht in der beim Biegen des Rohres gezogenen oder gedrückten Zone, sondern an den neutralen Seitenflächen gefunden wurden.

5. Des öfteren treten an Kesselrohren unganze Stellen auf, wie solche aus den Abb. 15 bis 17 teilweise in starker Vergrößerung zu ersehen sind. Dieselben rühren von Gasblasen oder Lunkerbildungen im verwendeten Rohmaterial her und pflegen bei der Aufornprobe aufzureißen (siehe Abb. 15). Diese Abbildung stellt einen Querschnitt durch ein Rohr dar, an dem zu ersehen ist, wie die unganzen Stellen radial von innen nach außen verlaufend teilweise erhebliche Tiefe erreicht haben. Das Gefüge in der Umgebung solcher unganzen Stellen pflegt das aus Abb. 16 hervorgehende Aussehen zu besitzen. An den Rändern der unganzen Stellen ist der Perlitgehalt (Kohlenstoffgehalt) geringer als im vollen Rohmaterial. Stellenweise zeigen sich Verzweigungen sowie Einlagerungen von nichtmetallischen Stoffen, wie Abb. 17 erkennen läßt.

6. An einem Steilrohrkessel platzte ein Siederrohr, wobei das Bedienungspersonal Schaden erlitt. Das Rohr wurde zur Feststellung der allgemeinen Materialqualität in einem Materialprüfungsamt untersucht. Um die Übersicht über die bei Siederrohren verwendete Materialqualität zu vergrößern, wurden auch die in der Umgebung des aufgerissenen Rohres ausgebauten sechs weiteren Rohre zur Untersuchung eingesandt, und zwar folgende Rohre:

186 A = ohne dort. Bez. = 1 Stck. Rohr Pos. 9 Nr. 29. (Das Rohr ist nach 21839 Betriebsstunden im Betriebe aufgerissen.)

198 A = dort. Bez. = Pos. 8 Nr. 27	} Die Rohre liegen in der Umgebung des aufgerissenen Rohres 186 A und sind entfernt worden, da sie beim Aufreißen von 186 A leicht beschädigt worden sind.
B = „ „ = „ 10 „ 28	
C = „ „ = „ 10 „ 29	
D = „ „ = „ 10 „ 30	
E = „ „ = „ 10 „ 31	
F = „ „ = „ 11 „ 12	

Das aufgerissene Rohr 186 A ließ in der Bruchfläche eine tiefe Materialfalte erkennen, die flach in die Wand hinein lief, sich über die ganze Länge des aufgerissenen Rohres erstreckte und an dem

eingesandten Probestück noch etwa 1 mm gesundes Material übrigließ. Dieser Wandstärke entspricht bei 16 at innerem Überdruck eine Spannung von 6 kg/qmm. Trotz dieser geringen Belastung ist das Rohr, wenn auch nach längerer Zeit, zu Bruch gegangen. Man muß daher annehmen, daß die Falte stellenweise tiefer gegangen ist und weniger gesundes Material übriggelassen hat. Außerdem muß man aus dem Bruch

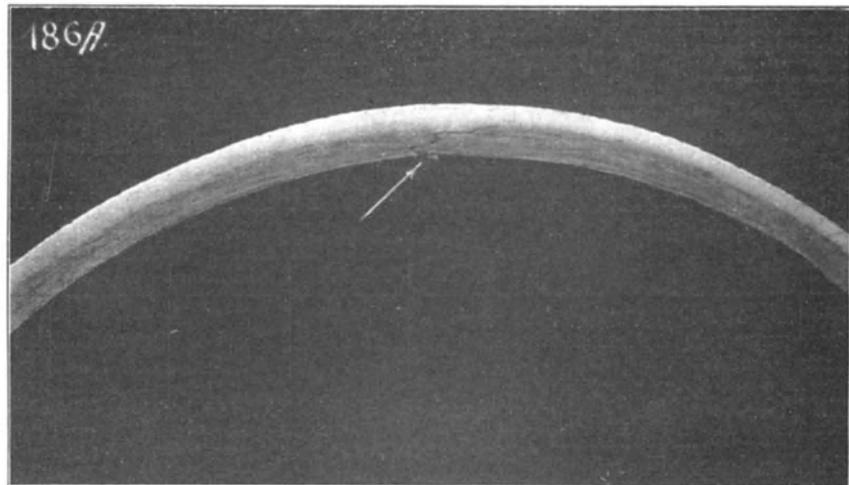


Abb. 18. Querschnitt durch das aufgerissene Rohr 186 A mit Ziehfalte. $V = 2,3$.

schließen, daß die Belastung des Rohres keine ruhende, sondern eine wechselnde war.

Abb. 18 zeigt in geringer Vergrößerung einen Querschliff durch das eingesandte Rohrende,

in dem man die Materialfalte deutlich erkennen kann. Bemerkenswert ist, daß das Rohr ein auffallend stark geseigertes Kernmaterial hat. Abb. 19 zeigt den Schwefelabdruck vom gleichen Querschnitt, aus dem der außergewöhnlich hohe Schwefelgehalt des Kernmaterials folgt. Aus dem Schwefeldruck folgt weiter, daß zur Herstellung dieses Rohres unruhiges Material verwendet worden ist.

Der hohe Schwefelgehalt setzt zweifellos die Deformationsfähigkeit des Materials beim Ziehvorgang merklich herab. Allerdings dürfte hierauf nicht allein die Entstehung der Ziehfalte zurückzuführen sein, sondern es dürfte hinzukommen, daß die Ursache des hohen Schwefelgehaltes darin zu suchen ist, daß das verwendete Materialstück vom oberen Ende des ursprünglichen Blockes stammt und wahrscheinlich eine lunkrige Stelle enthalten hat, die sich dann beim Ziehen des Rohres ausgebreitet und nach innen geöffnet hat.

Die Abb. 20—22 zeigen zwei Rohre aus der Umgebung des aufgerissenen Rohres Nr. 186 A. Das eine Rohr Nr. 198 D besteht aus einem ganz ähnlichen unruhigen Material wie das aufgerissene. Auch hier haben wir den stark schwefelhaltigen Kern mit einer Ziehfalte, die das ganze Kernmaterial durchschneidet. Man muß annehmen, daß dieses Rohr vor dem aufgerissenen nichts Nennenswertes voraus hat und zweifellos auch bald hätte aufreißen können.

Das zweite Rohr Nr. 198 A besteht aus einem etwas beruhigten Material. Ein scharfer Unterschied zwischen Rand und Kern besteht nicht, und der Schwefelgehalt ist normal. Dieses Rohr hat nur eine ganz kleine Ziehfalte, die offenbar ebenfalls auf eine Materialblase zurückzuführen ist, die aber keine wesentliche Bedeutung für die Haltbarkeit des Rohres hat, da sie nur wenig den tragenden Wandquerschnitt vermindert. Man kann annehmen, daß die besseren Materialeigenschaften dazu beigetragen haben, daß eine Vergrößerung der Trennfläche beim Ziehen des Rohres nicht erfolgt ist, ähnlich wie bei den beiden minderwertigen Rohren die Rißbildung am Ende des geseigerten Kernes haltgemacht hat.

Die Abb. 23—26 zeigen die Schwefeldrucke der übrigen Rohre. Die drei ersten, Nr. 198 B, C, E bestehen aus unruhigem Material normaler Qualität. Der Schwefelgehalt ist merklich niedriger als bei den beiden fehlerhaften. Irgendwelche Schäden konnten an den Rohren auch nicht festgestellt werden. Das letzte Rohr Nr. 198 F besteht aus beruhigtem Material einwandfreier Qualität.

Durchgeführte Analysen bestätigen das Ergebnis der Schliiffuntersuchung. Sie sind im folgenden zusammengestellt.

	186 A %	198 A %	198 B %	198 C %	198 D %	198 E %	198 F %
C	0,15	0,17	0,10	0,10	0,11	0,11	0,15
Mn	0,42	0,60	0,43	0,43	0,36	0,43	0,48
Si	frei	0,09	frei	frei	frei	frei	0,05
P	0,12	0,028	0,031	0,024	0,036	0,024	0,023
S	0,089	0,048	0,066	0,059	0,094	0,064	0,045

Die Zahlen zeigen, daß bei den beiden fehlerhaften Rohren Nr. 186 A und 198 D der Schwefelgehalt außergewöhnlich hoch ist, wobei noch zu beachten ist, daß die angegebenen Zahlen Durchschnittszahlen über den ganzen Querschnitt sind, der tatsächliche Schwefelgehalt des Kernmaterials also noch wesentlich höher ist. Das aufgerissene Rohr hat außerdem noch einen außerordentlich hohen P-Gehalt. Die beiden Rohre Nr. 198 A und 198 F enthalten als Beruhigungsmittel etwas Si.

An den eingelieferten Rohren wurde nunmehr zur mechanischen Prüfung eine Ringprobe durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein etwa 18 mm breiter Ring als solcher in die Zerreißmaschine eingespannt und bis zum Bruch belastet. Die erhaltenen Zahlen sind unten zusammengestellt.

	186 A	198 A	198 B	198 C	198 D	198 E	198 F
Belastung t	1,45	3,75	3,52	3,83	1,68	3,45	4,20
Bruchgrenze kg/qmm	14,8	33,1	31,9	29,9	16,7	28,7	37,9
Kontraktion %	0	42,0	32,0	55,3	0	75,9	48,4

Die Tabelle zeigt die sehr geringe Tragfähigkeit der beiden fehlerhaften Rohre, die ungefähr nur halb so groß ist wie bei gesunden Rohren. Außerdem ist naturgemäß die Kontraktion nicht mehr meßbar.

Die Abb. 27 zeigt einige dieser Ringe. Das Aussehen derselben ist so charakteristisch, daß man auch ohne Kraftmessung sofort ein Urteil über die Brauchbarkeit der Rohre fällen kann. Dabei ist natürlich Voraussetzung, daß man solche Ringe nur vom Rohrende entnehmen kann, daß ein eventueller Fehler in der Rohrwand mindestens bis zu einem Ende durchläuft, was erfahrungsgemäß meistens der Fall ist. Auch in diesem Falle würde eine

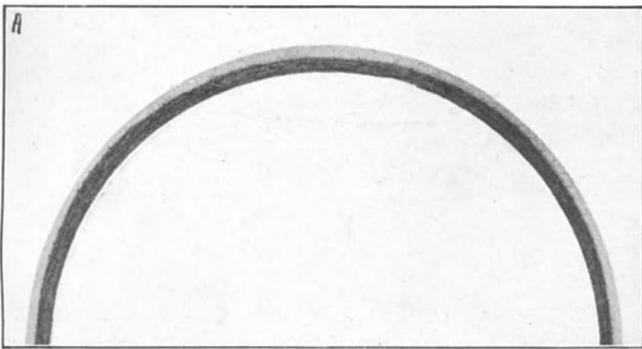


Abb. 19. Rohr 186 A. Schwefeldruck (unruhiges Material).

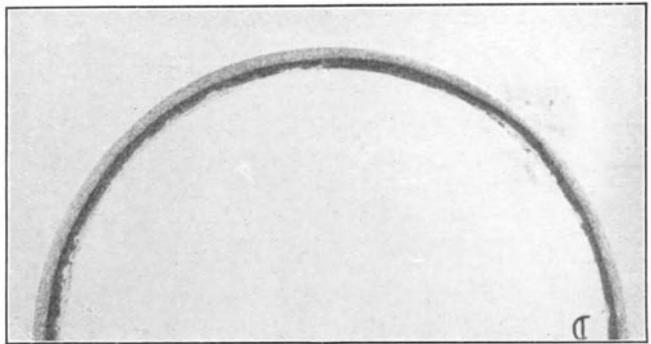


Abb. 20. Rohr 198 D. Schwefeldruck (unruhiges Material).

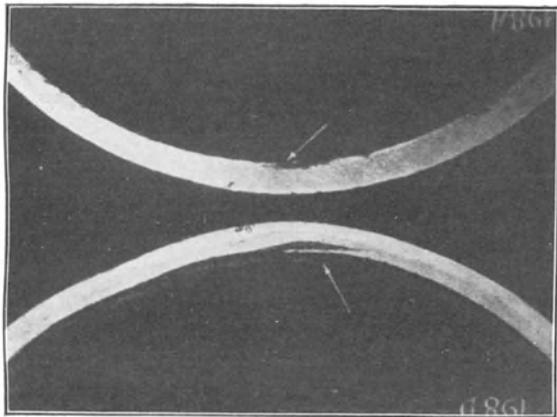


Abb. 21. Ziehfallen. Rohr 198 A.

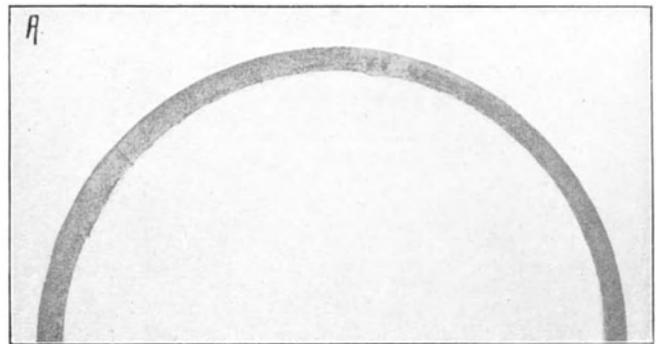


Abb. 22. Rohr 198 A. Schwefeldruck (beruhigtes Material).

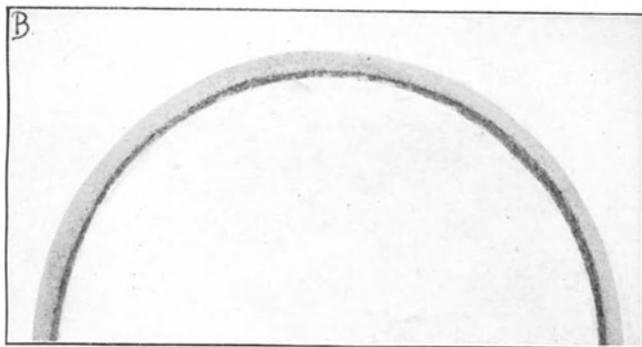


Abb. 23. Rohr 198 B. Schwefeldruck (unruhiges Material).

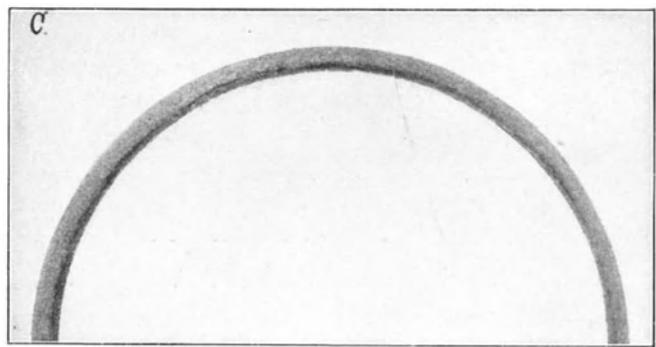


Abb. 24. Rohr 198 C. Schwefeldruck (unruhiges Material).

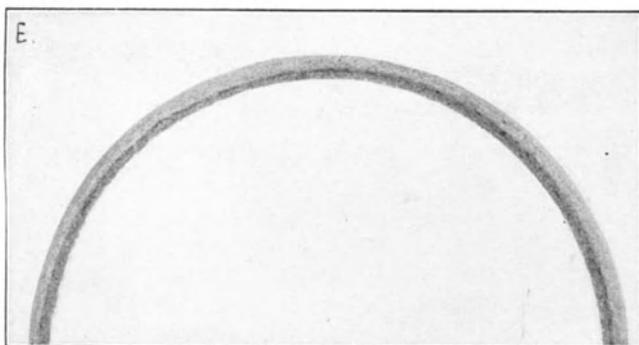


Abb. 25. Rohr 198 E. Schwefeldruck (unruhiges Material).
Sicherheit des Dampfkesselbetriebes.

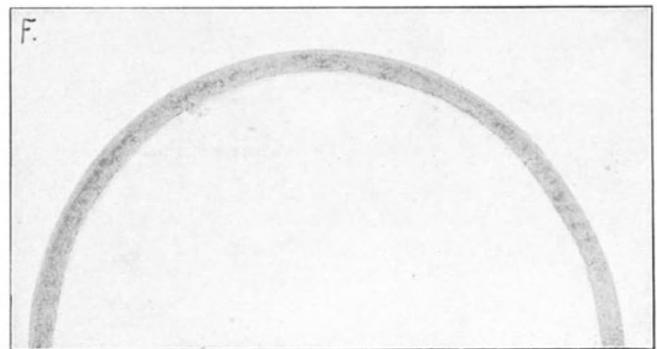


Abb. 26. Rohr 198 F. Schwefeldruck (beruhigtes Material).

an jedem einzelnen Rohr vorgenommene Aufweitprobe die mangelhaften Rohre haben erkennen lassen. So ist z. B. der Ring von Rohr 198 A mit der unbedeutenden Ziefalte gar nicht in dieser gerissen, was die geringe Bedeutung dieser Falte erkennen läßt.

Weiter folgt aus der Untersuchung, daß der P- und S-Gehalt keine unzulässige Höhe erreichen darf, vor allem deswegen, weil dann leicht lunkrige Stellen des Blockes mit verarbeitet werden, was notwendigerweise zu Fehlern im Rohr führen muß. Schließlich dürfte es sich empfehlen, nur beruhigtes Material für die Herstellung von Rohren zu verwenden, um ein möglichst homogenes Material im ganzen Querschnitt des Rohres zu bekommen, was bei der geringen Stärke der Wand besonders wichtig ist.

Zusammenfassung:

Die Untersuchung von einem im Betriebe aufgerissenen Siederohr und sechs weiteren Rohren aus der Umgebung des ersteren hat gezeigt, daß das aufgerissene und ein weiteres Rohr aus vollkommen minderwertigem Material hergestellt worden waren und schwere Fehler aufwiesen. Das zweite Rohr zeigte bei der mechanischen Prüfung keine merklich andere

	<i>Fehlerhaft.</i>		<i>Gut.</i>	
186 A	198 D	198 B	198 E	

Tragfähigkeit als das aufgerissene.

Beide Rohre waren aus unruhigem Material hergestellt und wiesen einen ausgesprochenen geseigerten Kern mit sehr hohem Schwefel- und teilweise auch Phosphorgehalt auf.

Es muß Wert darauf gelegt werden, daß der Gehalt an P und S das zulässige Maß nicht überschreitet. Zum Nachweise genügt nicht die mittlere Chargenanalyse, sondern die Probe mußte vom oberen Ende der ausgewalzten Stange entnommen werden.

Größere Sicherheit gegen eine unzulässige Anreicherung der schädlichen Bestandteile am Kopf des Blockes und für die Homogenität des

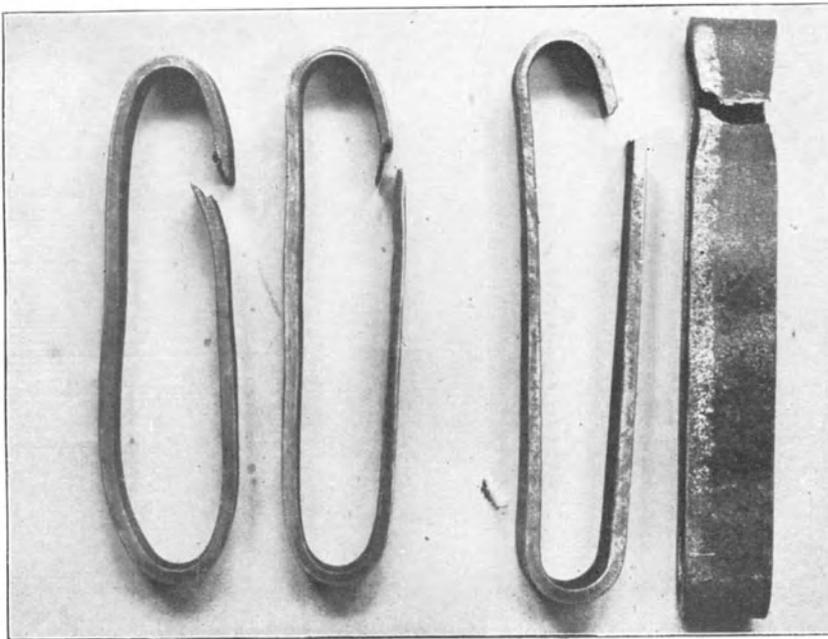


Abb. 27. Ansicht der Ringproben. $V = 0,6$.

Materials im ganzen Querschnitt des Rohres bietet etwas beruhigtes Material, weshalb die Herstellung der Rohre aus solchem zu empfehlen ist.

7. Der Rißschaden an einem Steilrohrkessel vom Jahre 1922 und 20 at Betriebsdruck ist dicht unter der Einwalzstelle in der Obertrommel eingetreten zu einer Zeit, als der Kessel abgestellt war und zwei Mann mit dem Abschlacken beschäftigt waren. Im Augenblick des Öffnens der Zugklappe trat der Riß ein, das Wasser stürzte auf das Feuer, so daß die Flammen herausschlügen und die beiden Heizer durch den aus dem herausströmenden Wasser entwickelten Dampf stark verbrüht wurden. Der Schaden wurde von einer Materialprüfungsanstalt untersucht.

Zur Untersuchung wurden eingesandt ein Abschnitt des gerissenen Rohres und ein Abschnitt eines ungerissenen Rohres, welches aus dem gleichen Kessel stammte und an der Walzstelle keine Risse aufwies.

Äußerer Befund. Die beiden Rohrabschnitte wurden im Amt nach Maßgabe der Abb. 28 und 29 mit den Nummern „1“ und „2“ bezeichnet. Rohr „1“ zeigte an dem schwach aufgedornten Ende auf der äußeren Mantelfläche einen feinen Riß von etwa 2 cm Länge, in Richtung des Rohrumfanges verlaufend. Der Riß durchdringt die Rohrwandung und tritt auf der inneren Rohroberfläche in einer Länge von etwa 2 mm hervor. Rohr „2“ zeigte keine Fehlerstellen. Die äußere Mantelfläche der beiden Rohre war mit einer dünnen Schicht von Ruß und Flugasche überzogen; die innere Mantelfläche zeigte leichten Kesselsteinansatz.

Metallographische Untersuchung. Aus den Rohrabschnitten „1“ und „2“ wurden nach Maßgabe der Abb. 28 und 29 etwa 2 cm breite Ringe S_1 , S_1' (aus Rohr „1“) und S_2 (aus

Rohr „2“) herausgeschnitten, auf den schraffiert gezeichneten Schnittflächen geschliffen, poliert und mit Kupferammoniumchlorid geätzt. Die geätzten Schlitze S_1 und S_2 sind in Abb. 30 in etwa natürlicher Größe wiedergegeben. Schliff S_1' zeigt ähnliches Aussehen wie Schliff S_1 .

Die Rohre sind nahtlos hergestellt. Das Material ist Flußeisen. Die Rohre zeigen deutlich Zonenbildung infolge Phosphor- und Schwefelseigerung; die Zonenbildung tritt bei Schliff S_1 (Rohr „1“) stärker hervor als bei Schliff S_2 (Rohr „2“). Dies ist, wie die chemische Prüfung ergab, auf den höheren Phosphorgehalt des Rohres „1“ zurückzuführen. Die Entnahme der Analysenspäne erfolgte nach Maßgabe der Abb. 28 und 29 bei A_1 bzw. A_2 durch Hobeln über den ganzen Querschnitt. Die Analyse der Durchschnittprobe ergab für Rohr „1“: 0,072% und für Rohr „2“ 0,041% Phosphor.

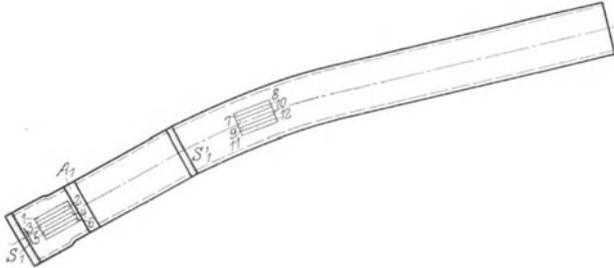


Abb. 28. Rohr „1“.

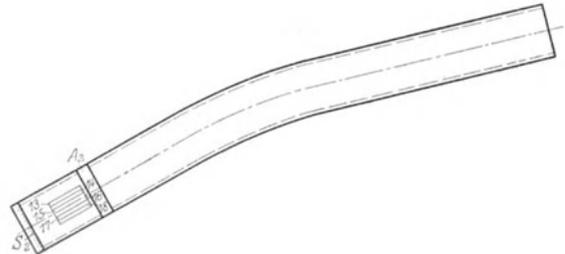
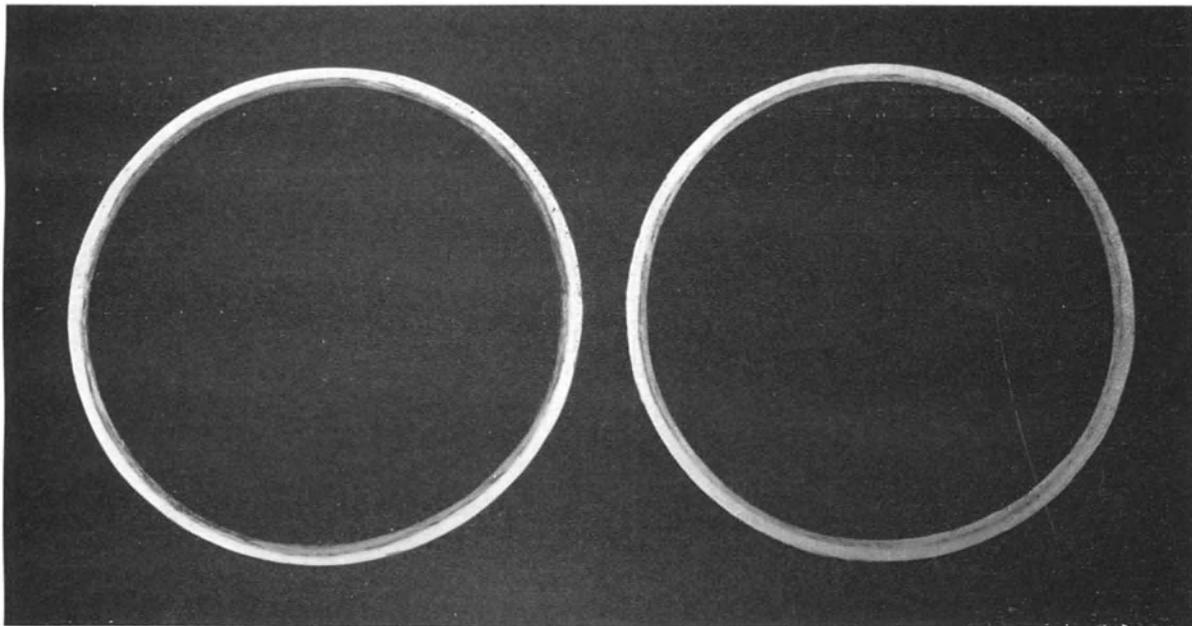


Abb. 29. Rohr „2“.



Schliff S_1 (Rohr „1“).

Abb. 30.

Schliff S_2 (Rohr „2“).

Der durchschnittliche Phosphorgehalt des Rohres „1“ erscheint reichlich hoch, da erfahrungsgemäß die Seigerungszone noch eine wesentlich phosphor- und schwefelreichere Zusammensetzung aufweist. Die Verschiebung der geseigerten Zone nach der Rohrrinnenwandung rührt vom Herstellungsverfahren der Rohre her.

Für die Untersuchung des Kleingefüges wurden Teilabschnitte der Schlitze S_1 und S_2 in der Längs- und Querrichtung des Rohres geschliffen, poliert und in alkoholischer Salpetersäure geätzt. Das Korn beider Rohre ist gleichmäßig feinkristallinisch, wie aus Abb. 31 hervorgeht. Das Gefüge besteht aus zeilenförmig angeordnetem Perlit (dunkel gefärbt) und Ferrit (hell); vereinzelt traten nichtmetallische Einschlüsse auf (vgl. Abb. 32 bei „s“). Der Kohlenstoffgehalt im Kern (siehe Abb. 32) beträgt etwa 0,15—0,2%; nach den Mantelflächen zu nimmt er ab. Kennzeichen von zu starker Kaltbearbeitung (Streckung der Kristallkörner) sind nicht vorhanden.

Die Abb. 33 und 34 veranschaulichen im Querschnitt den Verlauf und das Aussehen des Risses. Anscheinend ist der Riß von der Außenmantelfläche ausgegangen; er durchdringt die Rohrwandung, sich ständig verengernd.

Gutachtliche Äußerung. Die vergleichende Untersuchung der beiden Rohrabchnitte hat ergeben, daß Gefüge- oder Verarbeitungsfehler nicht vorliegen. Die Rißbildung an dem mit Kreuzkerben bezeichneten Abschnitt dürfte durch den hohen Phosphorgehalt des Materials

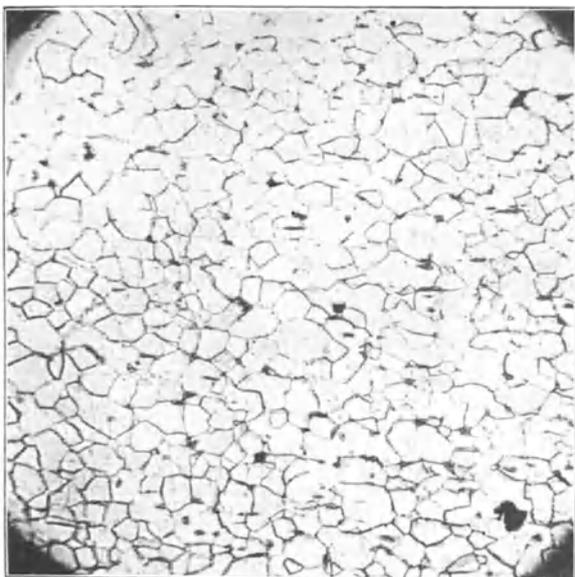


Abb. 31. Feinkristallinisches Gefüge des Rohres „1“, unmittelbar am Riß. $V = 200$.

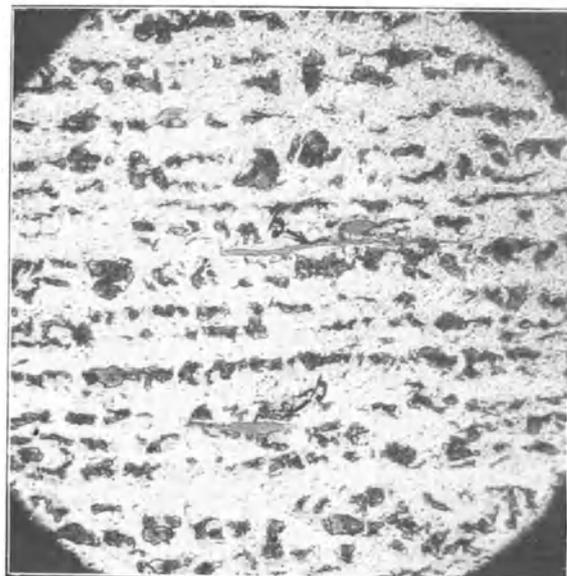


Abb. 32. Gefüge in Materialmitte. Bei *s, s* nicht-metallische Einschlüsse. $V = 200$.

(0,072 gegenüber nur 0,041% beim bezeichneten Rohrabchnitt) in hohem Maße begünstigt worden sein. Der Phosphorgehalt hochbeanspruchter Kesselmaterialien sollte tunlichst niedrig sein, da Dehnung und Kerbzähigkeit des Materials mit zunehmendem Phosphorgehalt schnell abnehmen und die Neigung zur Bildung von Rissen bei Kaltbearbeitung, z. B. beim Einwalzen, stark zunimmt.

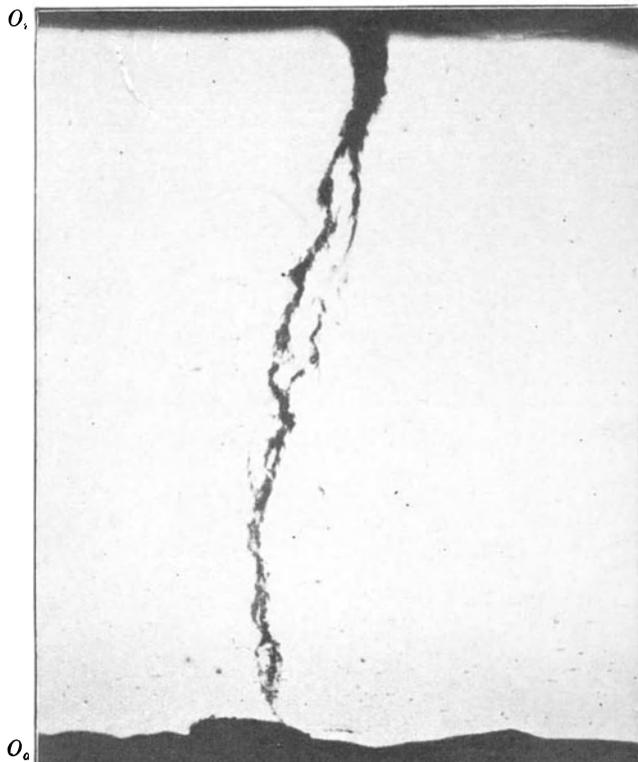


Abb. 33. Riß durch die Rohrwand. $V = 25$.

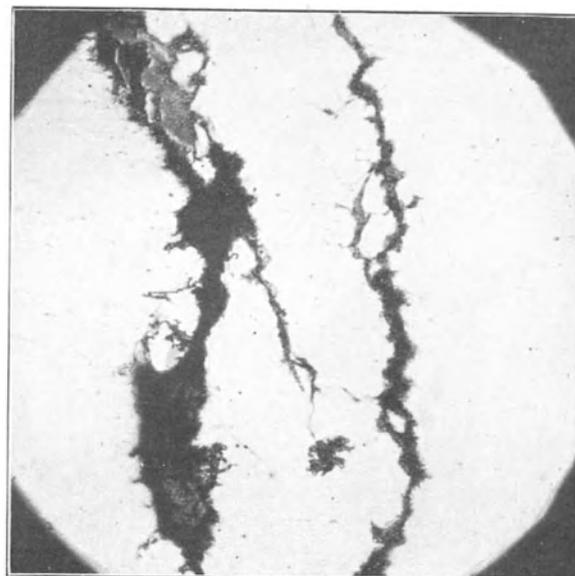


Abb. 34. Vergrößerte Aufnahme des Risses. $V = 200$.

8. Ein Wasserrohr aus der unteren Reihe des Rohrbündels eines Wasserkammer-Schrägrohrkessels wies starke Abnutzung auf. Es wurde amtlich untersucht:

Zweck der Untersuchung: Durch die Untersuchung sollte festgestellt werden, ob sich das Gefüge des Rohres im Laufe der Zeit geändert hat und ob in den Poren der rauhen Oberfläche irgendwelche Anzeichen für die Ursachen der starken Abnutzung zu finden sind.

Nach Mitteilung der Vereinigung der Großkesselbesitzer stammt das zu untersuchende Rohr aus der unteren Reihe eines Rohrbündels eines Kammerkessels, der mit den Feuer gasen von Rohbraunkohle geheizt wird. Nach etwa 8—10 Jahren werden die Rohre auf der der Feuerung zugekehrten Seite so dünn, daß sie ausgewechselt werden müssen.

Durchführung der Untersuchung: Zur Durchführung der Untersuchung wurde das 5 m lange Rohr in 10 gleiche Teile zerlegt, die fortlaufend mit den Buchstaben *A, B* usw. bezeichnet wurden.

Es wurden dann folgende Prüfungen durchgeführt:

- a) Äußere Untersuchung,
- b) Untersuchung auf Seigerung,
- c) Mikroskopische Untersuchungen,
- d) Kerbbiegeproben nach Heyn und
- e) chemische Untersuchung von Schlackenproben.

Ergebnis der Untersuchung:

a) Äußere Untersuchung: Auf der Feuerseite war das Rohr mit einer starken Rostschicht bedeckt. Nach Beseitigung des Rostes ergaben sich an den Wandungen keinerlei Anzeichen, die auf eine Schwächung der Wandung hindeuten. Die Außenhaut des Rohres hatte vielmehr ein durchaus gleichmäßiges Aussehen; sie fühlte sich ohne Aufrauhungen und ohne irgendwelche nennenswerten Unebenheiten glatt an.

Auf der Wasserseite des Rohres haftete an der Wandung eine dünne Schlamm schicht, die sich auf der der Feuerseite zugekehrten Wandung leicht vollständig entfernen ließ, während an dem entgegengesetzten Teil der Rohrwandung nach der Entfernung der dünnen Schlamm schicht noch ein sehr dünner Kesselsteinbelag haften blieb.

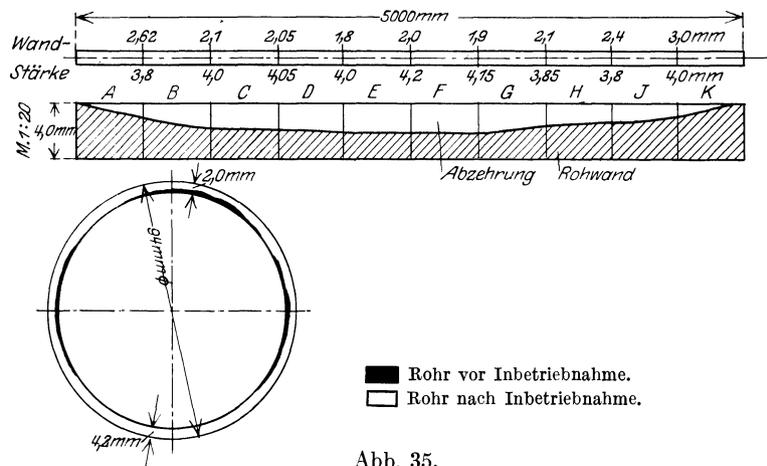


Abb. 35.

Die Wandstärken des Rohres wurden an den aus Abb. 35 ersichtlichen Schnittstellen nachgeprüft; die gefundenen Zahlenwerte sind dort angegeben. Danach sind in den Wandstärken außergewöhnliche Unterschiede festzustellen gewesen.

Die schwächste Stelle fand man an dem Stoß der beiden Teile *F* und *G* zu 2,25 mm. Diese Schwächung der Wandung erstreckte sich auf eine Rohrlänge von rund 3 m auf der dem Feuer zugekehrten Seite sehr gleichmäßig. Die Wandstärken schwanken auf dieser Strecke zwischen 1,75 und 2,25 mm (siehe die bezeichnete Stelle der Abb. 35).

Der Verlauf der Schwächung in der Längsrichtung des Rohres und im Rohrumfang am Stoß der Teile *E* und *F* ist aus den in Abb. 35 dargestellten Bildern zu ersehen.

Beim Schleifen eines Rohrquerschnittes, der aus dem Stück *F* entnommen war, zeigte sich über die Hälfte des Rohrumfanges eine Blechdoppelung, die sich durch die ganze Rohrlänge hinzieht.

b) Schwefelabdruck nach Baumann: Aus dem Schwefelabdruck (Abb. 36) ist zu erkennen, daß das Rohr überlappt feuergeschweißt ist. Die Schweißfuge liegt in Richtung der in Abb. 36 eingezeichneten Pfeile. Ihr gegenüber liegt die Blechdoppelung, die sich als Seigerungszone mit starken Schlackeneinschlüssen erwies.

An der schwächsten Stelle ist das Eisen auf der Feuerseite fast bis an die Seigerungszone abgezehrt, so daß diese dort bis fast an den äußeren Rand des Rohres gerückt ist, während auf der Wasserseite an dieser Stelle zwischen Seigerungszone und innerer Rohrwand sich noch die ursprüngliche Eisenschicht befindet.

Hieraus folgt, daß die Abzehrung des Rohres nur von der Feuerseite aus erfolgte.

c) Mikroskopische Untersuchung: Für diese Untersuchung wurde je eine Querschnittprobe aus dem Rohrstück *A* nahe der Einwalzstelle und aus dem Rohrstück *H*

entnommen. Aus dem Rohrstück *E* wurden Längs- und Querschnittproben herausgeschnitten.

Das Kleingefüge des Baustoffes weist am Rohrende in der Nähe der Einwalzstelle gewöhnlich ausgebildetes Korn auf, wie aus Abb. 37 zu ersehen ist.

Die geätzten Schliffe der aus dem Rohrstück *E* entnommenen Proben zeigen schon bei schwacher Vergrößerung überhitztes Gefüge (Abb. 38 und 39). Aus Abb. 38 ist deutlich zu ersehen, wie durch die Abzehrung auf der Feuerseite die Seigerungszone mehr gegen den Außenrand gerückt ist, während bei Abb. 39, die von einer Stelle herrührt, an der keine Abzehrung stattgefunden hat, die Seigerungszone in der Mitte der Rohrwandung verläuft.

In der Seigerungszone waren die Schlacken fast durchweg in starken Bändern angehäuft, so daß sich dort eine Blechdoppelung bildete (Abb. 40 und 41).

Die der Rohrschwächung gegenüber liegende Schweißstelle ist in Abb. 42 am Außenrand und in Abb. 43 am Innenrand des Rohres dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Schweißung einwandfrei ausgeführt und daß die Schweißstelle nur vom Außenrand herein mit geringen, belanglosen Schlacken durchsetzt ist.

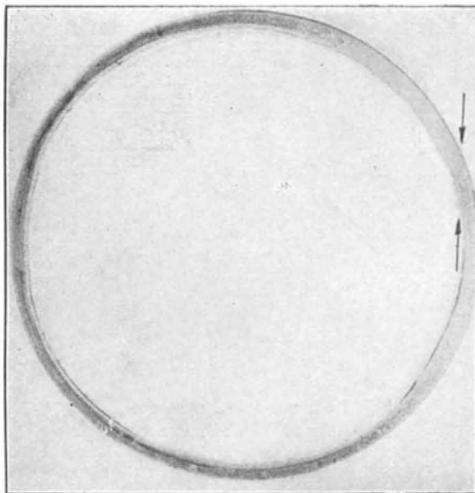


Abb. 36. Schwefeldruck.

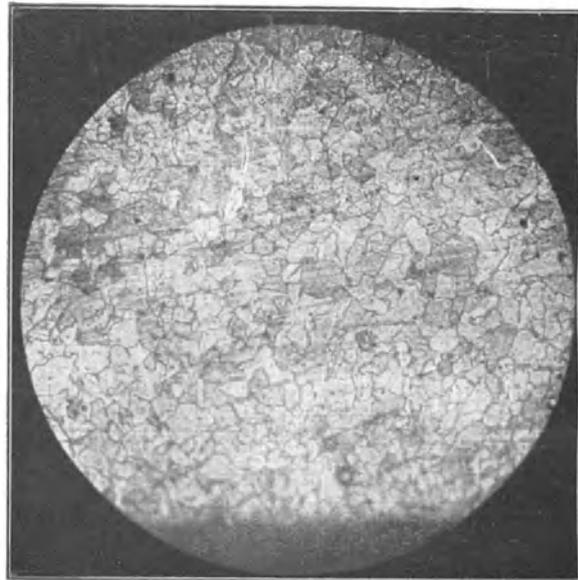


Abb. 37. $V = 95$.

0,1 mm

Bei der für die Abb. 41 und 43 gewählten stärkeren Vergrößerung ist das kohlenstoffarme Überhitzungsgefüge besonders gut zu erkennen.

Dieses Überhitzungsgefüge ist, abgesehen von dem Ende des Stückes *A*, über die ganze Rohrlänge und über den Rohrquerschnitt verteilt.

Wie die Abb. 44 bis 47 zeigen, findet sich das Überhitzungsgefüge sowohl in dem der Feuerung zugekehrten als auch in dem entgegengesetzten Teil des Rohres. Aus diesen Abb. ist auch noch zu ersehen, daß die Wasserseite des Rohres vollkommen glatt ist, während auf der Feuerseite durch Abzehrung sehr geringe Unebenheiten entstanden sind (Abb. 45 und 47). Weiter lassen diese Bilder noch erkennen, daß der Baustoff wenig Kohlenstoff enthält, dagegen aber ziemlich starke Schlackeneinschlüsse besitzt.

d) Kerbbiegeproben nach Heyn: Aus dem Rohrstück *A* wurden an einer Stelle, die keine Blechdoppelung besitzt, zwei Kerbbiegeproben mit den Abmessungen 4 mal 6 mal 60 mm angefertigt:

Die Biegezahlen schwankten zwischen $3\frac{3}{4}$ und $4\frac{1}{2}$ und entsprechen einem vollwertigen Baustoff.

e) Chemische Untersuchung der Schlacke: Die zur Untersuchung übergebene Schlacke, die angeblich sich an den Rohren ansetzt, ist schmutziggrau, mit einem Stich ins Rötliche. Sie ist verhältnismäßig leicht zerreiblich. Mit Wasser kann daraus Gips und schwefelsaures Eisenoxydul gelöst werden. Der wasserunlösliche Rückstand ist in heißer, starker Salzsäure unter Entwicklung von etwas Schwefelwasserstoffgas und Abscheidung von Kieselsäure sowie durch Salzsäure nicht zersetzbaren Silikaten zum größten Teil löslich. In der salzsauren Lösung befindet sich Eisen und Tonerde, Kalk, Magnesia und Schwefelsäure.

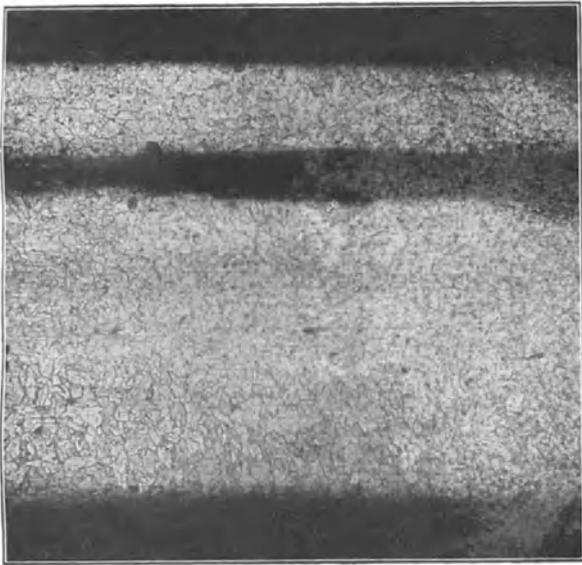


Abb. 38.

V = 25.

1 mm

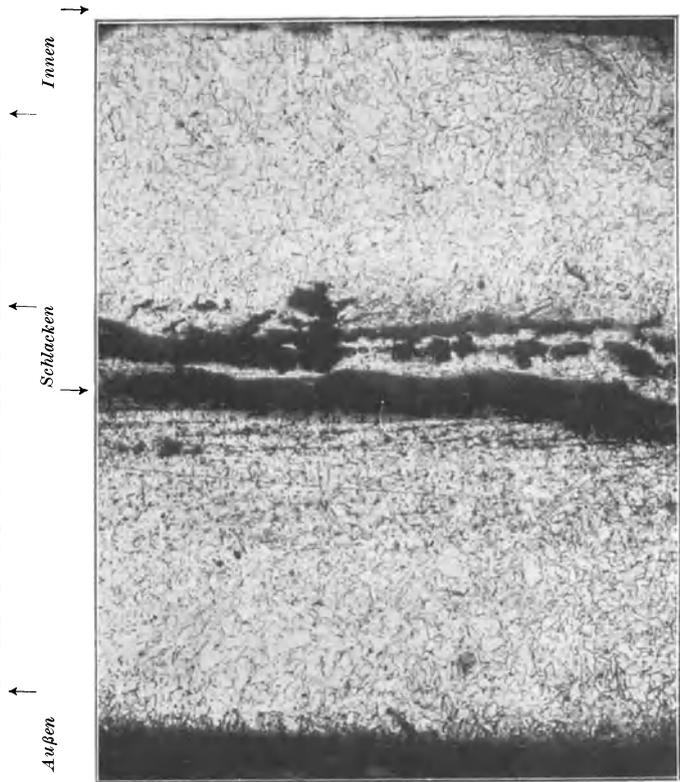


Abb. 39.

V = 25.

1 mm

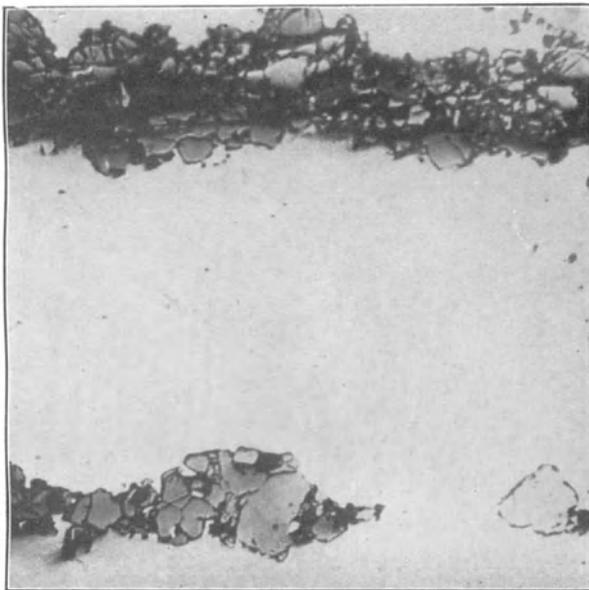


Abb. 40. Schlackenbänder.

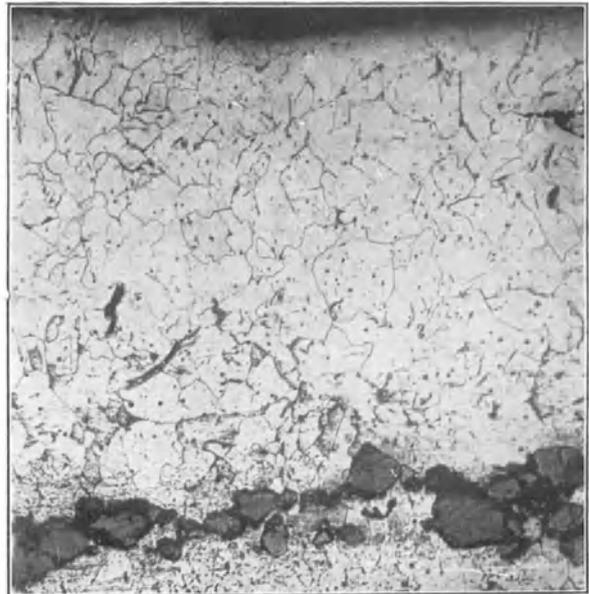


Abb. 41. Schlackenbänder.

Der Menge nach wurde folgendes ermittelt:

In Salzsäure unlöslich	5,46%
Eisenoxyd	68,17%
Eisenoxydul	1,25%
Tonerde	4,32%
Kalk	7,96%
Magnesia	0,98%
Schwefelsäure	11,70%
Sulfidschwefel	0,08%

Demnach besteht die Schlacke im wesentlichen aus Eisenoxyd und Gips mit geringeren Beimengungen von Tonerden, Kalk und Magnesiumsilikaten (kieselsauren Salzen), sowie schwefelsaurem Eisen und Schwefeleisen.

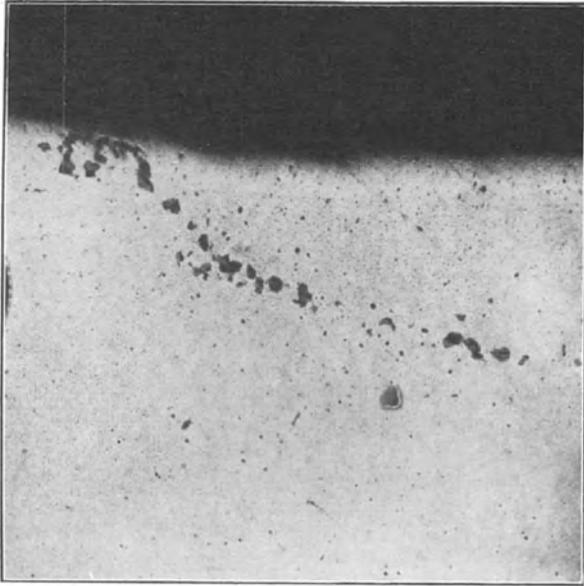


Abb. 42. Ungeätzt. Geringfügige Schlackeneinschlüsse am Außenrand der Schweißstelle.

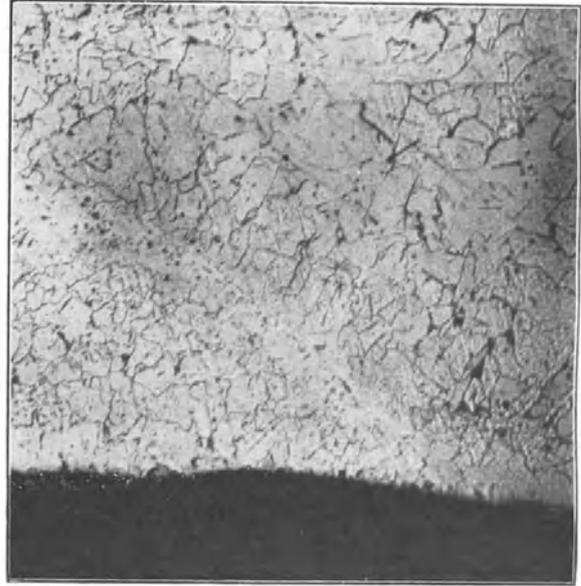
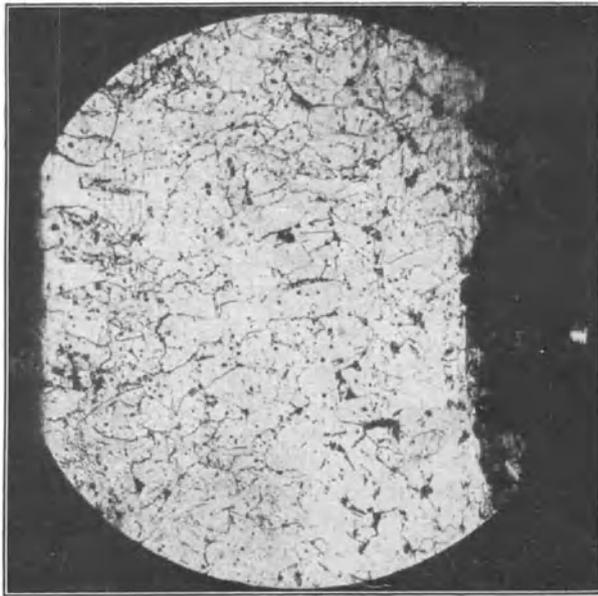


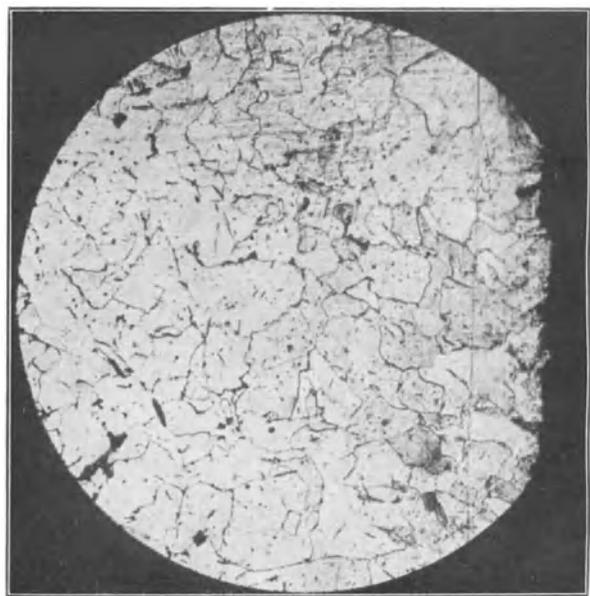
Abb. 43. HNO₃-Ätzung. Schweißstelle am Innenrand.



innen

0,1 mm

Abb. 44. Überhitzungsgefüge. V = 95.



außen

0,1 mm

Abb. 45. Überhitzungsgefüge. V = 95.

Es ist nicht anzunehmen, daß die Brennstoffasche die beiden zuletzt genannten Verbindungen schon von vornherein enthält. Sie sind entweder durch Einwirkung der die Verbrennungsprodukte des Brennstoffschwefels enthaltenden Rauchgase auf die Rohrwandung entstanden oder sie sind auf Eisenoxyd zurückzuführen, das in der Brennstoffasche vorhanden ist.

Gutachten.

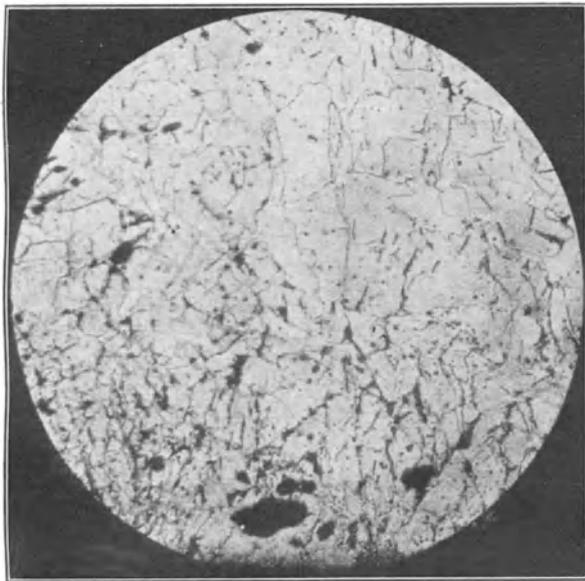
Durch die Untersuchung wurde festgestellt, daß das eingesandte Rohr feurgeschweißt¹⁾ ist und auf etwa den halben Rohrumfang Blechdoppelungen besitzt, die sich auf die ganze Rohrlänge erstrecken.

Der Baustoff ist auf den größten Teil der Länge des Rohres überhitzt. Nur an dem einen Ende besitzt das Gefüge das übliche Aussehen. Die Überhitzung des Baustoffes ist aber nicht im Betrieb erfolgt, sondern bereits bei der Herstellung des Rohres eingetreten.

Weder das Aussehen des Rohres noch die chemische Untersuchung der nachträglich eingesandten Schlackenprobe ergaben irgendwelche Anhaltspunkte dafür, daß die Rohrwandungen im Laufe der Betriebszeit eine Schwächung erlitten haben.

Es hat daher zunächst den Anschein, daß die ungleichmäßigen Wandstärken schon von der Rohrherstellung herrühren.

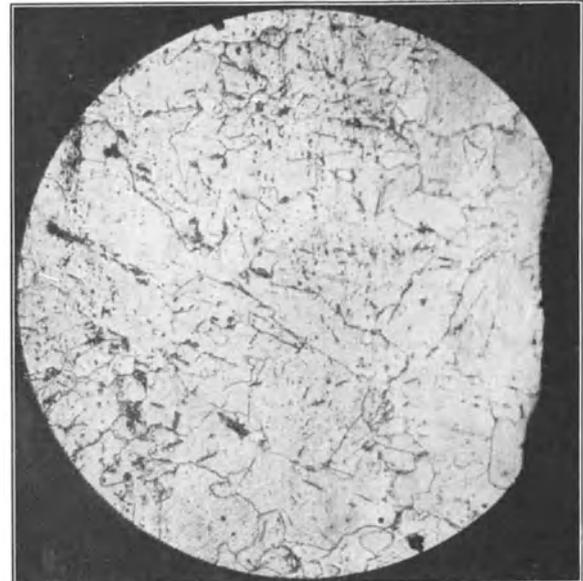
Erst die makroskopischen und mikroskopischen Untersuchungen der Rohrquerschnitte beweisen, daß die Verschiedenheiten in den Wandstärken nicht nur auf die Herstellung des



innen

Abb. 46. Überhitzungsgefüge.

0,1 mm



außen

Abb. 47. Überhitzungsgefüge.

Rohres, sondern auch auf eine von der Feuerseite ausgehende Abnützung im Laufe der Betriebszeit zurückzuführen sind.

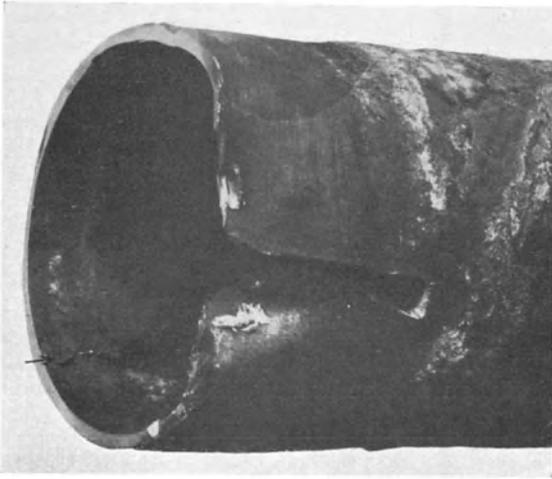
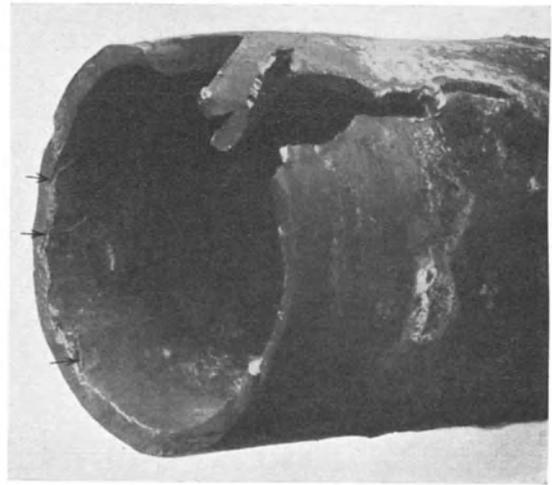
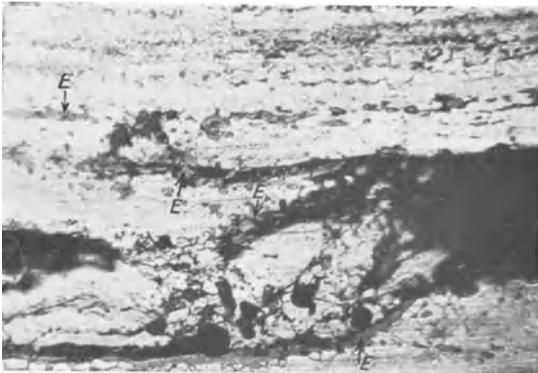
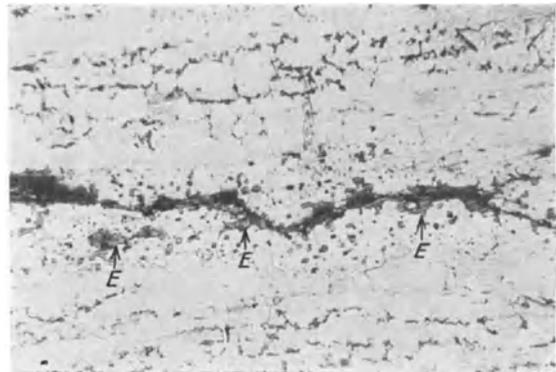
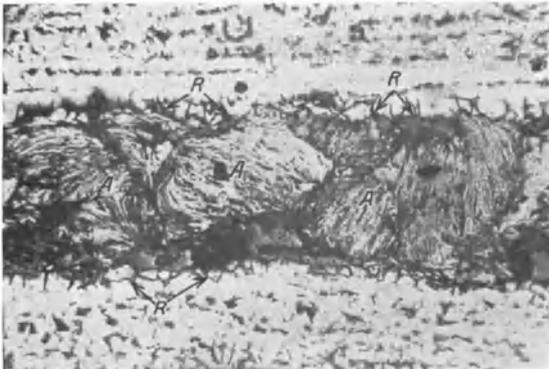
Nachdem eine chemische Einwirkung der im Heizgasstrom enthaltenen Verbrennungsprodukte des Brennstoffschwefels auf das Rohr wohl nur in ganz unwesentlichem Maße stattgefunden haben kann, läßt sich die Schwächung der Rohrwandungen nur durch allmähliches Abschleifen des Rohres durch Flugasche erklären.

9. In einer Kesselanlage riß kurz nach der Inbetriebsetzung der Anlage das Rohr eines Steilrohrkessels von 25 at Überdruck auf. Dieses Vorkommnis veranlaßte die Betriebsleitung, auch die übrigen Rohre des Kessels eingehend innen und außen zu besichtigen. Das Ergebnis dieser Nachprüfung war die Auswechslung von 27 teils schadhafte, teils verdächtig aussehenden Rohren. Die schadhafte Rohre wurden von der Materialprüfstelle des betroffenen Werkes untersucht, wobei folgende Feststellungen gemacht wurden:

Zur Untersuchung lagen Stücke aus den Siederohren des Steilrohrkessels vor, die durch Ablättern defekt geworden waren (Abb. 48 und 49, $\frac{3}{4}$ der natürlichen Größe).

Es war festzustellen, daß die Anrisse ca. 1—1,5 mm tief ins Material hineingingen, um dann parallel dem inneren Rande zu verlaufen. Die an den schadhafte Stellen der Abb. 48 und 49 entnommenen Schiffe (siehe Abb. 50 und 51, natürliche Größe) lassen dies ebenfalls deutlich erkennen. Bereits im ungeätzte Zustande waren größere und kleinere Schlackeneinschlüsse zu beobachten, die zum Teil in unmittelbarem Zusammenhang mit den Ausläufern des Risses

¹⁾ Anmerkung: Nach den neuesten Vorschriften dürfen als Wasserrohre nur noch nahtlose Rohre verwendet werden.

Abb. 48. Siederohr mit Walzschiefer. $V = 0,75$.Abb. 49. Siederohr mit Walzschiefer. $V = 0,75$.Abb. 50. Walzschiefer im Schliff. $V = 1$.Abb. 51. Walzschiefer im Schliff. $V = 1$.Abb. 52. Schlackeneinschlüsse bei E, E . $V = 100$.Abb. 53. Schlackeneinschlüsse bei E, E . $V = 100$.Abb. 54. Auslauf der Risse s (Abb. 50). $V = 100$.Abb. 55. Ferritzeilen. $V = 100$.

standen. Abb. 52 und 53 zeigen in 100facher Vergrößerung, geätzt mit 2proz. alkoholischer Salpetersäure, die blaugrauen Einschlüsse *E*, die teilweise durch den Riß verbunden sind und teils diesen umgeben. Bei Schliff 50 fand sich in der Verlängerung des aufgeklafften Spaltes eine besondere Erscheinung, und zwar waren hier im Abstand von ca. 0,2 mm feine kurze, stark verzweigte Risse *R* zu beobachten, zwischen denen das Material eigenartige Ätzfiguren *A* ergab (Abb. 54 $V = 100$). An beiden Schliffen war die Feststellung zu machen, daß sich in direkter Verlängerung der Risse (vgl. Abb. 50 und 51) dunkel erscheinende ausgeprägte Seigerungszone *S* befanden, die die Stead-Oberhoffer-Ätzung als P-Seigerungen erkennen ließ. Daraus geht ohne weiteres hervor, daß das Aufplatzen genau im Verlauf der Seigerungen erfolgte. Mikroskopisch waren diese durch breite Ferritzeilen kenntlich gemacht, da bekanntlich Phosphoransammlungen keimbildend auf die Ferritabscheidung einwirken (Abb. 55 $V = 100$). Gleichzeitig sind feine Schlackeneinschlüsse in der Ferritzeile zu beobachten. Es handelt sich im übrigen um nahtlos gezogene Rohre aus kohlenstoffarmem Flußeisen, dessen Gefüge aus feinkörnigem Ferrit und lamellarem Perlit besteht.

Zusammenfassung.

Die Rohre bestehen aus nahtlos gezogenem kohlenstoffarmen Flußeisen mit einem Gefüge aus feinkörnigem Ferrit und lamellarem Perlit. Die an der Innenwandung der Siederohre vorhandenen Risse gehen ca. 1—1,5 mm tief ins Material hinein, um dann parallel dem

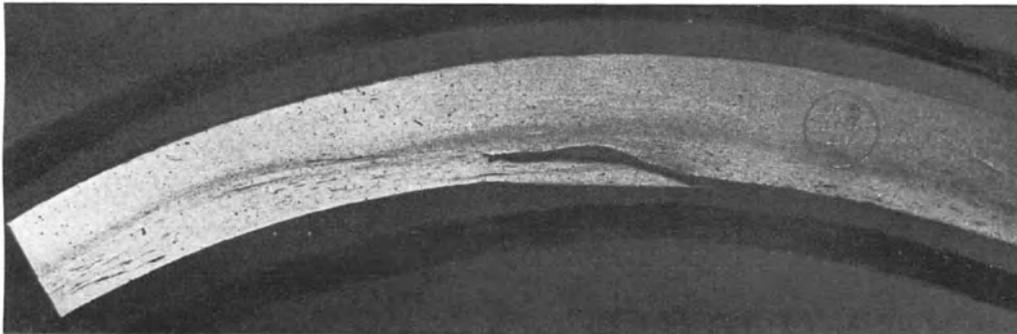


Abb. 56. Unganze Stelle (Schale).

$V = 5$

Rande zu verlaufen. Verantwortlich für die Risse sind Phosphorseigerungen und Schlackeneinschlüsse zu machen. Es ist deutlich erkennbar, daß das Aufreißen genau im Verlauf der Seigerungszone erfolgte, während die teils größeren, teils kleineren Schlacken gleichfalls die Rißbildung begünstigten. Mikroskopisch sind die Seigerungen als breite Ferritzonen gekennzeichnet.

10. Das Ergebnis dieser Ermittlungen gab dem zuständigen Revisionsverein Veranlassung, weitere Stichproben an den noch im Kessel befindlichen Rohren zu verlangen.

Es wurde mit dem Kesselhersteller vereinbart, daß zwölf beliebige Rohre aus dem Kessel herausgenommen und einer Materialprüfungsanstalt übersandt wurden zum Zwecke der Untersuchung. Für den Fall, daß sich bei dieser Untersuchung an einem der zwölf Rohre Fehler finden sollten, verlangte der Revisionsverein, daß sämtliche noch nicht ausgewechselten Rohre des Kessels ausgewechselt würden.

Die Untersuchung der zwölf Rohre in der Materialprüfungsanstalt ergab folgendes Resultat:

a) Besichtigung der einzelnen Rohre. Eines der Rohre wies auf der Innenseite eine etwa 500 mm lange unganze Stelle (Schale) auf. Ein Querschnitt durch diese Schale ist in Abb. 56 in fünffacher Vergrößerung wiedergegeben.

Bei einem zweiten Rohr waren auf der Außenseite kleinere unganze Stellen (Schalen) vorhanden.

b) Aufweitversuch. Der an je einer Probe aus den zwölf Rohren vorgenommene Aufweitversuch gab zu Beanstandungen keine Veranlassung.

c) Bördelversuch. Bei einem Rohr ist die Bördelprobe in der aus Abb. 57 ersichtlichen Weise an der unter a) erwähnten Schale gerissen.

Bei einer außerhalb der Schalenbildung entnommenen Probe sind Risse nicht entstanden.

Die Proben aus den übrigen Rohren gaben zu Beanstandungen keine Veranlassung.

d) Abschreckbiegeversuch. Die Abschreckbiegeproben von drei Rohren sind in den Abb. 58—60 photographisch wiedergegeben.

Bei dem ersten dieser Rohre ist sowohl die erste Probe als auch die Ersatzprobe jeweils bei einem Krümmungsradius von ungefähr 14 mm gerissen (Wandstärke rund 5,0 mm, demnach vorschriftsmäßiger Krümmungshalbmesser 10 mm).

Bei dem zweiten Rohr ist die erste Probe bei einem Krümmungsradius von ungefähr 12 mm gerissen. Bei der Ersatzprobe entstand ein feiner Anbruch bei Erreichung des vorgeschriebenen Krümmungshalbmessers.

Bei dem dritten Rohr brach die erste Probe unter einem Krümmungshalbmesser von ungefähr 11 mm. Bei der Ersatzprobe ist bei Erreichung des vorgeschriebenen Krümmungshalbmessers ein feiner Anbruch entstanden.

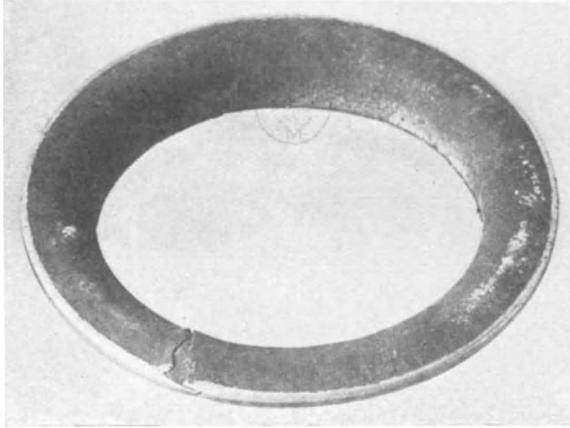


Abb. 57. Aufgerissene Bördelprobe des Rohres Abb. 56.

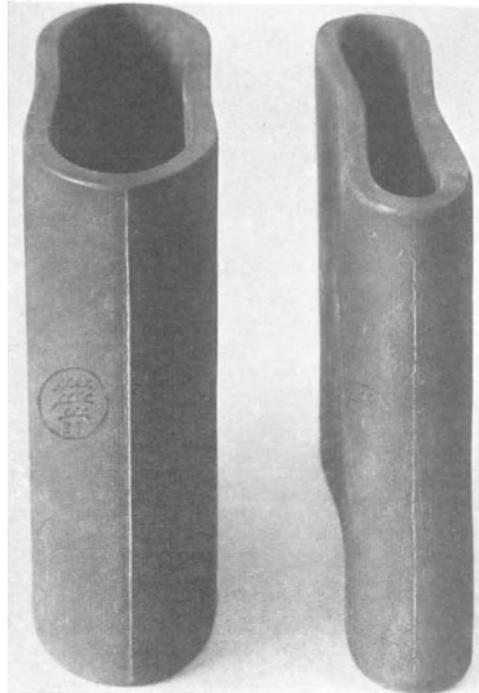


Abb. 59. Abschreckbiegeproben.

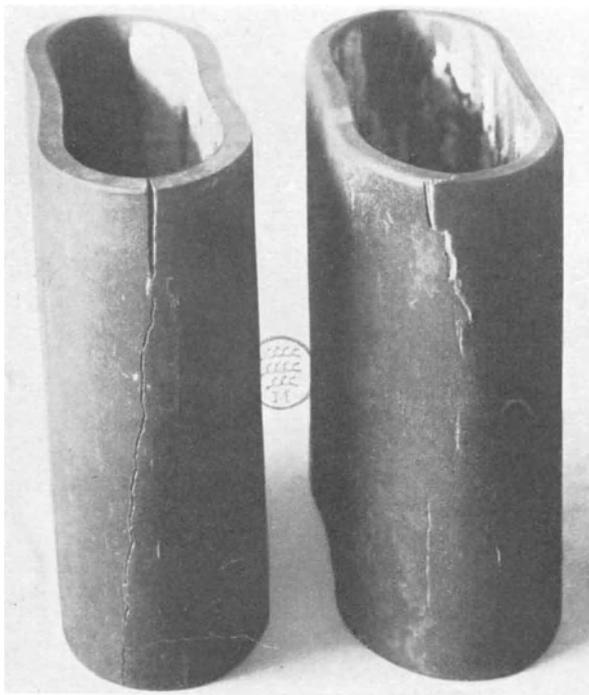


Abb. 58. Vorzeitig gerissene Abschreckbiegeproben.

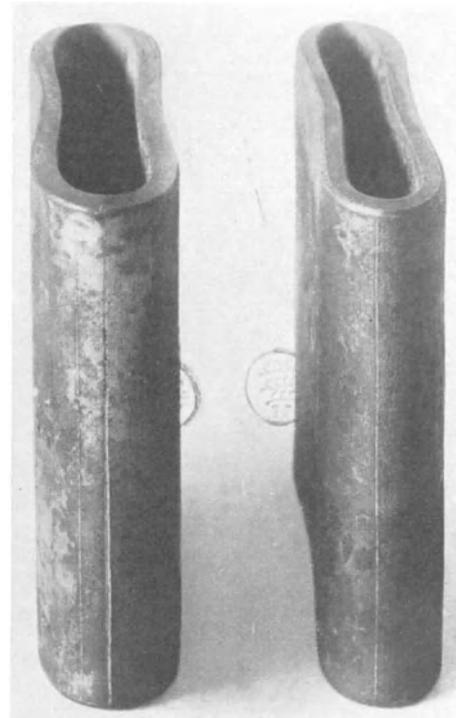


Abb. 60. Abschreckbiegeproben.

Die Abschreckbiegeprobe eines vierten Rohres brach in der aus Abb. 61 ersichtlichen Weise an der oben unter a) erwähnten unganzen Stelle.

Die Abschreckbiegeproben aus den übrigen Rohren gaben zu Beanstandungen keine Veranlassung.



Abb. 61. Bruch der Abschreckbiegeprobe des Rohres Abb. 56.

Herstellung von Kessel- und Dampfrohren nach dem Mannesmann-Verfahren.

Von Direktor **Fritz Rosdeck**, Mannesmannröhren-Werke Düsseldorf.

Im allgemeinen kennen wir in der nahtlosen Rohrerzeugung zurzeit drei grundlegende Fabrikationsverfahren, und zwar

1. das alte schwedische Verfahren.

Ein auf der hydraulischen Presse durch Lochung hergestellter Hohlkörper mit starker Wand wird in einem Duo-Walzwerk über Stopfen zu einem Rohr ausgewalzt.

2. Das Loch- und Ziehverfahren, das sogenannte Ehrhardtsche Verfahren. Bei demselben wird ebenfalls ein mit Hilfe der hydraulischen Presse hergestellter starkwandiger Hohlkörper durch ein nachfolgendes entsprechendes Ziehverfahren (zum Unterschied von 1). zu einem Rohr ausgestreckt.

3. Das Mannesmann-Walzverfahren.

Hier wird der starkwandige Hohlkörper, der in allen drei Fällen als Produkt des ersten Stadiums im Rohrerzeugungsprozeß anzusehen ist, durch das bekannte Schrägwalzverfahren — das ursprüngliche Mannesmann-Verfahren — hergestellt.

In dem zweiten, anschließenden Verfahren, dem Pilgerwalzprozeß, erfolgt die Ausstreckung des in dem ersten Stadium erzeugten Hohlblockes zu einem Rohr von handelsüblichen Abmessungen. Alle anderen Erzeugungsmethoden für nahtlose Rohre werden wir bei unserer Betrachtung nicht weiter erwähnen, weil sich dieselben in ihrem Grundaufbau stets an einen der drei obengenannten Prozesse anlehnen. Über das Ehrhardtsche Verfahren wird Herr Generaldirektor Thomas sprechen, und das alte schwedische Verfahren ist in Deutschland nur in verschwindendem Maße in Anwendung.

Nachdem die Industrie die ungeheuren Vorteile der nahtlosen Rohre gegenüber den patentgeschweißten Rohren erkannt hatte, wurden letztere allmählich in der ganzen rohre- verarbeitenden Kesselbauindustrie verdrängt, und man kann ruhig behaupten, daß die große Steigerung des Dampfdruckes und die Entwicklung der Kesselbauindustrie in den letzten Jahrzehnten lediglich dem nahtlosen Rohr zu verdanken ist, bildet doch dasselbe zurzeit ein Hauptkonstruktionsglied des Dampfkessels.

Als Ausgangsmaterial für den Mannesmann-Schrägwalzprozeß und den mit ihm vereinigten Pilgerwalzprozeß wird für Rohre größerer Dimensionen der im basischen Siemens-Martin-Verfahren hergestellte Rohblock, für Rohre der kleineren Dimensionen — zu denen vor allen Dingen auch die Kesselrohre gehören — der vorgewalzte Rundknüppel verwendet.

Aus dieser Maßnahme ist schon zu ersehen, daß der Rohrfabrikant das Bestreben hat, für ein höher beanspruchtes Kesselrohr Material zu verwenden, das durch den Rundwalzprozeß bereits eine Durcharbeitung und damit eine Gefügeverdichtung erfahren hat.

Der Rundwalzprozeß für die Knüppel unserer Rohrerzeugung wird auch so durchgeführt, daß das Lunkerende, welches bei einem gegossenen Block — gleichgültig, ob derselbe nach dem Siemens-Martin- oder Thomas-Verfahren hergestellt ist — 25—30% des Blockes beträgt, vorweg abgeschnitten und von der Weiterverarbeitung zum Rohr ausgeschieden wird.

Ich bitte, zur Beurteilung des Gefügeunterschiedes die Abbildungen 1 u. 2 zu betrachten:

Die Feinheit des Gefüges bleibt aber, wie wir später sehen werden, beim Endprodukt dieselbe, gleichgültig, ob wir als Ausgangsmaterial den Ingot oder vorgewalzten Rundstahl verwendet haben.

Die auf das entsprechende Gewicht vorbereiteten Rohknüppel oder Rohingots werden in langen, mit Gas oder Kohle beheizten Öfen auf die erforderliche Walztemperatur von



Abb. 1 zeigt das Gefüge eines rohge-
gossenen Blockes — sehr grobe
Kristalle. $V = 100$

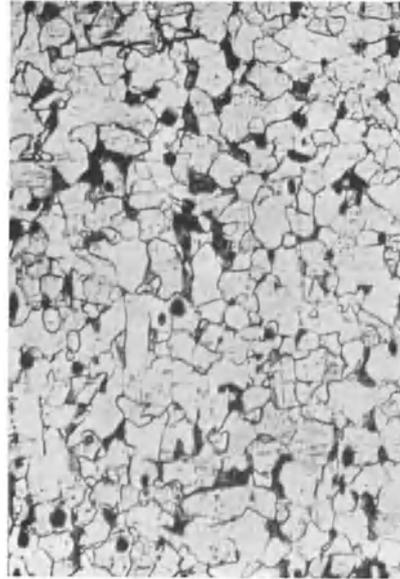


Abb. 2 zeigt das Gefüge eines vorge-
walzten Materials — feinere Kristalle —
wie es für Siederohre verwendet wird.
 $V = 100$

ca. 1300°C gebracht. Diesem Anwärmungsprozeß ist eine besondere Sorgfalt zu widmen. Die größte Gleichmäßigkeit des Durchwärmens ist die erste Bedingung für die Herstellung eines einwandfreien Rohres.

Ungleichmäßig gewärmte Blöcke ergeben unweigerlich schon im Schrägwalzprozeß einseitige, d. h. in der Wandstärke ungleichmäßige Hohlblöcke. Eine ungleichmäßige Wandstärke, die im vorhinein in dem Prozeß auftritt, läßt sich aber bei der Weiterverarbeitung nicht mehr ausmerzen.

Um dieser Gefahr zu begegnen, wird in jedem gut geleiteten Betriebe die Temperatur eines jeden Blockes beim Passieren des Schrägwalzapparates gemessen und damit die schärfste Kontrolle des gesamten Prozesses durchgeführt.

Als Beweis, mit welcher Sorgfalt das Anwärmen erfolgt, darf ich nur erwähnen, daß wir bei ca. 45000 Messungen, die wir in einem Zeitraum von fünf Monaten vorgenommen haben, nach den vorliegenden Aufschreibungen nur Temperaturdifferenzen bis zu höchstens $\pm 20^{\circ}\text{C}$ feststellten.

Die nächste Abbildung zeigt Ihnen in schematischer Darstellung einen derartigen Anwärmeeofen.

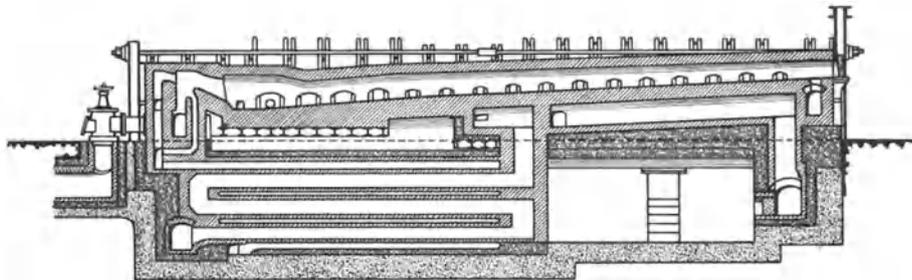


Abb. 3. Rollofen.

Wir kommen nun zu dem Schrägwalzprozeß. Dazu bitte ich die nächste Abbildung zu betrachten:

Der Mannesmann-Schrägwalzapparat besteht aus einem Dreiwalzensystem: den beiden Arbeitswalzen rechts und links, welche direkt von der Maschine unter Zwischenschaltung eines Kammwalzgerüsts in gleicher Drehrichtung angetrieben werden, und der Oberwalze als Schlepplwalze.

Das Kaliber wird aus diesen drei Walzen gebildet, die entsprechend dem Blockaußendurchmesser verstellbar sind. Von der Austrittsseite her wird dem Block ein dem jeweiligen Blockinnendurchmesser entsprechender Dorn entgegengehalten. Dieser Dorn ist bei dem Schrägwalzprozeß als ein weiteres Element für die Kaliberbildung zu betrachten.

Die Achsen der beiden Walzen sind schräg gegen die Horizontale gestellt und kreuzen sich. Wird nun zwischen diese Walzen ein Werkstück in der Längsrichtung eingeführt, so versetzt eine Komponente der Walzenumfangskraft das Werkstück in Drehung, die andere Komponente bewirkt infolge der Schrägstellung der Walzen eine Verschiebung des Werkstückes in der Achsrichtung. Demgemäß versetzen die Walzen den Block, nachdem er in der Längsrichtung eingeschoben wurde, in Drehung und ziehen ihn schraubenförmig vorwärts.

Durch die an der Oberfläche angreifenden Walzkräfte wird das im bildsamen (warmen) Zustand befindliche Material durchgeknetet. Im Innern des Blockes entsteht dadurch eine Gefügelockerung, die beim weiteren Durchgang des Blockes durch die Walzen zu einem hohlen Trichter und schließlich zu einem vollständigen Hohlwerden des Blockes führt. Der Dorn dient lediglich zur Führung, Glättung und Innendimensionierung des bereits gelochten Blockteiles, ohne einen wesentlichen Einfluß auf das Hohlwerden selbst auszuüben.

Ich bitte Sie, die nächste Abbildung zu betrachten. Sie sehen die Dornspitze — und schon vorher — die Hohlbildung des Blockes.

Die Gebrüder Mannesmann hatten ursprünglich den Gedanken, daß der Schrägwalzapparat zur Erzeugung von fertigen, handelsüblichen Rohren dienen müsse. Ich glaube, man kann heute, nach vielen Jahrzehnten, seit denen das Verfahren bekannt ist, ruhig sagen, daß die versuchte Durchführung dieses ursprünglichen Gedankens einen Teil zu dem ersten wirtschaftlichen Mißerfolg dieser epochemachenden Erfindung beigetragen hat.

Mit Hilfe des Schrägwalzapparates lange, dünnwandige Rohre herzustellen, ist meines Erachtens wegen des Temperaturabfalles zwischen Beginn und Beendigung des Prozesses ausgeschlossen, denn man wird in der letzten Phase des Prozesses in das Gebiet der Kaltbearbeitung, ja sogar in das Gebiet der Blauwärme hineingeraten, und dann hört jede Sicherheit in bezug auf Qualität auf. Auch hier muß man das Sprichwort nicht aus dem Auge lassen: „Schmiede das Eisen, solange es warm ist“. Betonen möchte ich noch, daß die Walzgeschwindigkeit begrenzt ist, weil — ist dieselbe zu hoch gewählt — die Gefahr der Zertrümmerung des Materials eintritt. Außerdem ist die Länge des Blockes durch die auf Knickung beanspruchte Dornstange begrenzt.

Durch den Schrägwalzprozeß findet, wie bereits erwähnt, eine Durchknetung und mit derselben eine Umlagerung der Gefügestruktur des Materials statt. Damit ist eine hohe Beanspruchung des Materials verbunden, und wir sind gezwungen, wenn wir nahtlose Rohre nach dem Mannesmann-Schrägwalzverfahren herstellen wollen, im vorhinein als Ausgangsmaterial ein durchaus gesundes, einwandfreies Rohmaterial zu wählen, denn jeder Fehler tritt bereits im Schrägwalzapparat zutage und fehlerhafte Blöcke müssen von der Weiterverarbeitung ausgeschlossen werden.

Über das Verhältnis der Querschnitte vom Rohblock zum Hohlblock wäre folgendes zu sagen: Nehmen wir den Querschnitt des Rohblockes mit 2 an, so ist der Querschnitt des Hohl-

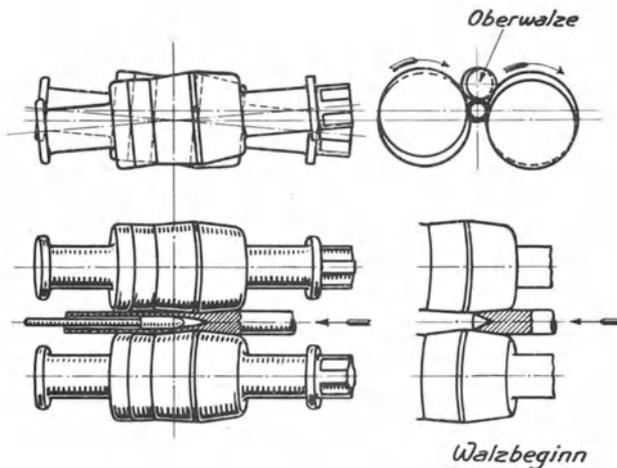


Abb. 4. Schrägwalzen.

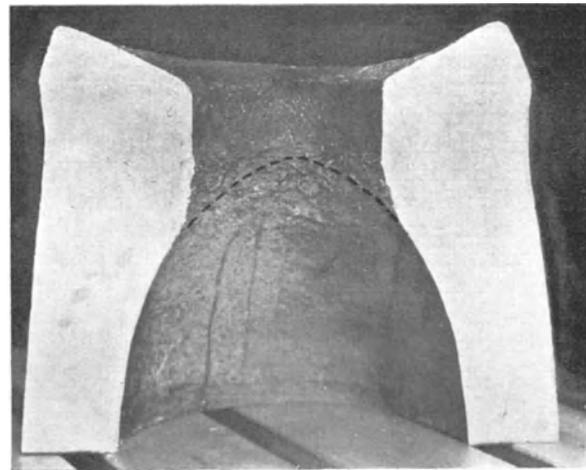


Abb. 5. Aufgeschnittener Hohlblock.

blockes = 1; damit wäre zum Ausdruck gebracht, daß eine ungefähr 50proz. Querschnitts-abnahme stattfindet. Diese Angabe ist jedoch nur allgemein, denn bei den verschiedenen Dimensionen schwankt dieses Verhältnis in gewissem Umfange.

Ich komme nun zum zweiten Teil meines Vortrages, dem

Pilgerschrittwalzverfahren.

Das Pilgerwalzwerk ist ein Zweiwalzen-Walzwerk (Duo-Walzwerk). Seine Walzen sind in besonders kräftigen Walzenständern gelagert, die obere Walze ist der Höhe nach einstellbar. Beide Walzen werden über ein Kammwalzgerüst von der Walzenzugmaschine kontinuierlich angetrieben.

Das Kaliber ist als offenes Kaliber ausgebildet und in Oberwalze und Unterwalze je zur Hälfte eingeschnitten. Ich möchte hier erwähnen, daß de Grahl die erste wissenschaftliche

Untersuchung über das Pilgerschrittwalzverfahren angestellt hat und seine Untersuchungen grundlegend für die Kalibrierung der Walzen gewesen sind.

Bei sämtlichen anderen Walzprozessen wird das Werkstück in der Drehrichtung der Walzen eingeführt. Beim Pilgerwalzprozeß erfolgt die Einführung des Werkstückes gegen die Drehrichtung der Walzen.

Einen weiteren wesentlichen Bestandteil des Pilgerwalzwerkes bildet der Pilgerwagen bzw. bei neueren Ausführungen der Pilgerschlitten, die hydraulisch in der Walzrichtung verschoben werden können.

Dieser Apparat, auch Speisevorrichtung genannt, enthält den Vorholer, dessen Kolben durch Federkraft oder pneumatisch bewegt wird. Das den Walzen zugekehrte Ende ist als Halter zur Aufnahme des Pilgerdornes ausgebildet. Dieser Dorn bildet den inneren Abschluß des ringförmigen Rohrkalibers. Sein Durchmesser entspricht dem Innendurchmesser des fertigen Rohres. Die Länge des Dornes ist etwas größer als die des Hohlblockes.

Der vom Schrägwalzwerk kommende Hohlblock wird auf den Dorn geschoben, sodann durch Vorfahren des Pilgerwagens an die Walzen herangebracht. Nun wird durch vorsichtiges Andrücken des Blockes dessen Ende angespitzt. Erst nach diesem „Anpilgern“ beginnt der eigentliche Walzprozeß.

Die eigentümliche Formgebung der Walzen, die Ihnen die nächste Abbildung zeigt, ist durch das Pilgerschrittverfahren bedingt. Ungefähr auf dem halben Umfang hat jede Walze eine Aussparung, die ein Hindurchtreten des dickwandigen Hohlblockes ermöglicht. Ein allzu weites Vorschieben wird jedoch durch geeignete Maßnahmen verhindert.

Bei der Umdrehung der Walzen kneift nun, wie Sie aus Abbildung 7 ersehen, das „Maul“ in den Hohlblock ein, der nachfolgende, sich radial verengende Teil des Kalibers streckt gemäß der Abbildung 8 das abgekniffene Stück in die Länge und walzt es zum dünnwandigen Rohr aus.

Schließlich poliert noch der restliche Teil des Kalibers die Oberfläche des bereits gewalzten Rohrstückes, wie es in der Abbildung 9 ersichtlich wird.

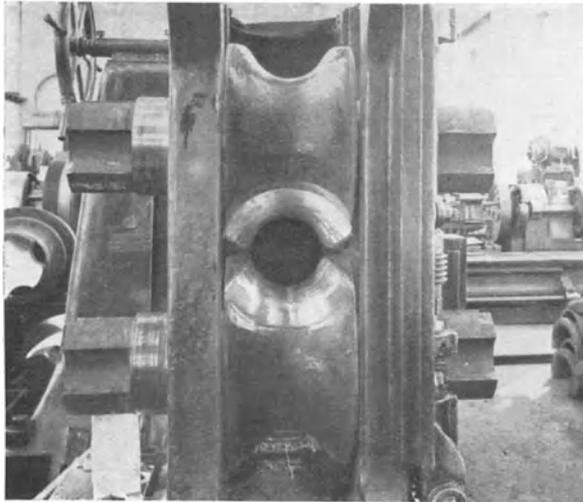


Abb. 6 Pilgerwalze.

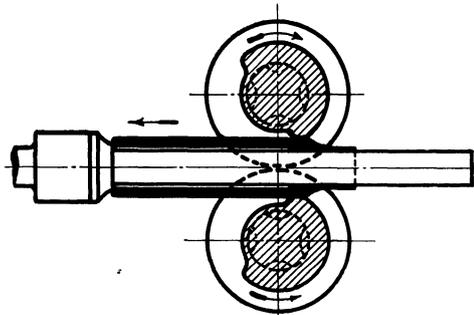


Abb. 7. Schema des Pilgervorganges.

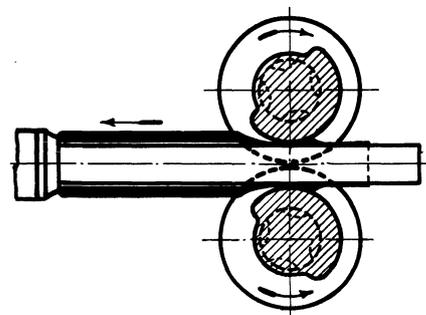


Abb. 8. Schema des Pilgervorganges.

Bei dieser Walzarbeit wird der Hohlblock einschließlich Dorn und Kolbenstange von den Walzen gegen den Pilgerwagen gedrückt, dabei werden die Federn bzw. die Luft im Vorholer gespannt. Geben nun die Walzen bei weiterem Drehen wieder die große Öffnung frei, so stößt die aufgespeicherte Energie des Vorholers den Hohlblock in die Walzen.

Auf der Kolbenstange ist ein Drall eingeschnitten, der bei dieser Vorholbewegung den Hohlblock um 90° dreht. Dies ist erforderlich, weil die Kaliberform in den Walzen etwas oval ausgeführt ist und das Rohr sonst nicht gleichmäßig rund ausfallen würde.

Beim Vorstoßen des Hohlblockes wird jedesmal auch der ganzen Speisevorrichtung ein Vorschub gegeben, welcher der Länge des vorher abgekiffenen Hohlblockstückes entspricht. Nun wieder-

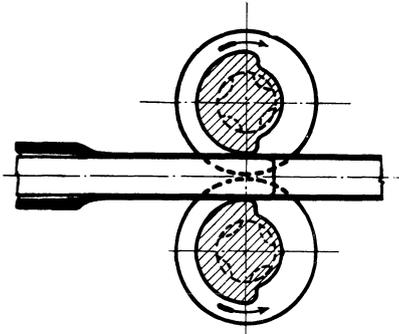


Abb. 9. Schema des Pilgervorganges.

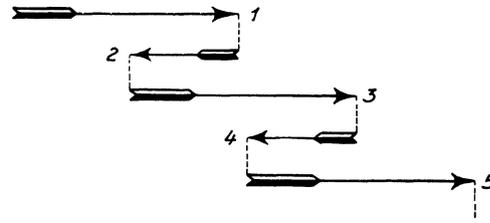


Abb. 10. Echternacher Pilgerschritt.

holt sich bei jeder Walzenumdrehung der geschilderte Vorgang, bis der ganze Hohlblock zum dünnen Rohr ausgewalzt ist.

Lediglich das sich gegen den Kopf des Dornes legende Ende des Hohlblockes kann nicht ausgestreckt werden und bleibt als sogenannter Pilgerkopf am Rohr zurück, der bei glatten Rohren später abgetrennt wird. Schließlich wird noch der Dorn aus dem Rohr gezogen.

Es dürfte noch interessieren, daß das Pilgerschrittwalzverfahren seinen Namen der Marschweise der Echternacher Prozessionspilger verdankt, die sich jedesmal, wenn sie einen großen Schritt vorwärts getan hatten, wieder einen kleinen Schritt rückwärts bewegten. In ähnlicher Weise erfolgt auch die Hin- und Herbewegung des Rohres bei dem Ihnen geschilderten Walzprozeß. (Abb. 10).

Ein fertig gepilgertes Rohr hat nun folgendes Aussehen (Abb. 11).

Sie sehen an einem Ende des Rohres den bereits genannten Pilgerkopf, der bei Rohren für Gas- und Wasserleitungszwecke zum Muffenkopf ausgebildet wird.

Ursprünglich hatte man bei dem Mannesmann-Walzverfahren das Bestreben, im Schrägwalzapparat möglichst dünnwandige Hohlblöcke zu erzeugen und in dem Pilgerwalzprozeß eine geringe Restarbeit zu leisten.

Dieses Bestreben ist wahrscheinlich auf den Gedanken zurückzuführen, daß man schon im Schrägwalzprozeß handelsfertige Rohre herstellen wollte. Die Folge dieses Verfahrens war, daß der Schrägwalzprozeß länger dauerte und der Hohlblock stärker abkühlte. Auch war im Verhältnis zur Masse die Oberfläche des Blockes zu groß und brachte eine zu große Wärmeabstrahlung mit sich.

So trat man mit dem schon etwas kalten Hohlblock, d. h. mit einem zu geringen Wärmeverrat in den Pilgerwalzprozeß ein und geriet gegen Ende dieses Prozesses in das Kaltbearbeitungsgebiet.

Diese ursprüngliche Methode wurde aber von mir vor etwa 22 Jahren verlassen, als ich dazu überging, Rohre in Doppellängen herzustellen. Das Herstellen starkwandiger Hohl-

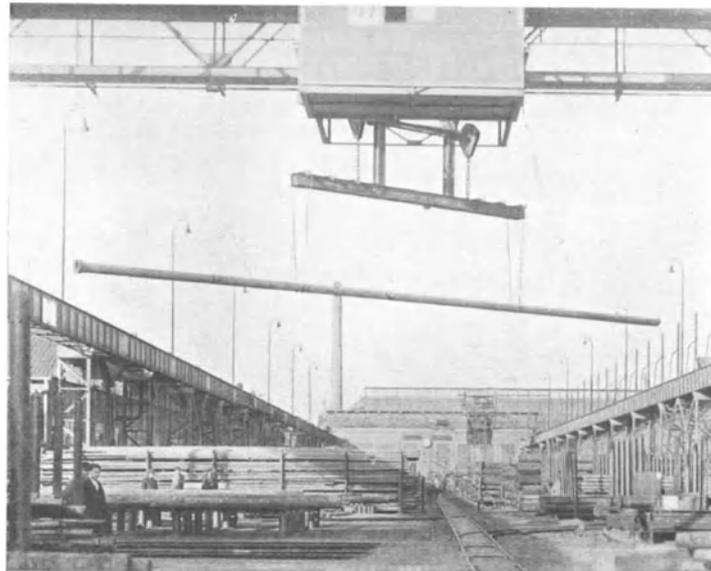


Abb. 11. Fertig gepilgertes Rohr.

blöcke in Verbindung mit großen Rohrlängen brachte denn auch große Erfolge, einmal in wirtschaftlicher Beziehung durch Erhöhung und Verbilligung der Produktion und das andere Mal in technischer Hinsicht durch eine bessere Wärmeausnutzung und metallurgisch richtigere Verarbeitung des Materials.

Die mit Hilfe des Pilgerschrittwalzverfahrens hergestellten Rohre haben den außerordentlichen Vorteil der inneren Glätte, und ich betone, daß dies besonders für Kesselrohre von großer Wichtigkeit ist.

Ich kann mich erinnern, daß in der Vorkriegszeit eine alte österreichische Kesselbaufirma nur Rohre von unseren jetzt tschechoslowakischen Werken bezogen hat und alle anderen Fabrikate, welche diese innere Glätte nicht gewährleisteten, ablehnte.

Das Gefüge des gepilgerten Rohres zeigt die Eigenschaften eines gut durchgearbeiteten Walzproduktes. Zum besseren Vergleich wollen Sie bitte die Abb. 12 betrachten: Sie sehen darauf das Gefüge des Ausgangsmaterials sowie das Gefüge des Fertigproduktes.

Nachdem ich Ihnen im großen und ganzen eine Beschreibung des Mannesmann-Schräg- und Pilgerschrittwalzverfahrens gegeben habe, dürfte es zweckmäßig sein, jetzt die besonderen Maßnahmen zu

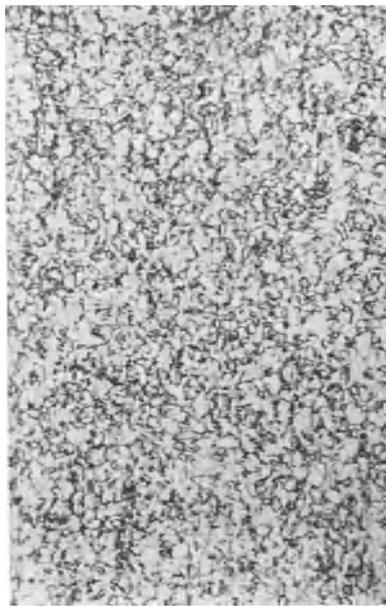
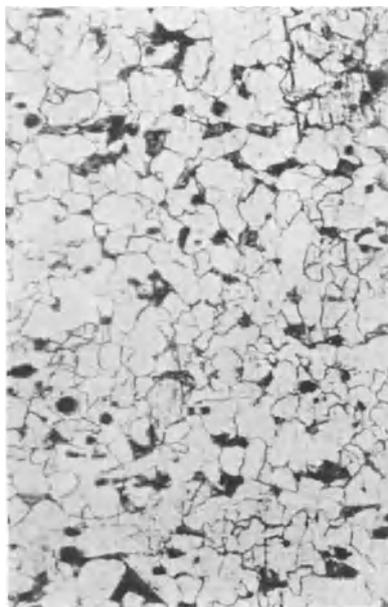


Abb. 12. Gefüge (Ausgangsmaterial und fertiges Rohr). $V = 100$

erwähnen, welche wir bei Herstellung von Kesselröhren, Überhitzerröhren und Dampfleitungsröhren anwenden.

Wir stellen die Rohre für diese Zwecke aus einem Material mit einer Festigkeit von 38—45 kg/qmm und einer Streckgrenze von 24—28 kg/qmm her. Nach der Bachschen Formel ergeben die Längsproben Dehnungen von 28—22%, die Querproben solche von 26—20%.

Anwärme- und Walzprozeß werden unter besondere Beobachtung gestellt.

Bei Festlegung der Wandstärkentoleranzen

begnügt man sich seither mit einem Satz von 10%

nach oben und nach unten, d. h. es wurden auch alle diejenigen Rohre verwendet, die in ihrer Wandstärke eine Abweichung bis zu 10% nach unten zeigten. An und für sich war die Sicherheit bei Verwendung des nahtlosen Kesselrohres eine derartig große, daß man einer Wandstärkenabweichung nach unten eine besondere Bedeutung nicht zuzusprechen brauchte. Auch wurde in den früheren Jahren dem nachherigen Ausglühen des Rohres kein allzu großes Gewicht beigelegt, die Hauptsache blieb für den Kesselbauer, daß die Enden gut ausgeglüht waren, um ein einwandfreies Einwalzen in die Kesselwand zu gewährleisten. Fragen, welche Streckgrenze das Material in höheren Temperaturen aufweist, wurden nicht gestellt. Erzeuger und Verbraucher waren sich über die Güte des nahtlosen Rohres für diese Zwecke vollkommen einig.

Erst als in den letzten Jahren das Bestreben auftrat, mit Rücksicht auf eine rationelle Wärmewirtschaft den Betriebsdruck bei stationären Großkesselanlagen bedeutend zu erhöhen, hat man sich mit der Frage beschäftigen müssen: „Genügt unser bisheriges nahtloses Kesselrohr auch den gesteigerten Ansprüchen?“

Diese Frage ist ohne weiteres unter gewissen Bedingungen zu bejahen. Ich sage ausdrücklich: „Unter gewissen Bedingungen“. Unter diesen möchte ich verstehen, daß schon von dem Besteller der Kesselrohre auf ihren Einbau in Kessel mit höheren Dampfdrücken hingewiesen wird.

Der Rohrerzeuger wird dann seinen gesamten Walzprozeß so einstellen, daß er die Wandstärkentoleranz nach unten nicht mehr ausnutzt, sondern die früher gestattete Abweichung vollständig nach oben legt. Es darf also beispielsweise ein Kesselrohr von 95 mm äußerem

Durchmesser mit normal $3\frac{1}{2}$ mm Wandstärke nur eine solche von 3,5—4,2 mm aufweisen. Schon diese Maßnahme erhöht die Sicherheit um 10%.

Es wird wohl durch diese Maßnahme — das Verlegen der Wandstärkentoleranz nach oben — eine etwas verminderte Wärmeübertragung eintreten, aber auf den Gesamtwirkungsgrad des Kessels dürfte dies meines Erachtens keine Auswirkung haben. Die größtmögliche Sicherheit ist hier von erster und alleiniger Bedeutung.

Bei den hohen Dampfdrücken und der hohen Überhitzung ist natürlich gegen früher im ganzen Kesselsystem mit erhöhten Temperaturen zu rechnen, bei denen die Rohre beansprucht werden.

Bekanntlich wird die Festigkeit des Materials bei steigenden Temperaturen im allgemeinen geringer, ebenso fällt Streckgrenze und Dehnung.

Ich verweise auf Abbildung 13.

Die Kurven stellen Mittelwerte von Versuchen dar, die wir mit unserem normalen Kesselrohrmaterial vorgenommen haben. Sie ersehen, daß die Festigkeit zunächst bis zu 200°C ansteigt, dann aber mit steigender Temperatur außerordentlich stark abfällt. Die Dehnungslinie zeigt direkt vom Beginn der Erhitzung an fallende Tendenz, um bei Temperaturen über 350°C wieder etwas anzusteigen. Die Streckgrenze fällt bei zunehmenden Temperaturen in einem ziemlich geradlinigen Verlauf ab.

Das Material besitzt also bei einer Temperatur von 400°C immerhin noch eine Streckgrenze von 12 kg/qmm, woraus sich für das Kesselrohr, das nach den heutigen Vorschriften im allgemeinen für eine zulässige Beanspruchung von 5 kg/qmm dimensioniert ist, noch eine wesentliche Betriebssicherheit ergibt.

Ich komme nun auf die in den letzten Jahren mehrfach erörterten Fragen über „Altern“ und „Rekristallisation“ zu sprechen. Auf diesem Gebiete sind besonders die Arbeiten von Goerens, Oberhoffer, Bauer und Baumann zu erwähnen.

Das Altern tritt nur bei weichem Flußeisen auf und macht sich in einem starken Abfall der Kerbzähigkeit bemerkbar, ohne daß Festigkeit, Streckgrenze und Dehnung eine wesentliche Änderung erfahren. Der Zugversuch gibt demnach über diese Materialverschlechterung keinen Aufschluß.

Nach O. Bauer kann eine Verschlechterung durch das Altern nur dann eintreten, wenn das Material kalt gereckt, d. h. über seine Streckgrenze hinaus beansprucht wurde. Dabei treten Alterungserscheinungen im allgemeinen nur in Temperaturen bis zu ca. 250°C auf.

Als eine weitere Materialveränderung kann die Rekristallisation angesprochen werden. Sie besteht in einer Vergrößerung der Gefügestruktur und ist ebenfalls mit einer Verminderung der Kerbzähigkeit verbunden.

Dieses nachteilige Kornwachstum vollzieht sich nur in Temperaturen zwischen 500 und 800°C , und zwar auch hier wieder nur bei einem Material, das eine Kaltreckung über seine Streckgrenze hinaus erfahren hat.

Diese Alterungs- und Rekristallisationserscheinungen können aber aufgehoben werden durch eine Glühung des Materials über dem Ac_3 -Punkt.

Da nun bei der Weiterverarbeitung der Rohre nach Beendigung des Walzprozesses leicht Spannungen auftreten können, werden alle Kesselrohre einer sorgfältigen Glühung unterworfen.

Die Abbildung 14 zeigt Ihnen das Aussehen eines Glühofens.

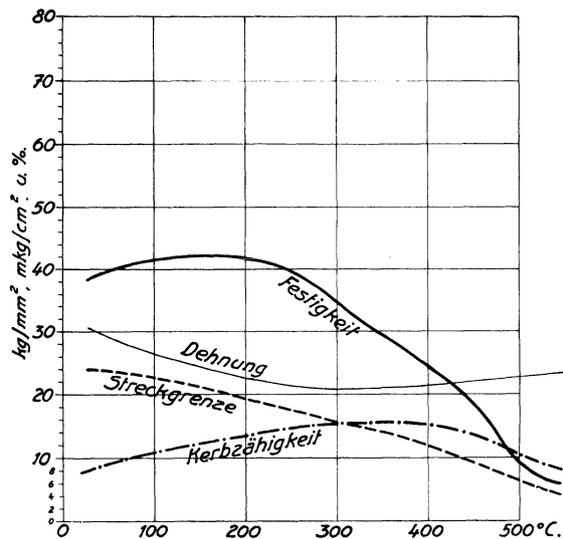


Abb. 13. Warmzerreiβproben, weiches Material.

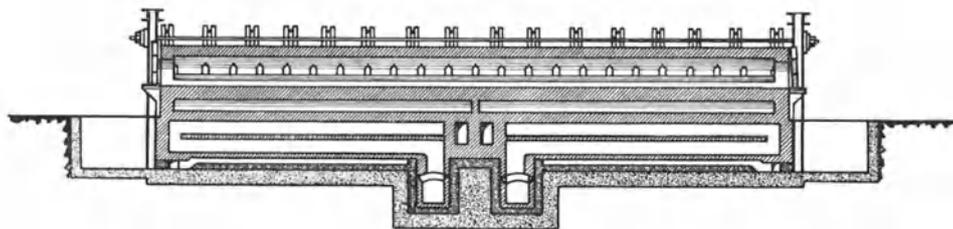


Abb. 14. Glühofen.

Wir haben Versuche in bezug auf Alterungs- und Rekrystallisationserscheinungen mit unserem Kesselrohrmaterial vorgenommen, deren Ergebnisse in Zahlentafel 1 u. 2 niedergelegt sind.

Das Material wurde über die Streckgrenze hinaus kalt gereckt. Unter normalen Verhältnissen würde sich die Alterung über einen längeren Zeitraum erstrecken. Wir haben nun, um entsprechende Resultate zu erhalten, eine künstliche Alterung dadurch herbeigeführt, daß wir die über ihre Streckgrenze hinaus kalt gereckten Proben zehn Tage lang einer Temperatur von ca. 200° C aussetzten. Wir haben uns bei diesen Versuchen an gleiche angelehnt, wie sie bereits in der Kruppschen Versuchsanstalt von Goerens, Fischer und Schleip durchgeführt worden sind.

Wie bereits erwähnt, sind Alterungserscheinungen nur in Temperaturen bis zu 250° C beobachtet worden. Die Materialveränderungen, welche durch die Rekrystallisation auftreten, vollziehen sich in der Regel in Temperaturen zwischen 500° C und 800° C.

Für die Versuche, die sich auf die Rekrystallisation beziehen, haben wir die Probestäbe in derselben Weise vorbereitet wie bei den Versuchen über das Altern, nur wurden diese Probestäbe nach der Kaltreckung einer sechsständigen Glühung bei 730° C unterworfen.

Die Endergebnisse all dieser Versuche an Kerbschlagproben von 8 × 5 mm Kerbquerschnitt bei einer Scharfkerbe von 45° und 2 mm Tiefe weisen folgende Resultate auf:

Zahlentafel 1.

Alterungs- und Rekrystallisationsversuche.

Material: 0,105 % C, 0,54 % Mn, 0,25 % Si, 0,026 % P, 0,023 % S. Glühung bei 920° C.

Zugversuche	Längs-proben	Quer-proben
Zerreißfestigkeit kg/qmm	42,4	41,8
Streckgrenze "	28,2	27,2
Dehnung %	28	27

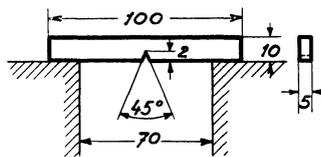


Abb. 15. Kerbschlagproben.

Zahlentafel 2. Mittelwerte der Ergebnisse.

Art der Vorbehandlung	Spez. Schlagarbeit mkg/qcm	
	Längs-proben	Quer-proben
Keine	6,51	2,34
Gereckt u. 10 Tage bei 200° C angelassen	8,46	2,58
Gereckt und 6 Stunden bei 730° geglht	7,91	2,38

Nicht gerecktes (normales) Material

6,5 mkg/qcm

2,3 mkg/qcm

1. Lngsproben:

Gealterte Proben

8,5 mkg/qcm

2. Querproben:

2,6 mkg/qcm

Rekrystallisations-Proben

7,9 mkg/qcm

2,4 mkg/qcm

Zu den Versuchen wurde ein Pendelhammer von 10 mkg Schlagarbeit verwendet.

Ein Auftreten von Alterungs- und Rekrystallisationserscheinungen an unserem Material konnten wir bei diesen Versuchen demnach nicht feststellen.

Ich bitte Sie nun, die Abbildung 16 zu betrachten:

Sie zeigt Ihnen das Gefüge eines Rohres, das in einem Steilrohrkessel von 20,5 at Betriebsdruck 10290 Stunden im Betrieb war. Das Gefüge hat vollständig das Aussehen eines normalen weichen Flußeisens.

Die Abbildung 17 zeigt Ihnen das Gefüge desselben Rohres an der Einwalzstelle. An dieser Stelle wurde das Rohr, um es aus dem Kessel ausbauen zu können, in der üblichen Weise mit Hämmern kalt deformiert. Das Korn dieses Gefüges ist im Vergleich zu der vorhergegangenen Abbildung etwas grber.

Trotz der Kaltbearbeitung beim Einwalzen, der langen Betriebszeit von über 10000 Stunden und der schließlichen groben Deformation des Rohrendes beim Ausbau zeigte sich nicht der geringste Ansatz zur Bildung eines Risses oder Bruches, wie denn auch keinerlei Alterungserscheinungen bemerkbar waren.

Ich möchte aber ausdrücklich betonen, daß das Studium über die Frage des Alterns und der Rekrystallisation bei Kesselrohren noch nicht als abgeschlossen zu betrachten ist. Es müssen nach dieser Richtung hin noch wesentlich mehr Versuche an ausgebauten Kesselrohren vorgenommen werden. Erwähnenswert ist immerhin, daß uns von seiten der Kundenschaft Reklamationen nach dieser Richtung hin noch niemals zugegangen sind.

Wir haben dann weiterhin Versuche vorgenommen, um den Druck festzustellen, bei

welchem ein Aufplatzen eines unter innerem Druck befindlichen Rohres erfolgt bzw. bei welchem äußeren Druck ein Rohr zusammengepreßt wird.



Abb. 16. Gefüge eines gebrauchten Siederohres. $V = 100$.



Abb. 17. Gefüge des gebrauchten Siederohres an der Einwalzstelle. $V = 100$.

Zu diesem Zweck haben wir für die Innendruckversuche jeweils ein Rohr zerschnitten, davon die eine Hälfte durch Wasserdruck bis zum Aufplatzen belastet, während die zweite Hälfte zuerst bis zu einem Wasserdruck von 100 at vorgepreßt und dann durch zwei Wassergasbrenner erhitzt wurde. Dabei stieg, während die Pumpe außer Betrieb gesetzt war, infolge der Dampfbildung der Druck innerhalb eines Zeitraumes von 10–15 Minuten bis zur Explosion des Rohres.

Leider ist während der Versuche an dem Thermoelement eine Störung eingetreten, so daß uns eine Temperaturfeststellung im Augenblick der Explosion nicht möglich war. Jedenfalls aber sind wir bei der durch die Dampfbildung bedingten hohen Spannung auf Temperaturen gekommen, die mindestens über 350°C gelegen haben. Es existieren ja auch für die bei den Versuchen aufgetretenen Dampfdrücke noch keine Zahlentafeln bzw. Anhaltspunkte über die zugehörigen Dampftemperaturen, die uns einen Vergleich ermöglichen könnten.

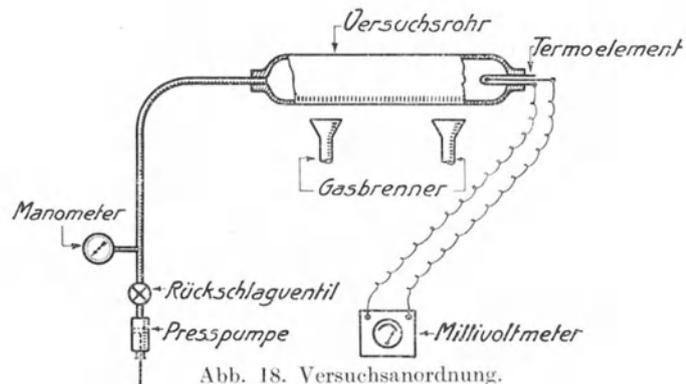


Abb. 18. Versuchsanordnung.

Die Anordnung des Versuches zeigt Ihnen die Abbildung 18.

Zahlentafel 3 enthält die Ergebnisse unserer Versuche.

Sie sehen, daß sowohl die mit Kaltwasserdruck als auch die in heißem Zustand durchgeführte Sprengung der Rohre bei ungefähr denselben Drücken erfolgte. Die Aufklärung dieser merkwürdigen Erscheinung muß weiteren Forschungen vorbehalten bleiben, denn sie steht im Widerspruch zu den Warmzerreiversuchen, die bei Temperaturen von über 350° bedeutend geringere Festigkeitswerte aufweisen.

Zahlentafel 3. Ergebnisse der Innendruckversuche.

Außendurchmesser des Rohres mm	Wandstärke mm	Aufplatzen des Rohres erfolgte bei		Durch Zugversuch festgestellte Zerreißfestigkeit kg/qmm
		Pumpendruck at	Gasbeheizung at	
102	3,95	370	380	44,6
89	4,15	400	395	42,2
76	3,05	380	380	42,5

Die Außendruckversuche erfolgten in Anlehnung an Versuche, die wir bereits früher an Rohren für die Ölindustrie vorgenommen haben. Es bestand jedoch insofern ein Unterschied, als es sich damals um Rohre der verschiedensten Dimensionen aus einem bedeutend härteren Material, nämlich um ein solches mit einer Festigkeit von 55—65 kg/qmm, handelte.

Die Ergebnisse sind in der Zahlentafel 4 zusammengestellt.

Zahlentafel 4. Ergebnisse der Außendruckversuche.

Rohr Nr.	Mittl. äußerer Durchmesser D mm	Mittlere Wandstärke S mm	$\frac{S}{D}$	Äußerer Wasserdruck beim Zus.-Bruch at	Materialfestigkeit kg/qmm
1	113,96	3,80	0,0333	115	40,25
2	114,35	3,68	0,0322	125	40,75
3	114,27	3,82	0,0334	120	38,75
4	102,05	3,80	0,0372	162	42,65
5	101,86	4,22	0,0414	197	41,5
6	102,30	4,50	0,0440	210	42,7
7	89,60	3,18	0,0355	117	40,3
8	88,57	3,70	0,0418	162	41,55
9	88,97	3,55	0,0399	174	41,25
10	76,25	3,18	0,0417	166	38,5
11	76,23	3,10	0,0407	193	43,2
12	76,23	3,08	0,0404	161	42,85

Wie damals, so waren auch jetzt die Versuche in erster Linie nur von dem Verhältnis von Wandstärke zum Rohrdurchmesser abhängig, wie es auf der Abbildung 19 ersichtlich ist. Darin ist auch die früher gefundene Linie für hartes Material eingezeichnet. Es wird Ihnen auffallen, daß die beiden Linien nur verhältnismäßig geringe Abstände aufweisen. Die Festigkeit beeinflusst demnach bei Außendruckbeanspruchung die Widerstandsfähigkeit des Rohres viel geringfügiger als bei Beanspruchung durch Innendruck.

Als Beispiel führe ich nur zwei Rohre von 102 mm äußeren Durchmessers an, wovon das eine — mit 3,8 mm Wandstärke — bei 162 at Außendruck, das andere — mit 4,5 mm Wandstärke — aber erst bei 210 at zusammengedrückt wurde. Die Festigkeit der beiden Rohre war mit 42,7 kg/qmm vollständig gleich.

Von großer Bedeutung für die Widerstandsfähigkeit gegen äußeren Überdruck ist eine möglichst gleichmäßige Wandstärke und eine größtmögliche kreisrunde Beschaffenheit des Rohres.

Nach allen diesen Versuchen sind wir der Meinung, daß für die jetzt und in der nächsten Zukunft auftretenden Dampf-

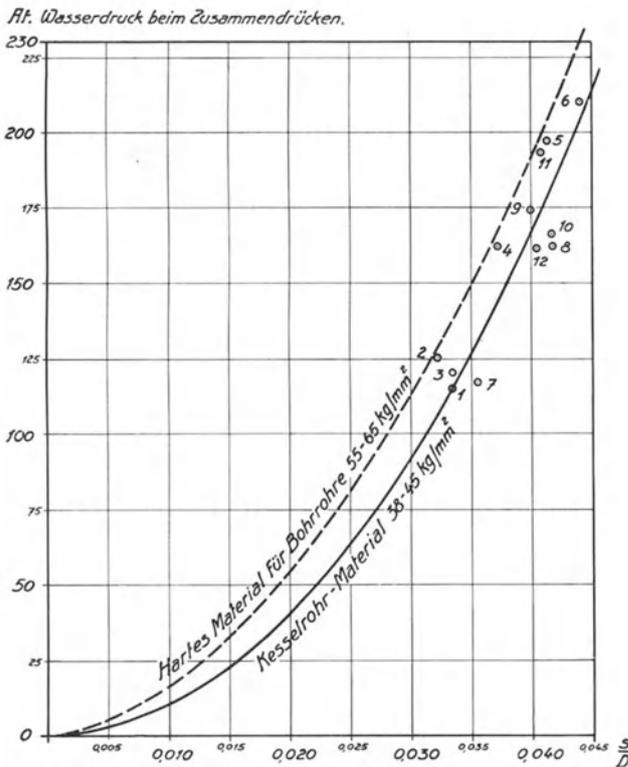


Abb. 19. Zusammenhang der Rohrabmessungen mit den erzielten Drücken.

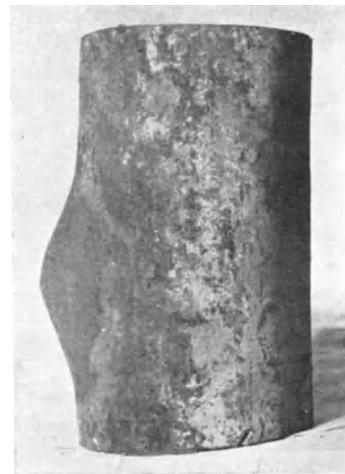


Abb. 20. Beule an einem Wasserrohr.

drücke unser sorgfältig hergestelltes Kesselrohr aus weichem Flußeisen mit einer Festigkeit von 38—45 kg/qmm den Anforderungen vollständig genügen dürfte, und daß auch die Gefahren des Alterns und der Rekristallisation sehr gering sind, daß sie vor allen Dingen bei Kesselrohren nicht die Bedeutung haben, wie es bei den Kesseltrommeln der Fall ist.

Zum Beweis dessen, wie häufig bei Zerstörungen von Kesselrohren mit Unrecht auf die Materialqualität zurückgegriffen wird, führe ich folgendes Vorkommnis an:

Von seiten eines Kraftwerkes erhielten wir Reklamationen dahingehend, daß sich an den Wasserröhren Ausbeulungen bildeten, die Sie aus Abbildung 20 ersehen können.

Wir unterzogen die fehlerhaften Stellen einer eingehenden chemischen und metallographischen Untersuchung, konnten aber irgendwelche Mängel in der Qualität nicht feststellen. Die Reklamationen hörten jedoch nicht auf, bis das betreffende Kraftwerk nach einem Zeitraum von 2—3 Monaten feststellte, daß die Ausbeulungen auf eine Wärmestauung im ersten Zuge zurückzuführen waren.

Die Abbildung 21 skizziert den Verbrennungsraum.

Der Übelstand wurde behoben, indem man unter den Rost, nach Herausnahme der für die Unterwindregulierung vorgesehenen Jalousieschieber, genügend Verbrennungsluft gelangen ließ. Die Regulierung des Unterwindgebläses erfolgt jetzt bei günstigerem Kraftbedarf an den Ansaugöffnungen der Ventilatoren. Gleichzeitig wurde das Zündgewölbe verkürzt und ein Mauervorsprung entfernt. Auch hat man die vordersten Rohrreihen weiter auseinandergezogen.

Die Veränderungen im Kessel ersehen Sie aus Abbildung 22.

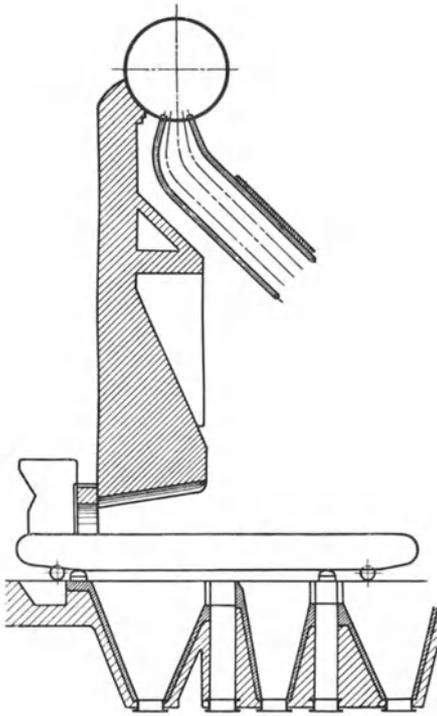


Abb. 21. Verbrennungsraum.

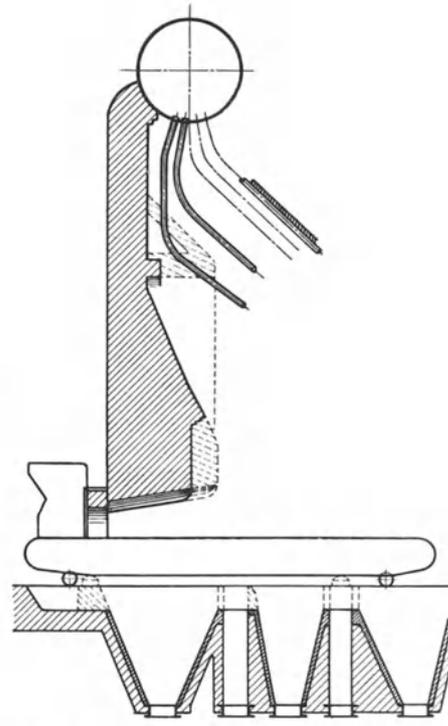


Abb. 22. Verbrennungsraum nach der Änderung.

Die Folge dieser Maßnahme war nicht nur ein Aufhören jeder Rohrbeanstandung, es hat sich vielmehr auch ein bedeutend günstigeres Verhalten der Roststäbe und des Mauerwerks eingestellt. Die Kesselanlage läßt sich nunmehr auch bedeutend stärker forcieren als vor der Änderung.

Für die Fabrikation der Dampfleitungs- und Überhitzerrohre gelten im allgemeinen dieselben Grundsätze, wie ich sie für die Herstellung der Kesselrohre erläutert habe.

Die Weiterverarbeitung der Dampfrohre bei der Montage läßt ohne weiteres die Verwendung eines Materials von etwas höherer Festigkeit zu. Von dieser Möglichkeit hat man denn auch bereits bei dem Bau des Großkraftwerks Rummelsburg Gebrauch gemacht.

Ein Material von höherer Festigkeit ergibt, wie Sie aus der Abb. 23 ersehen, eine etwas höhere Streckgrenze als ein weiches Rohrmaterial.

Außerdem ist bei der Herstellung von Dampfleitungs- und Überhitzerrohren noch der Vorteil hervorzuheben, daß dieselben den Walzprozeß in einer höheren Temperatur beenden als dies bei Kesselsiederöhren der Fall ist. Dampfleitungs- und Überhitzerrohre haben im Verhältnis zu ihrem Außendurchmesser durchweg eine höhere Wandstärke und infolge dieses Umstandes treten wir schon mit einem wesentlich stärkeren Hohlblock und damit einem größeren Wärmeverrat in den Pilgerwalzprozeß ein.

Gefahren bei der Weiterverarbeitung, besonders bei Dampfleitungsrohren, können nur eintreten, wenn beim Biegeprozeß nicht sachgemäß vorgegangen wird. Ich möchte daher

im vorhinein das Vornehmen von Biegearbeiten in kaltem Zustande bei Dampfleitungs-, Siede- und Wasserröhren als ungeeignet bezeichnen. Bei Überhitzerrohren, die nachher im Bogen ausgeglüht werden, ist das Kaltbiegen unbedenklich.

Vor dem Biegen ist es notwendig, daß die Dampfleitungsrohre mit trockenem Sand als Kern gefüllt werden, um eine Deformation beim Biegen zu vermeiden. Sehr wichtig ist aber nach Durchführung des Biegeprozesses die restlose Entfernung des Füllmaterials.

Empfehlenswert ist es, für Kompensationsbögen und größere Bögen zu Dampfleitungen für hohen Druck im vorhinein Rohre mit einer etwas höheren Wandstärke zu wählen als dies unter normalen Verhältnissen üblich ist. Je kleiner der Biegungsradius, um so größer wird die Beanspruchung und damit die Verminderung der Wandstärke in der äußeren Biegungszone des Rohres. Ebenso ist es vorteilhaft und erhöht die Betriebssicherheit wesentlich, wenn sämtliche Kompensationsbögen und sonstigen Krümmen der Dampfleitungen mit möglichst großen Krümmungsradien ausgeführt werden, was auch schon mit Rücksicht auf die Dampfgeschwindigkeit und die Verminderung der Reibungsverluste zu empfehlen ist. Unsere langjährigen Erfahrungen haben gelehrt, daß es am vorteilhaftesten ist, den Krümmungsradius so zu wählen, daß er mindestens dem vierfachen Außendurchmesser des Rohres, besser aber noch dem sechsfachen entspricht.

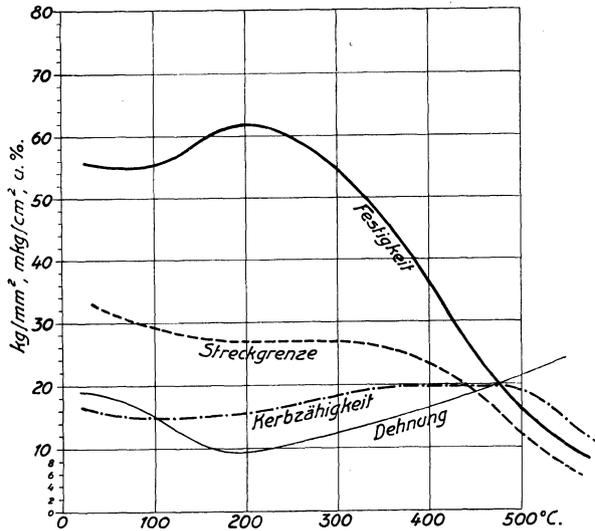


Abb. 23. Warmzerreißeigenschaften, hartes Material.

sollte, ist der Rohrhersteller in der Lage, mit der Entwicklung des Kesselbaues Schritt zu halten, denn ihm bleibt immer noch der Weg offen, Material von höherer Festigkeit und legiertes Material zu verwenden.

Rohrverbraucher und Rohrhersteller müssen in dieser Richtung auf dem Forschungswege gemeinsam weiterarbeiten.

Die Herstellung von Kessel- und Dampfrohren nach dem Ehrhardt-Verfahren.

Von Generaldirektor Paul Thomas, Preß- und Walzwerk A.-G. Reisholz-Düsseldorf.

Eine ergiebige Erörterung über die Herstellung hochbeanspruchter Röhren gerade bei Ihrer heutigen Tagung halte ich für außerordentlich wichtig, nachdem man sich lange Zeit in der Hauptsache mit den Hochdruckkesseltrommeln beschäftigt hat, wie sie nach Patenten der Schmidtschen Heißdampfgesellschaft in geschweißter Ausführung durch die Firma Thyssen & Co. in Mülheim, in nahtlos geschmiedeter Ausführung legiert und unlegiert durch die Firma Krupp in Essen und das Preß- und Walzwerk in Reisholz hergestellt werden.

Aus den Kreisen der Rohrverbraucher heraus sind in letzter Zeit verschiedentlich Zweifel geäußert worden, ob auch das Rohrmaterial den neuzeitlichen hohen Beanspruchungen beim Bau von Hochdruckdampfkesseln gewachsen sei. Den Niederschlag dieser Besorgnisse bezüglich des Rohrmaterials bilden bekanntlich die neuen verschärften Vorschläge für die Abnahme von Siede- und Dampfesselröhren seitens der Vereinigung der Großkesselbesitzer. Manche unerfreuliche Erfahrung mit Röhren aus ungeeignetem Material und von schlechter Verarbeitung mag das Gefühl der Beunruhigung verstärkt und stellenweise zu einer Verallgemeinerung geführt haben, die glücklicherweise unbegründet ist; denn die deutschen Röhrenwerke sind heute durchaus in der Lage, Kessel- und Dampfrohren zu liefern, die bezüg-

lich der Materialbeschaffenheit, Gleichmäßigkeit und Maßgenauigkeit den höchsten Ansprüchen vollauf genügen. Daß alle Besorgnisse wirklich unbegründet sind, wird Ihnen der interessante Vortrag meines Herrn Vorredners über die Herstellung von hochbeanspruchten Rohren nach dem Mannesmann-Verfahren bewiesen haben. Es führen nun bekanntlich viele Wege nach Rom, und ich möchte deshalb die Ausführungen des Herrn Direktor Rosdeck noch durch die Schilderung eines zweiten Weges, des Ehrhardt-Verfahrens, ergänzen, wie es beim Preß- und Walzwerk in Reisholz seit 20 Jahren zur Röhrenfabrikation angewandt wird, und das von dem Herrn Vorredner erwähnte schwedische Walzverfahren auch ganz kurz beschreiben.

Für die Herstellung von Siederohren verwendet Reisholz, sofern nicht härterer oder legierter Stahl vorgeschrieben ist, S.-M.-Flußeisen mit etwa 0,12—0,20% Kohlenstoff, 0,40 bis 0,50% Mangan und möglichst geringem Phosphor- und Schwefelgehalt. Das Rohmaterial für Siederohre wird ausschließlich auf der Werksabteilung „Oberbilker Stahlwerk“ in Düsseldorf in basischen Martinöfen erschmolzen. Es ist außerordentlich wichtig, daß für Siederohre ein schwefel- und phosphorarmes Flußeisen verwandt wird, weil Rohre aus schwefel- und phosphorreicherem Material im Betriebe schnell durch Korrosionen zerstört werden können. Auf diesen Umstand ist in der letzten Zeit in der Fachpresse ja schon verschiedentlich hingewiesen worden. Über einen besonders interessanten Versuch in dieser Richtung wurde vor

kurzem in der englischen Zeitschrift „Engineering“ berichtet. Zwei Rohre, das eine mit starken Schwefelseigerungen, das andere aus reinem Flußeisen, wurden nebeneinander in einen Kessel eingebaut. Nach Jahresfrist war das erste fast gänzlich zerstört, während das andere sich als kaum angegriffen erwies. Die Ursache dieses Rohrschadens waren lediglich Seigerungen, d. h. Anreicherungen von Phosphor und Schwefel. Da nun jedes Flußeisen, gleich ob siliziert oder unsiliziert, beim Erstarren in der Kokille seigert, so ist es schon aus diesem

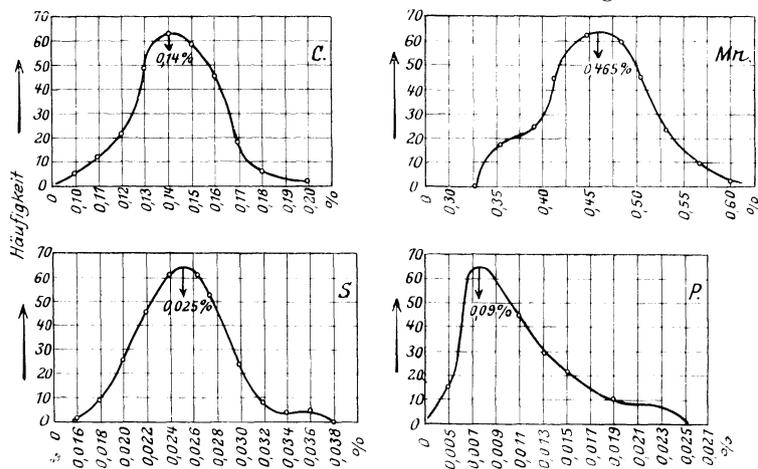


Abb. 1. Häufigkeitskurven von 278 Schmelzungen.

Grunde notwendig, möglichst phosphor- und schwefelreinen Stahl zu verwenden, und zu diesem Zwecke müssen selbstverständlich die Rohmaterialien besonders sorgfältig ausgewählt sein. Es wird daher im Oberbilker Stahlwerk für derartige Schmelzungen nur ganz reiner Schrott eingesetzt, ebenso ein Sonderstahleisen mit einem geringen Schwefel- und hohem Mangengehalt. Als Zuschlag kommt nur erstklassiger schwefelarmer Kalk zur Verwendung. Zur Herstellung des Generatorgases wird möglichst reine, schwefelarme Kohle verbraucht, und es ist geplant, demnächst von den Thyssenwerken in Hamborn dem Oberbilker Stahlwerk gereinigtes Koksofengas zuzuführen. Schon während des Schmelzens wird jede Charge im Ofen mehrmals auf Schwefelgehalt geprüft. Durch besondere Schmelzföhrung, Abziehen der ersten Schlacke und Herstellung einer neuen Schlacke, die geeignet ist, den Schwefel und Phosphor aus dem Stahlbade aufzunehmen, gelingt es dann, ein Material herzustellen, welches tatsächlich sehr schwefel- und phosphorarm ist.

In Abb. 1 zeige ich Ihnen eine Häufigkeitskurve von 278 Schmelzungen, die in letzter Zeit auf dem Oberbilker Stahlwerk für das Röhrenwerk in Reisholz abgegossen sind. Sie können aus ihnen ersehen, daß die überaus größte Zahl der Chargen allen Anforderungen bezüglich der chemischen Zusammensetzung entsprochen hat. Außerdem zeigen die Kurven durch ihr steiles Maximum deutlich an, in welchem Umfange es gelungen ist, das Material in einer gleichmäßigen Beschaffenheit herzustellen. Besonders weise ich darauf hin, daß der Durchschnittsgehalt an S 0,025%, an P 0,009% betragen hat. Die Chargen für hochbeanspruchte Siederohre werden noch besonders ausgewählt, obgleich der mittlere Gehalt an Phosphor und Schwefel an sich schon sehr niedrig liegt, so daß dieses Material durchaus Elektrostahlgüte entspricht. Um sicher zu gehen, werden dem Rohrwerk in Reisholz über alle Schmelzungen, die für Rohre bestimmt sind, Berichte zugesandt, an Hand deren es für hochbeanspruchte Rohre die besten und reinsten Schmelzungen aussucht. Besondere Sorgfalt wird noch aufgewandt, um Materialverwechslungen auszuschließen. Alle Blöcke werden sofort nach dem Abgießen im Stahlwerk mit ihrer Schmelznummer gestempelt, und,

nachdem die chemische Analyse bekannt ist, je nach ihrem Kohlenstoffgehalt, mit besonderen Farben bezeichnet. Dieselbe Farbenbezeichnung und Schmelznummer erhält das im Blockwalzwerk ausgewalzte Material. Außerdem werden von jeder Rohrcharge Proberohre hergestellt, die auf Festigkeit, Dehnung und sonstige Gütevorschriften eingehend untersucht werden. Die Herstellung dieses Spezialröhrenstahls erfordert naturgemäß viel Aufmerksamkeit und ist kostspielig, aber man ist auf diese Weise sicher, daß für solche Rohre nur einwandfreies Material verwendet wird.

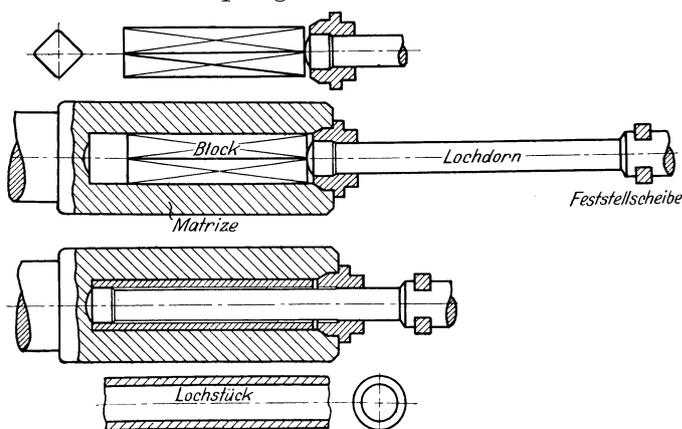


Abb. 2. Schematische Darstellung des horizontalen Lochprozesses.

die Verwendung von siliziertem und unsiliziertem Stahl zur Herstellung von nahtlosen Rohren auf der letzten Hauptversammlung des „Vereins deutscher Eisenhüttenleute“ im November vorigen Jahres hingewiesen.

Ich mache besonders darauf aufmerksam, daß die Amerikaner in ihren hochmodernen Röhrenwerken ausschließlich unsilzierten Stahl verwenden, wie alle deutschen Röhren-

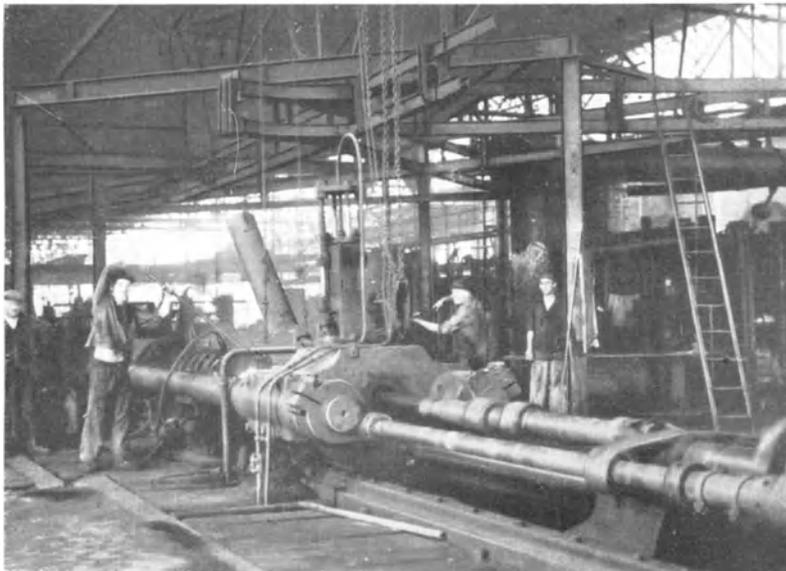


Abb. 3. Horizontale Lochpresse nach dem System Ehrhardt.

fachleute festgestellt haben, welche im Laufe der letzten Jahre im Lande der unbegrenzten Möglichkeiten zu Studienzwecken weilten. Allerdings verwenden auch die Amerikaner nur sehr reines Rohmaterial, d. h. mit geringem Phosphor- und Schwefelgehalt und lochen meist auf Schrägwalzwerken nach dem Mannesmannschen oder Stiefelschen Verfahren.

Die Vierkantknüppel in Längen von 4—8 m werden in den Reisholzer Röhrenwerken zunächst auf die dem Rohrgewicht entsprechende Länge geschnitten. Sie wandern dann langsam durch einen Stoßofen, wo sie allmählich auf eine Temperatur von 1300° C erwärmt

werden. Die Blöcke müssen nun vor allem gleichmäßig erhitzt sein und werden zu dem Zwecke vor dem Herausziehen mehrfach umgewendet. Da es für die Güte des Materials von Wichtigkeit ist, daß die Blöcke nicht zu lange auf Weißglut gehalten werden, ist der Ofen mit einer besonderen Flammenführung versehen. Das Lochen der Blöcke geschieht in Reisholz nur nach dem Ehrhardt-Verfahren, und zwar im Rohrwalzwerk auf horizontalen und in den Rohrwarmziehereien auf vertikalen hydraulischen Pressen.

Abb. 2 zeigt Ihnen die schematische Darstellung der horizontalen Lochpressen im Reisholzer Röhrenwalzwerk.

Auf der Abb. 3 sehen Sie die photographische Aufnahme einer dieser horizontalen Lochpressen nach System Ehrhardt.

Ganz kurz möchte ich Ihnen nun in einer schematischen Darstellung der Abb. 4 die Arbeitsweise des von Herrn Direktor Rosdeck erwähnten schwedischen Rohrwalzwerks neuester Konstruktion und in Abb. 5 die photographische Aufnahme desselben Walzwerks vorführen.

In Amerika wurden bisher in der Mehrzahl derartige sogenannte schwedische Rohrwalzwerke angewandt in Verbindung mit dem Mannesmannschen und Stiefelschen Schräglochverfahren. Dank dem drüben zur Verfügung stehenden reinen Flußeisen können die Amerikaner rund gewalzte Knüppel schon im Schrägwalzwerk auf sehr dünne Wandstärken, etwa die doppelte Stärke des fertigen Rohres lochen, und brauchen hernach im schwedischen Walzwerk nur noch 2—3 Walzstiche zu geben, so daß ganz bedeutende Produktionsmengen erzielt werden. Die so auf dem schwedischen Walzwerk hergestellten Rohre werden auf den meisten deutschen und amerikanischen Röhrenwerken in dem noch rotwarmen Zustande, wie sie die Walzen verlassen, auf ein sogenanntes Glättierwalzwerk gebracht, um außen, und vor allem innen, nachgeglättet zu werden. Durch die Walzstopfen bilden sich nämlich im Innern der Rohre sogenannte Walzriefen, welche immer einen gewissen Mangel des Rohres darstellen, weil sie im Betriebe leicht Veranlassung zu Korrosionen geben, zumal, wenn bei dem nachfolgenden Glätten dieser Riefen sich Falten innerhalb der Rohrwände bilden. In Reisholz hat man durch Verwendung einer allerdings sehr teuren Chrom-Kobalt-

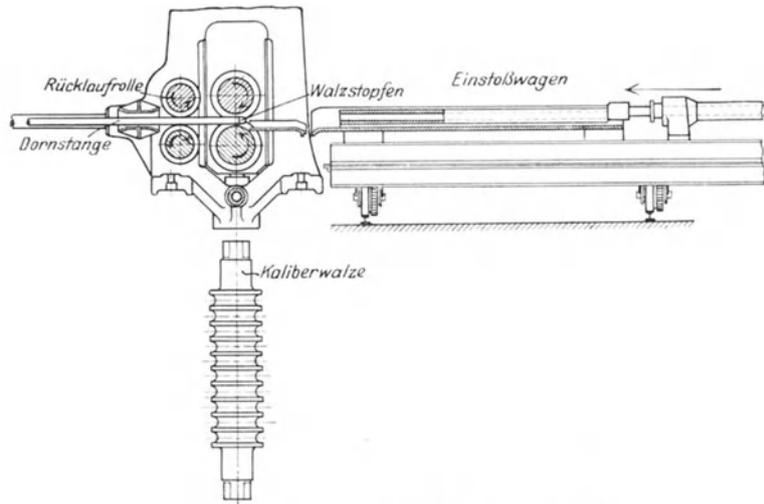


Abb. 4. Schwedisches Röhrenwalzwerk.

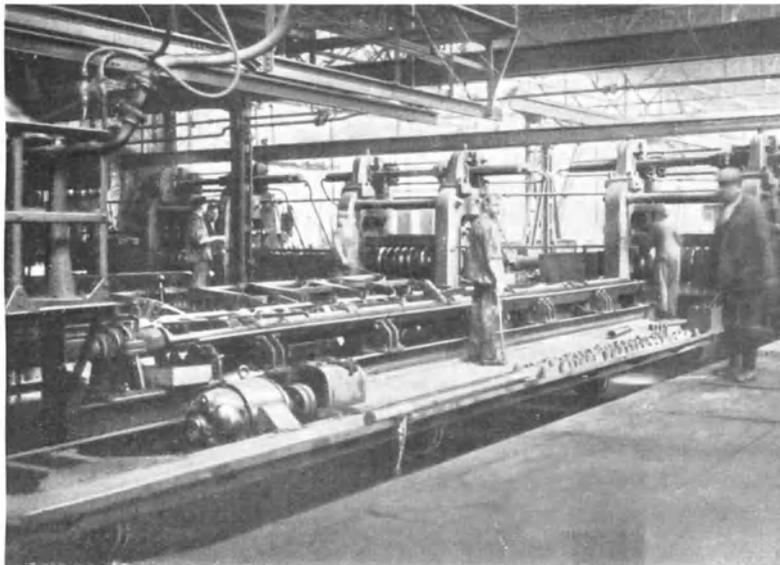


Abb. 5. Schwedisches Röhrenwalzwerk.

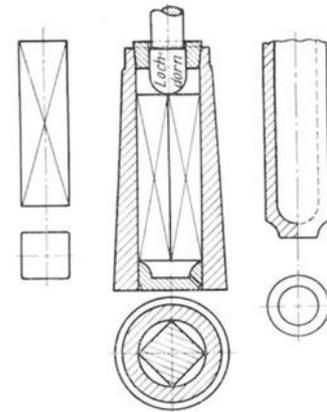


Abb. 6. Vertikaler Lochprozeß.

legierung für die Walzstopfen des Fertigkalibers die Bildung der Walzriefen auf ein Minimum zurückgebracht, so daß beim nachherigen Warmglätten oder Kaltziehen der Rohre eine Faltenbildung ausgeschlossen ist.

Siederöhre, und vor allem hochbeanspruchte Kesselrohre, stellt Reisholz möglichst nur auf Ehrhardtschen Warmziehbanken her mit einem nachfolgenden Kaltzuge. Diese Art der Herstellung von hochbeanspruchten Siederöhren möchte ich Ihnen nun des näheren erläutern, obwohl ich annehme, daß viele von Ihnen das Grundprinzip des Verfahrens schon kennen.

Der auf ca. 1300° C erwärmte Block wird, wie Sie aus der schematischen Darstellung (Abb. 6) ersehen, in eine runde Matrize der vertikalen hydraulischen Lochpresse gelegt. Der Block liegt in der Matrize mit seinen vier Ecken am Umfange schließend an. Bevor der Dorn

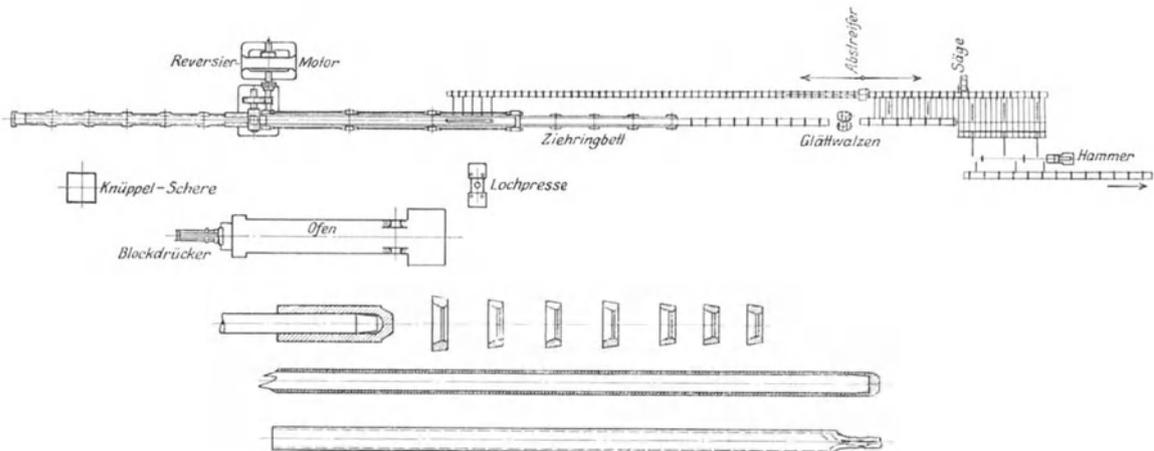


Abb. 7. Zahnstangen-Stößbank nach Ehrhardt.

eingeführt wird, legt man einen Führungsring in die Matrize, der den Dorn zentrisch hält und eine gleichmäßige Wandstärke des Lochstücks garantiert, sofern der Block gleichmäßig durchgewärmt war. Der Querschnitt des Lochdornes entspricht meistens etwa dem Querschnitt der vier Segmente. Ist der Querschnitt des Dornes größer, so steigt der Block in der Matrize, und das Lochstück wird länger. Der Block wird beim Einpressen des Lochdornes nicht vollständig durchgelocht, wie Sie sehen, sondern es verbleibt ihm ein Boden, der bei dem nachfolgenden Warmziehen als Widerhalt dient. Diesem Boden wird besondere Aufmerksamkeit zugewandt. Sollte sich einmal ein Block aus schlechtem, lunkerigem Material einschleichen, so wird der Boden, wenn nicht schon beim Lochen, so doch beim nachfolgenden Ziehen, unbedingt aufreißen. Selbstverständlich scheidet derartige Stücke aus der Weiterverarbeitung für Kesselrohre aus.



Abb. 8. Röhrenlochprozeß nach System Ehrhardt.

Die folgende Abb. 7 stellt schematisch die Anordnung einer modernen Röhrenwarmzieherei nach System Ehrhardt dar. Nach dem Lochen wird das Lochstück auf einen Ziehorn geschoben und dann in einem Gang durch etwa 7—10 Ziehrihne mit abnehmender Bohrung gedrückt. Auf diese Weise kann die Wandstärke bis auf 2¾ mm verringert werden. Die so entstandene Rohrluppe ist außen und innen vollständig glatt und frei von Riefen, innen, weil sie auf dem glatten Stahldorn sitzt, außen, weil Ziehrihne aus einem besonderen Material verfertigt werden, die selbst nach Hunderten von Zügen noch glatt bleiben. Außerdem sind zwei Arbeiter dauernd damit beschäftigt, die Ringe nach jedem Zuge zu reinigen und auf etwaige Fehler zu beobachten. Da solche Ziehriefen einen ungünstigen Einfluß auf die Haltbarkeit der Rohre haben könnten, ist es besser, sie gar nicht erst entstehen zu lassen, obwohl sie im weiteren Verlauf der Verarbeitung leicht zu entfernen sind.

Die auf dem Ziehorn festsitzende Rohrluppe durchläuft nach dem Ziehen ein sogenanntes Abrillwalzwerk, auf dem sie etwas aufgeweitet wird, so daß der Ziehorn sich leicht herausziehen läßt. Letzterer läuft dann zur Warmziehbank zurück. Das offene Ende der noch rotwarmen Luppe wird abgeschnitten und der Boden zu einer Ziehangel angespitzt. — Einen ganz

besonderen Vorzug des Ehrhardtschen Verfahrens erblicke ich darin, daß das Flußeisen sowohl beim Lochen wie beim Ziehen gleichmäßig verdichtet und gestreckt wird, so daß Materialzerreißen gar nicht entstehen können.

Auf der Abb. 8 sehen Sie die photographische Darstellung einer Röhrenlochpresse System Ehrhardt für Röhren bis 6" Durchmesser. Die Abb. 9 zeigt eine Röhrenwarmziehbank für Abmessungen bis 5" Durchmesser.

Die folgenden Abb. 10 und 11 stellen photographische Aufnahmen der beiden Röhrenwarmziehereien von Reisholz dar.

In der einen Abteilung (Abb. 10) werden auf zwei Aggregaten Siederohre von 3—4½" Durchmesser gezogen, bei einer Durchschnittsleistung pro Ziehbank von 1200 Stück bei zehnstündiger Schicht. In der anderen Abteilung (Abb. 11) wird bei Röhren bis 2½" Durchmesser eine Durchschnittsleistung von 1500 Stück pro Ziehbank und zehnstündiger Schicht erreicht, vor dem Kriege waren es höchstens 500 Stück. Verschiedene Herren unter Ihnen haben ja bei Gelegenheit des Besuches im Preß- und Walzwerk Reisholz durch die Vereinigung der Elektrizitätswerke, am 24. Juni d. J., sich überzeugen können, daß auf jeder Ziehbank alle 25—30 Sekunden ein Rohr fällt.

Die Rohriuppen werden im Bedarfsfalle noch auf einem sogenannten Reduzierwalzwerk in weißwarmem Zustande auf einen geringeren Durchmesser heruntergedrückt. Von solchen Reduzierwalzwerken hat das Preß- und Walzwerk in Reisholz vier Aggregate, bestehend aus je 12—18 versetzt hintereinanderliegenden Walzgerüsten mit immer kleiner werdenden Kalibern. Die photographische Ansicht zweier solcher Reduzierwalzwerke sehen Sie auf den Abb. 12 und 13.

Die auf die vorbeschriebene Weise warm gezogenen und teils reduzierten Rohrluppen wandern nun in die Kaltzieherei; dort werden sie zunächst durch Beizen in Schwefelsäure von Zunder befreit und alsdann mittels Kettenbänken auf einer glatten Stahlstange in kaltem Zustande weiter auf Fertigmaß gezogen. Das fest auf der Ziehstange sitzende kalt gezogene Rohr wird, genau wie das warm gezogene, auf einer Rillmaschine etwas aufgeweitet und die Ziehstange alsdann herausgezogen. Der Durchmesser des Ziehrings entspricht dem Durchmesser des Fertighohres. Der Querschnitt des kalt gezogenen Rohres ist mindestens 25% kleiner als der Querschnitt der Rohrluppe.

Auf den folgenden Abb. 14 und 15 zeige ich Ihnen die photographischen Aufnahmen der beiden Kaltziehereihallen von Reisholz.

Nach dem Kaltzuge muß das Rohr ausgeglüht werden, um die Wirkungen der Kaltverformung zu beseitigen. Die Glühöfen werden mit Generatorgas gefeuert und haben ausziehbare Herde. Die Flamme tritt an der Seite ein, streicht zunächst an der Decke des Ofens vorbei und umspült dann die Röhre gleichmäßig von allen Seiten. Eine örtliche Überhitzung ist völlig ausgeschlossen, da minderwertige Brennstoffe benutzt werden. Auf das Glühen der Röhre, vor allem für Hochdruckkessel, muß nun ganz besonderer Wert gelegt und dabei die größte Aufmerksamkeit beobachtet werden. Die Glühtemperatur ist verschieden und richtet sich nach dem Grade der Querschnittsabnahme des Rohres. Infolge des hohen Grades der Kaltverformung von 25% genügt im allgemeinen ein Ausglühen bei 750—800° C. Alle Röhre, die aus irgendwelchen Gründen einen geringeren Kaltzug als 25% erhalten haben, werden bei 920—930° C ausgeglüht, weil gering verformtes Flußeisen durch Glühen bei niedrigerer Temperatur ein grobes Gefüge bekommt.

Die folgende Abb. 16 stellt vier Schliff- und Gefügebildnahmen der verschiedenen Fabrikationsstadien in Längs- und Querschliffen dar:

1. des gewalzten Vierkantblockes,
2. des Lochstücks,
3. des warm gezogenen Rohres,
4. des kalt gezogenen Rohres.

Sie ersehen daraus, daß unsiliziertes Flußeisen in allen Fabrikationsstadien vollkommen dicht und homogen ist.

Die nächsten Abb. 17 und 18 sind Gefügebildnahmen eines Lochstückes und einer Rohrluppe in starker, aber gleicher Vergrößerung. Das noch etwas grobe Gefüge des Lochstückes (Abb. 17) ist durch das kräftige Durchkneten des Materials beim Warmziehen sehr verfeinert worden (Abb. 18).

Auf den folgenden Abb. 19 und 20 sehen Sie in Abb. 19 das Gefüge eines kalt gezogenen Rohres vor dem Glühen. Man erkennt deutlich die starke Streckung der Körner in der Ziehrichtung. Daneben in Abb. 20 sehen Sie in gleicher Vergrößerung das Gefüge desselben Rohres nach dem Glühen bei 760° C; es ist feiner und von einwandfreier Beschaffenheit.

Als ferneres Gefügebild, Abb. 21, möchte ich Ihnen noch die Mikroaufnahme eines schwach kalt gezogenen Rohres vorführen, welches bei 930° C ausgeglüht wurde. Sie sehen, daß die Größe

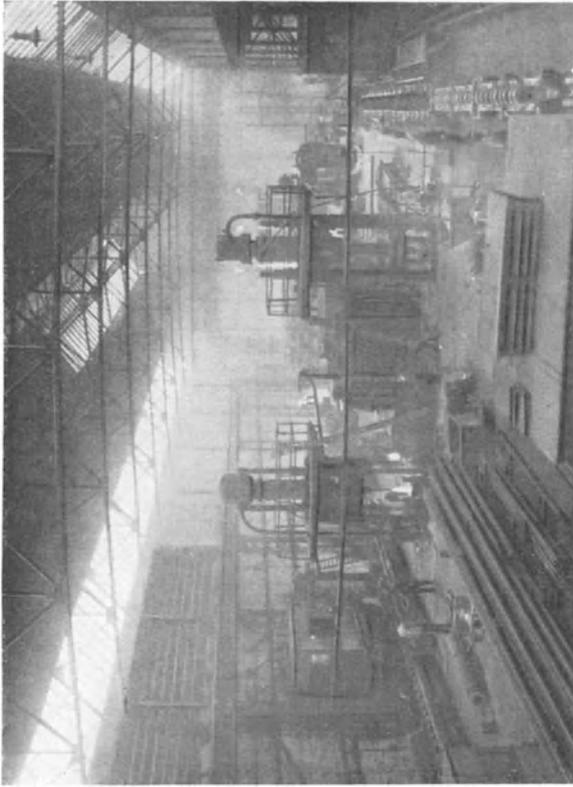


Abb. 10. Röhrenwarmzieherei.

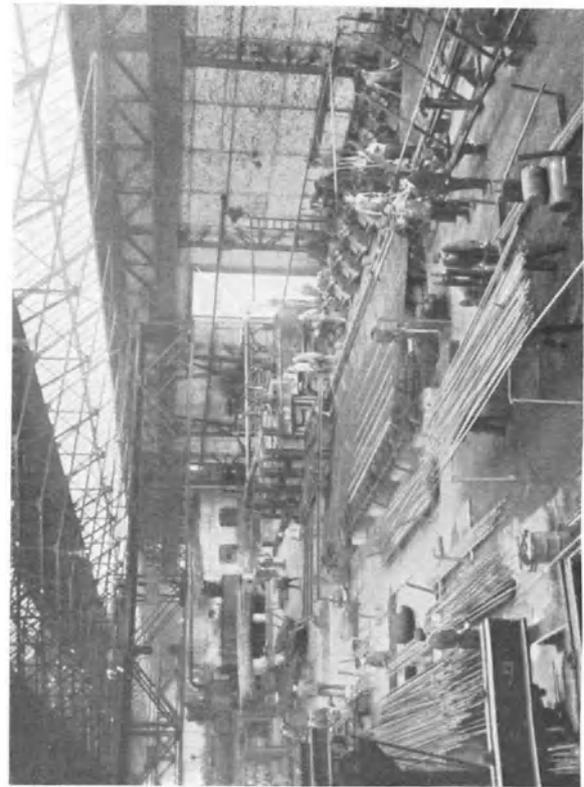


Abb. 12. Reduzierwalzwerk.

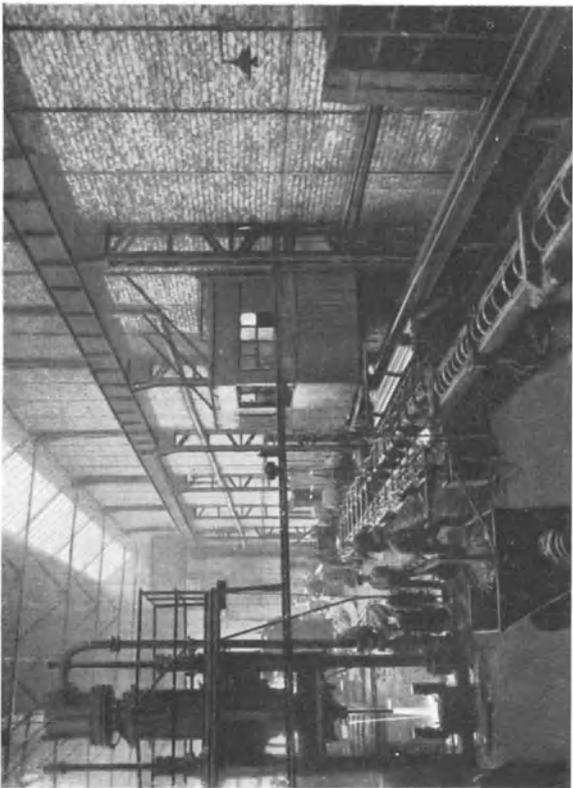


Abb. 9. Röhrenwarmziehbank.

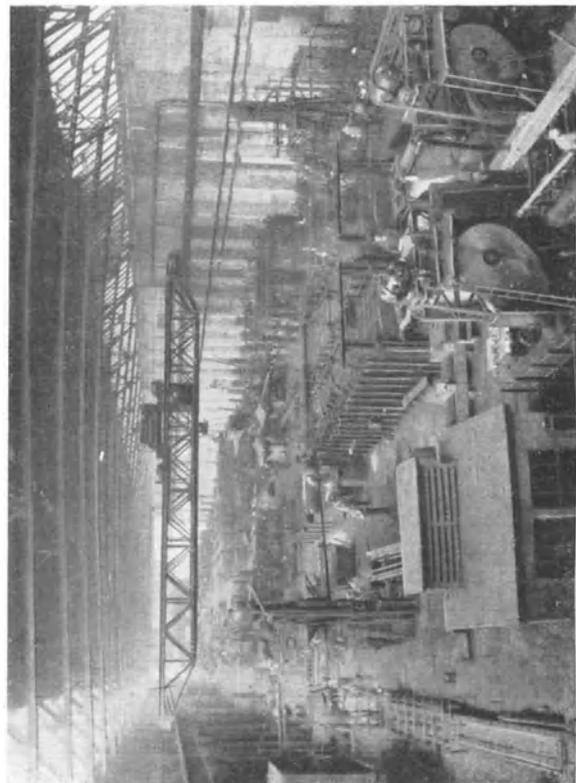


Abb. 11. Röhrenwarmzieherei.

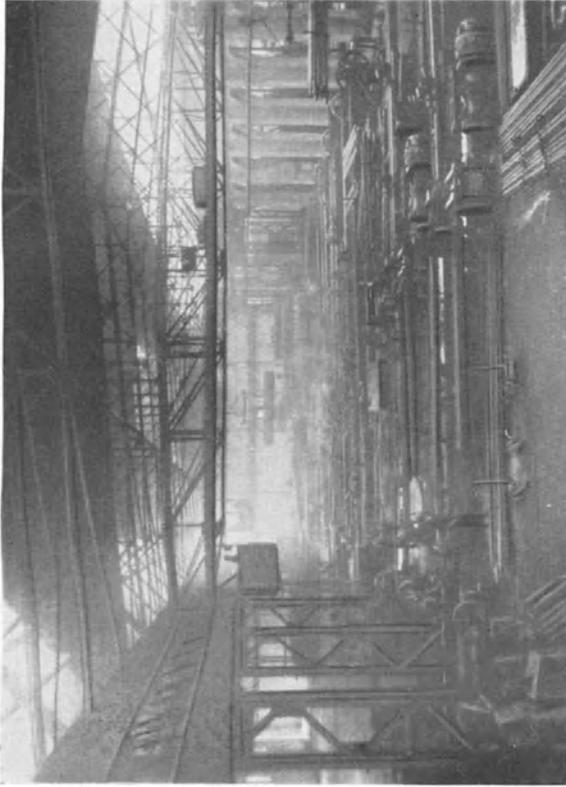


Abb. 14. Kaltzieherei.

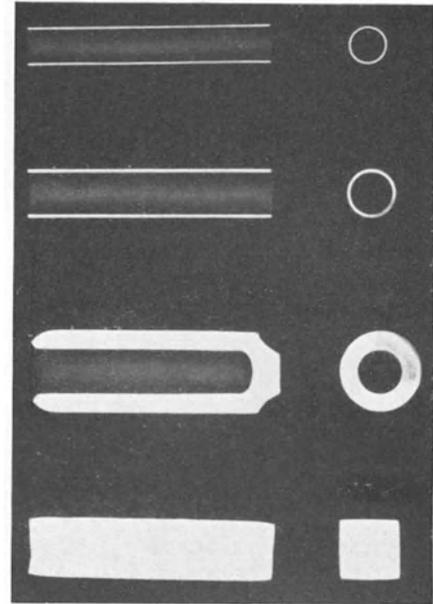


Abb. 16. Schliffe der vier Fabrikationsstadien.

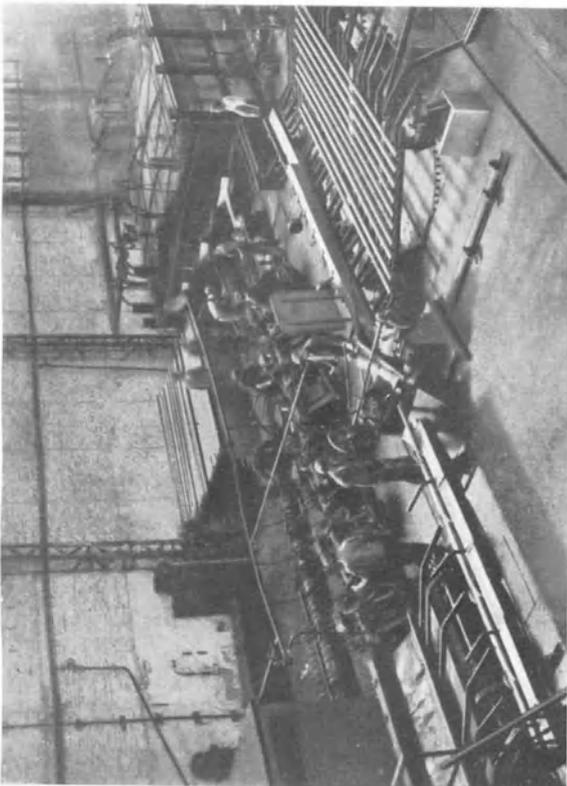


Abb. 13. Reduzierwalzwerk.

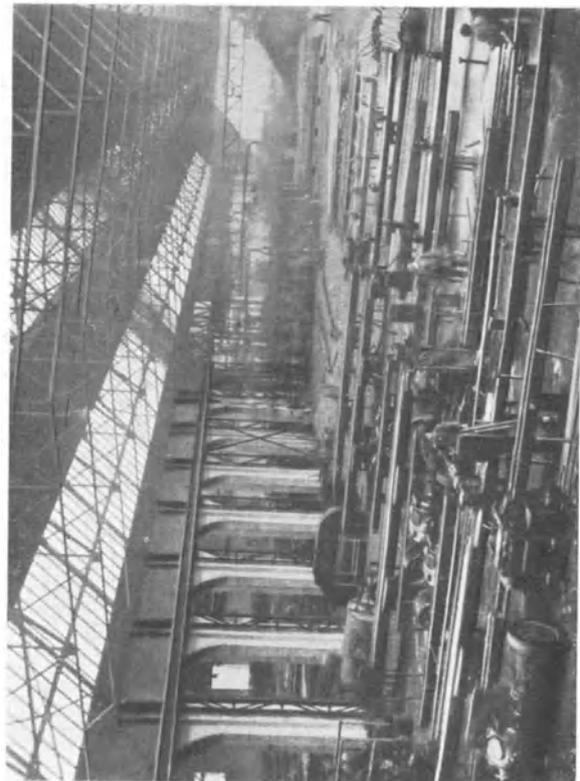


Abb. 15. Kaltzieherei.

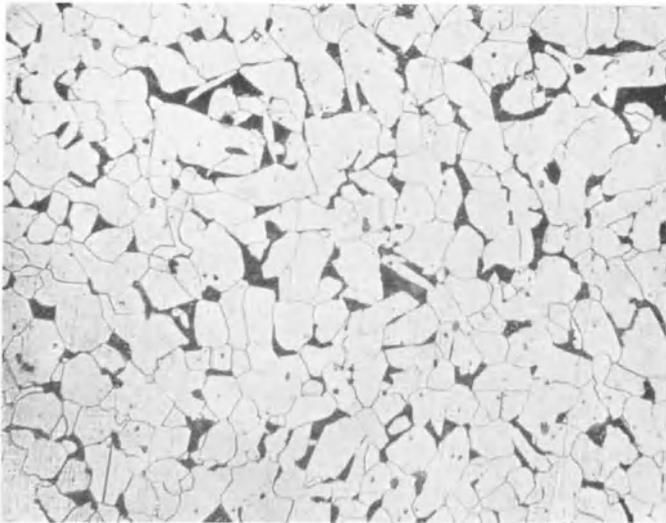


Abb. 17.

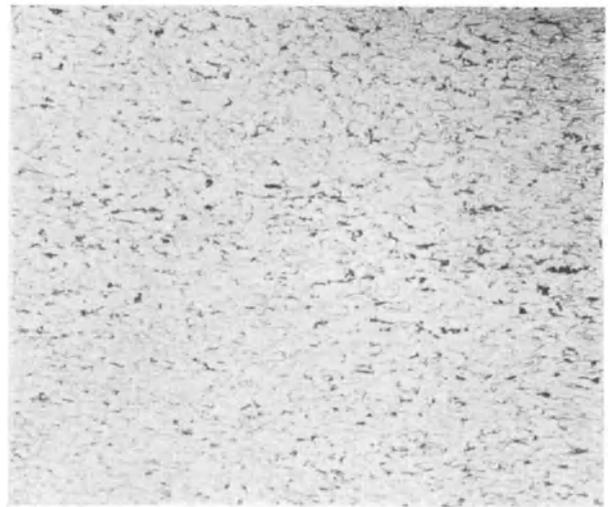


Abb. 19.

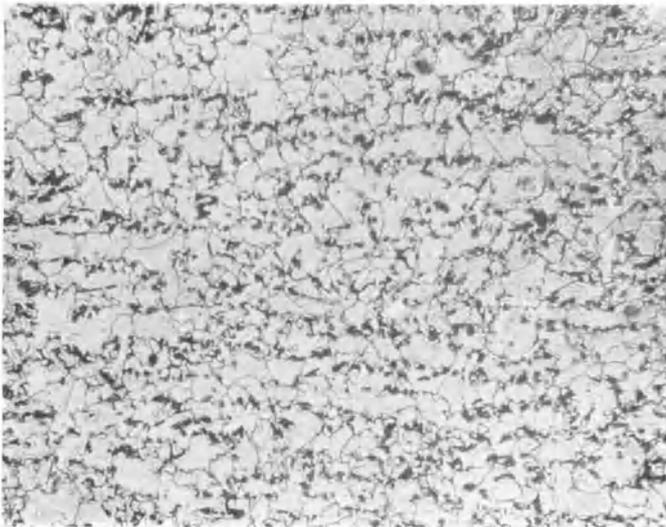


Abb. 18.

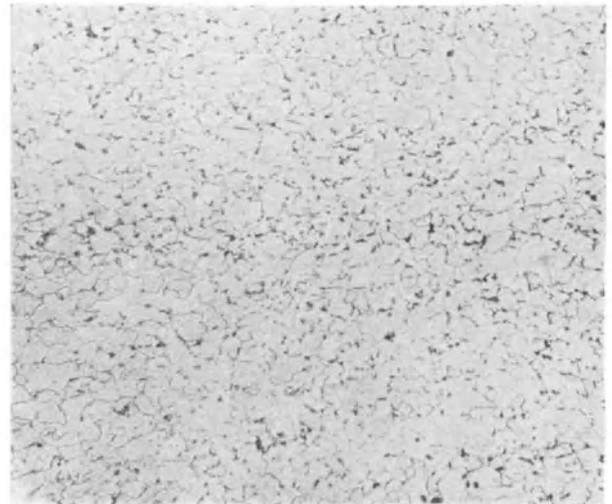


Abb. 20.

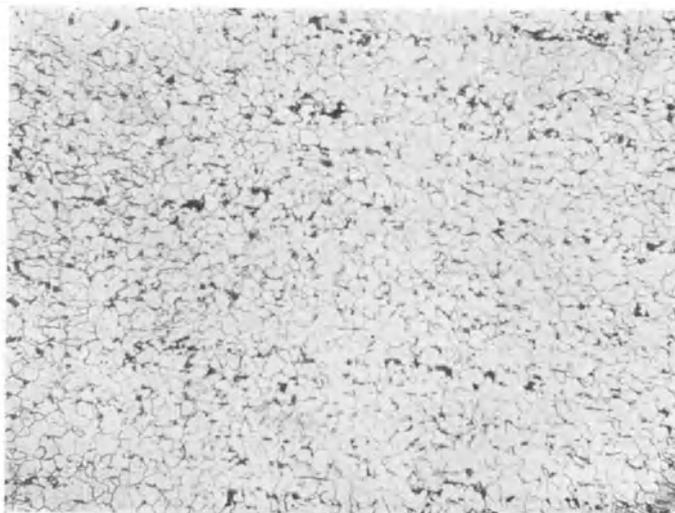


Abb. 21.

der Körner fast die gleiche ist wie bei Abbildung 19 bei 25% Kaltverformung, und 760° C Glühtemperatur.

Nach dem Glühen werden die Rohre von Hand oder auf Richtmaschinen kalt gerichtet, auf Maß abgestochen und der Revision übergeben. Hierbei wird jedes Rohr besonders auf äußere Fehler untersucht, im Innern durchleuchtet, auf Maßhaltigkeit des Durchmessers und der Wandstärke kontrolliert und schließlich auf den dreifachen Betriebsdruck abgepreßt.

Die Abb. 22 und 23 zeigen Ihnen die photographischen Aufnahmen der beiden Reisholzer Rohradjustagen.

Am Schlusse meiner Beschreibung der Herstellung hochbeanspruchter Röhren möchte ich nun noch besonders betonen, daß die nach dem Ehrhardt-Verfahren angefertigten Röhren an den Enden wie in den übrigen Teilen des Rohres durchaus gleichmäßige Wandstärken aufweisen, denn infolge des Warm- und Kaltzuges gibt es keine Stelle, die dünner oder dicker wäre, und die vorgeschriebenen Toleranzen werden aufs strengste eingehalten. Die Rohre haben innen und außen eine tadellos glatte Oberfläche und sind, wie ich Ihnen in den Schliften dargestellt habe, von dichter, homogener Beschaffenheit.

Reisholz hat schon im Jahre 1910 für den ersten Versuchshochdruckkessel der Schmidt-schen Heißdampfgesellschaft in Kassel-Wilhelmshöhe außer dem Hochdruckbehälter auch die Siederohre 28×36 mm

Durchmesser geliefert, welche, laut Mitteilung des Herrn Direktor Hartmann, über 20000 Betriebsstunden, trotz zeitweise mangelhafter Wartung, gut überstanden haben. Nach den Vorschriften der Vereinigung der Großkesselbesitzer vom Jahre 1925 hat Reisholz u. a. für das Großkraftwerk in Rummelsburg bei Berlin Spezialröhren für Hochdruckkessel hergestellt. Irgendwelche Beanstandungen oder Schwierigkeiten bei der Abnahme der Röhren haben sich nicht ergeben. Einige interessante in kaltem Zustande hergestellte Materialproben aus dieser Lieferung von Kesselröhren



Abb. 22. Rohradjustage.

sind auf den folgenden Abb. 24 und 25 dargestellt und in größerer Zahl auf dem Stande des Preß- und Walzwerks auf der großen Düsseldorf Ausstellung „Gesolei“ zu sehen.

In wenigen Worten möchte ich noch auf die Herstellung von Dampfrohren nach dem Ehrhardt-Verfahren eingehen. Das Preß- und Walzwerk hat solche Dampfrohre seit 20 Jahren für die deutsche Marine und andere Zwecke geliefert im Durchmesser von 140—300 mm und mit Wandstärken von 5—10 mm, in Einzellängen von etwa 5—8 m. Diese Rohre werden in gleicher Weise auf entsprechend stärkeren hydraulischen Pressen, wie vorhin geschildert, warm gezogen, bis 250 mm l. W. auch vielfach kalt gezogen. Die größeren Rohre werden außen gedreht und innen gebohrt. Beide Arten von Dampfrohren erhalten auf den Werften aufgenietete Flanschen.

Ein wichtiger Teil beim Hochdruckkessel ist nun auch der Überhitzer und hierbei insbesondere der Überhitzersammelkasten. Das Preß- und Walzwerk stellt nun, wie bekannt sein dürfte, seit mehr denn 20 Jahren nach dem Ehrhardt-Verfahren nahtlos gepreßte und gezogene Vierkantrohre her, welche als Sammelkasten und Schlamm-sammler, oder auch als Sektionskammern, in der gewellten Form beim Babcock-Kessel Verwendung finden. Abb. 26 zeigt eine photographische Aufnahme solcher Vierkantrohre.

Die Herstellung der Vierkantrohre ist im wesentlichen dieselbe wie die vorhin geschilderte Herstellung der kleinen Rohre. Das zunächst aus dem Rohblock gepreßte und gezogene runde Rohr wird am Boden in entsprechender Abmessung angespitzt und auf einem rechteckigen oder quadratischen Dorn fertig gezogen bzw. durch einen Ring entsprechend der äußeren Form des Rohres gedrückt. Durch das Ziehen auf dem glatt bearbeiteten Dorn,

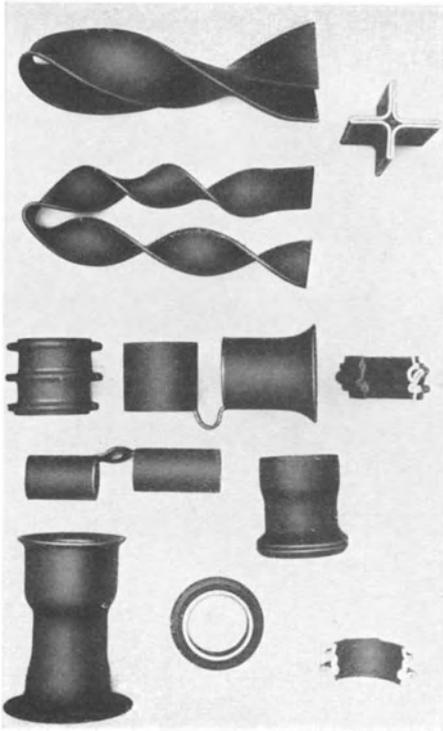


Abb. 24. Güteproben.

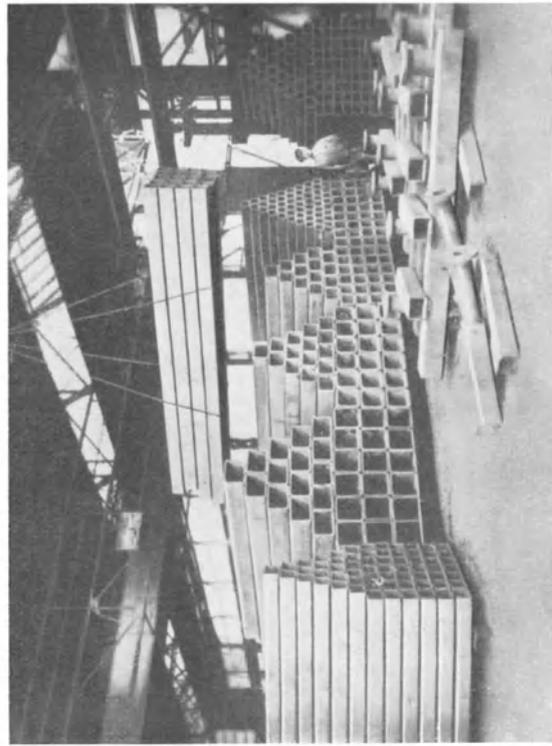


Abb. 26. Vierkantrohre.

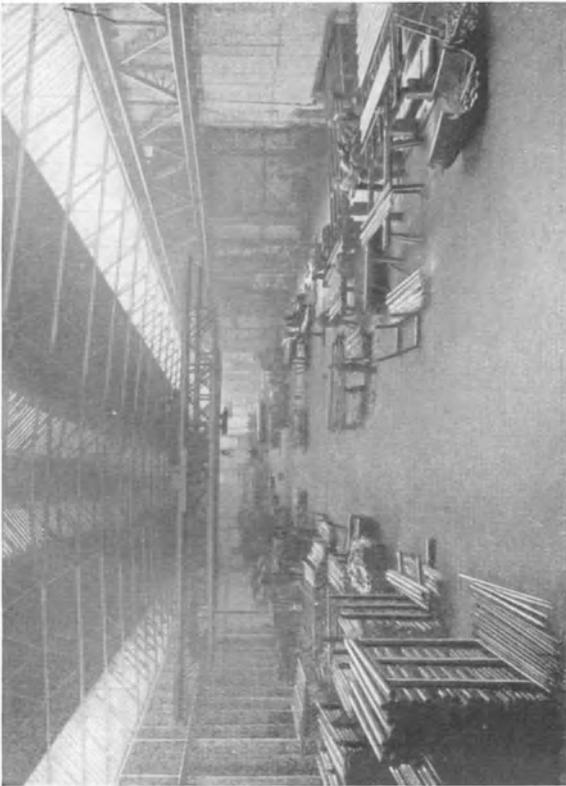


Abb. 23. Rohradjustage.

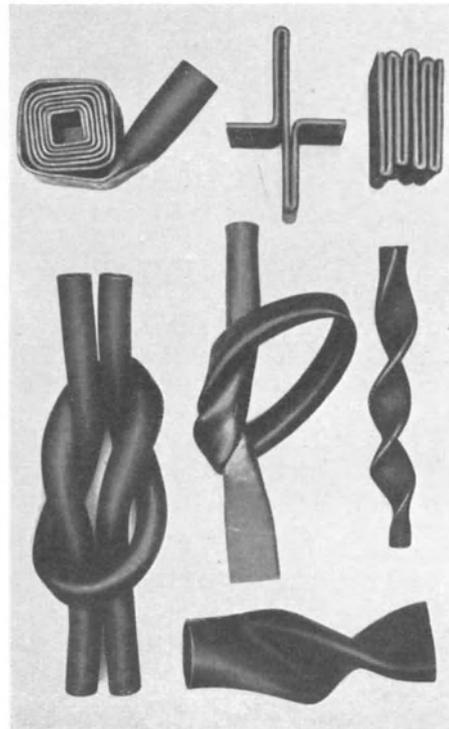


Abb. 25. Güteproben.

der den Innenmaßen des fertigen Vierkantrohres entspricht, wird das Material auch bei der letzten Operation gründlich durchgearbeitet und die Innenfläche sauber, glatt und gerade. Die durch den aus Spezialstahl hergestellten Ziehring entstehenden kleinen Ziehriefen auf den Außenflächen sind ohne Bedeutung und nur Schönheitsfehler.

Wenn nun vor Einführung des Hochdruckkessels die Maximalwandstärke dieser Vierkantrohre kaum über 20 mm hinausging, so sind heute Wandstärken von 40 mm und mehr keine Seltenheit. Gebräuchliche Abmessungen sind:

115 × 140 mm l. W.	}	für gewellte Kammern
140 × 140 „ „ „		
152 × 152 „ „ „	}	für Überhitzerkästen
140 × 190 „ „ „		
200 × 275 „ „ „		

Außergewöhnliche Abmessungen, welche Reisholz hergestellt hat (und wie solche auf der Düsseldorfer Ausstellung zu sehen sind):

235 × 235 mm l. W.	}	bis 40 mm Wandstärke
267 × 267 „ „ „		
315 × 315 „ „ „		
180 × 380 „ „ „		

In letzter Zeit sind nun Bedenken erhoben worden, daß der viereckige oder rechteckige Sammelkasten bei den hohen Drücken und Temperaturen nicht genügend Sicherheit gegen Durchbiegung der Wände aufweise. Durch die inzwischen erfolgten eingehenden Untersuchungen seitens der Überwachungsvereine oder der Werke selbst, vor allem aber durch eingehende Versuche des Kaiser-Wilhelm-Instituts in Düsseldorf, sind diese Bedenken zerstreut worden. Die durch Herrn Dr.-Ing. Siebel vom Kaiser-Wilhelm-Institut vorgenommenen Versuche, wobei solche Kammern auf 135 und 182 at abgedrückt wurden, ohne größere Deformationen zu hinterlassen, sind veröffentlicht worden in den „Zwanglosen Mitteilungen der Vereinigung der deutschen Dampfkessel- und Apparate-Industrie“ vom 15. Juni 1926. Es wird dem quadratischen oder rechteckigen Kasten, wo eben zugänglich, wohl immer der Vorzug gegeben werden, in der Hauptsache des besseren und bequemeren Einwalzens der Rohre wegen. Herr Diplomingenieur Raoul Fischer brachte im Mai d. J. in den „Hannomag-Nachrichten“ eine Berechnung für Überhitzerkästen und Sektionskammern, die meines Erachtens nicht ganz zutrifft. — Die Enden der vierkantigen Überhitzerkästen, Schlamm-sammler usw. wurden bisher durch flache Scheiben geschlossen, welche man im Koksfeuer autogen oder elektrisch einschweißte, was bei den bisher im Kesselbau gebräuchlichen Dampfdrücken vollauf genügte. Für Hochdruckkessel bestimmte Vierkantrohre werden dagegen an beiden Enden zugeküpelt und die hierbei verbleibenden kleinen Öffnungen in der Mitte des Bodens durch einen eingeschraubten und verschweißten Gewindestopfen zuverlässig geschlossen. Auf Wunsch kann auch ein Bodenende eingepreßt und nur das andere Ende zugeküpelt werden, was sich jedoch erheblich teurer stellt.

Ich hoffe nun, meine verehrten Herren, daß meine Ausführungen Sie überzeugt haben werden, daß zu Beunruhigungen im Kreise der Kesselfabrikanten und Kesselbesitzer wirklich keine Veranlassung vorliegt. Seien Sie überzeugt, weiter steigende, ja selbst die höchsten technischen Anforderungen werden die deutschen Röhrenwerke auch auf ihrem Platze finden.

Herstellung von Kessel- und Dampfrohren nach dem Stiefel-Verfahren und die Abhängigkeit der für Hochdruckkessel bestimmten Werkstoffe von der chemischen Zusammensetzung.

Erörterungsbeitrag nach Versuchen aus der Versuchsanstalt der „Vereinigte Stahlwerke A.-G. Röhrenwerke, Düsseldorf“ von Dipl.-Ing. G. Tiehy,

In den vorstehenden beiden Vorträgen der Herren Direktor Rosdeck und Generaldirektor Thomas nehmen wir von der Verwendung silizierten Werkstoffes einerseits und nichtsilizierten Werkstoffes andererseits Kenntnis. Im nachstehenden soll nun nicht zugunsten einer der beiden Materialsorten Partei ergriffen werden, denn die Entscheidung für den richtigen Werkstoff muß dem jeweilig gegebenen Fall vorbehalten bleiben; es soll vielmehr der Vereinigung der Großkesselbesitzer aus den vor etwa zwei Jahren bei den Vereinigten Stahlwerken, Röhrenwerke in Düsseldorf unternommenen Versuchen bei höheren Temperaturen an Kesselrohrmaterial kurz berichtet und so zu einer Klärung der immerhin strittigen Frage beigetragen werden.

Es soll nicht unterlassen werden, bei dieser Gelegenheit auf die Tatsache hinzuweisen, daß die Vereinigten Stahlwerke, die über die Hälfte der deutschen Röhrenfabrikation in sich

vereinigen, in der Lage sind, nach allen bekannten Verfahren Kesselrohre herzustellen. Aus den in dem nachstehenden noch näher zu erörternden Gründen haben wir uns für die Herstellung der qualitativ besonders hoch stehenden Kesselrohre für das Walzen nach dem Stiefel-Verfahren entschieden. Das Stiefel-Verfahren kennt zwei Arten und zwar:

1. Das Scheibenwalzwerk, welches vorzüglich für kleinere Abmessungen verwendet wird und in Abb. 1 im Prinzip wiedergegeben ist.

Zwischen zwei dem Sinne nach gleichlaufenden Scheiben von gleicher Umdrehungsgeschwindigkeit wird der vorgewärmte Block über einen Dorn gewalzt.

2. Das Tonnenwalzwerk, welches zwei fliegend gelagerte in einem Winkel von 60° stehende Kopfwalzen hat (Abb. 2).

Im Grundprinzip entsprechen diese beiden Stiefel-Verfahren völlig dem oben von Herrn

Direktor Rosdeck beschriebenen Mannesmann-Verfahren. Walztechnisch sind aber Unterschiede festzustellen, deren größter darin besteht, daß man beim Stiefel-Verfahren bereits auf eine erheblich geringere Wandstärke vorlocht. Die Abb. 3 und 4 der nachstehenden Bildtafel geben einen Vergleich über die Verhältnisse zwischen Block, Hohlblock, vorgewalztem und fertigem Rohr beim Mannesmann- bzw. Stiefel-Verfahren eines gleich dimensionierten Endproduktes.

Die starke Querschnittsverminderung bei den beiden Stiefel-Verfahren im Verein mit den höchsten Anforderungen an das fertige Rohr bedingen, daß ausschließlich vorgewalzte Rundstangen zur Verwendung gelangen. Diese Rundstangen stammen bei uns entweder aus harmetierten Stahlblöcken oder aus der mittleren Hälfte schwerer, bis zu 2400 kg wiegender Blöcke. Diese Blöcke werden in einer Blockstraße vorgeblockt und in einer Stabstraße auf entsprechende Abmessung fertiggewalzt, scharf kontrolliert und verputzt. Die Kopf- und Fußstücke scheiden also bei nichtharmetiertem Stahl für die Kesselrohrfabrikation vollkommen aus. Gleichzeitig gelangt dadurch ein im weitestgehenden Maße verschmiedeter Werkstoff zur Anwendung. Diese

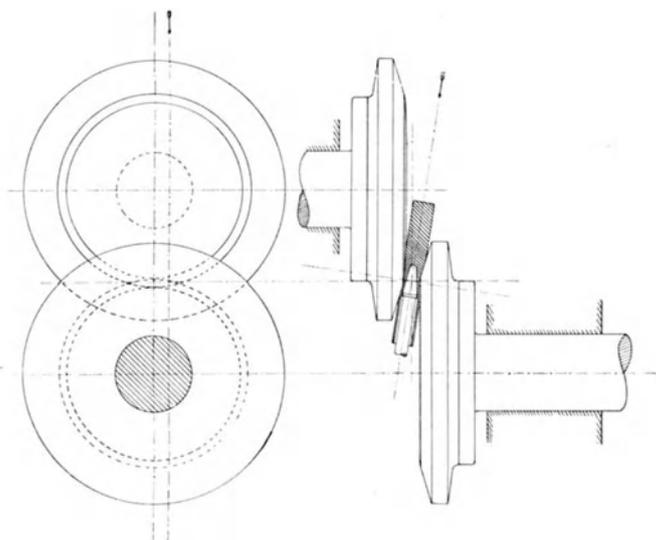


Abb. 1. Scheibenwalzwerk nach Stiefel.

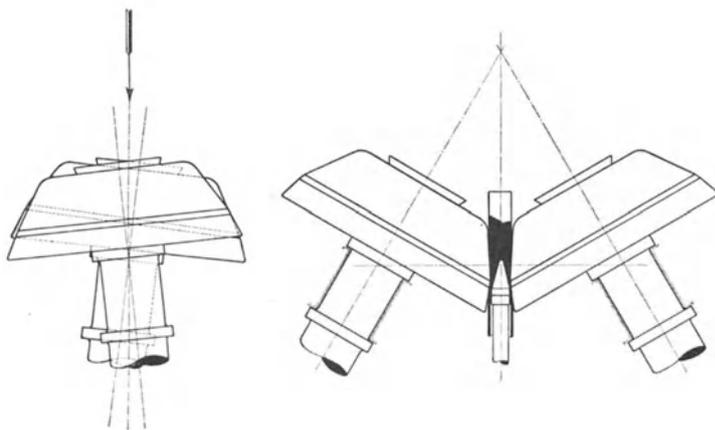


Abb. 2. Kegel- oder Tonnenwalzwerk nach Stiefel.

Tatsache ist insofern von grundlegender Bedeutung, als durch die große Querschnittsverminderung vom Rohblock zum Rundstab alle eventuell noch vorhandenen Blasen verschweißt und auf ein Minimum verkleinert werden. Beim Harmetstahl geschieht dieses Verschweißen der Blasen bereits im Stahlwerk unter der Presse.

Wie die Querschnitte der Rundstäbe aus nichtharmetiertem bzw. harmetiertem, siliziiertem und ebenso unsiliziertem Material aussehen, zeigen die Abb. 5—8.

Die Seigerungselemente Phosphor, Schwefel und Kohlenstoff sind bei nichtsiliziertem Stahl im Kern des Querschnittes in der sogenannten Blockseigerung angereichert, während die Randzone praktisch rein ist. Beim silizierten Stahl sind diese Seigerungselemente über dem ganzen Querschnitt gleichmäßig verteilt. Durch das Harmetieren wird neben dem Verschweißen aller Hohlräume und Gasblasen auch noch eine Verbesserung der innersten Kernzone erreicht, welche sich in der Abbildung durch hellere Tönung kennzeichnet.

Während man beim Walzen größerer Rohre auf einen Gußblock und demgemäß auf den

gleichmäßigeren silizierten Stahl angewiesen ist, bei dem man, um höchsten Anforderungen zu genügen, die Außenzone zur Entfernung von kleinen Randblasen und Randblasenseigerungen abdreht, die Kernzone unter Umständen außerdem noch ausbohrt, ist ein solches Verfahren bei dem vorgewalzten Vorprodukt, wie vorhin beschrieben, nicht notwendig. Nicht unerwähnt möge auch die Tatsache sein, daß das Blockmaterial von der Gießgrube des Stahlwerkes bis in das Rohrwalzwerk hinein auch einer ständigen Temperaturkontrolle unterliegt.

Die Abb. 9 zeigt den Längsschnitt eines Lochstückes unseres Kegelwalzwerkes. Ein Brechen des Materials und die damit verbundenen Innenfehler werden bei beiden Stiefel-Verfahren vermieden.

Die vorgelochten Stangen haben beim Walzen normal dimensionierter Rohre nur noch eine Wandstärke von 7—8 mm und werden in einem sogenannten Automatikwalzwerk in zwei bis drei Stichen über entsprechende Walzdorne in einem Rundkaliber auf das entsprechende Maß fertig gewalzt. Das sogenannte Automatikwalzwerk ist dem aus dem vorhergehenden Vortrag bekannten Schwedengerüst ähnlich und unterscheidet sich von demselben

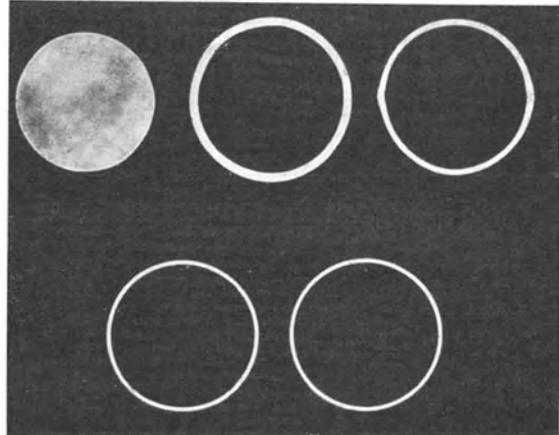


Abb. 3. Querschnittsverhältnisse zwischen Block, Hohlblock, 1. und 2. Stich der Automatikwalze und fertig geglättetem Rohr beim Stiefel-Walzwerk.

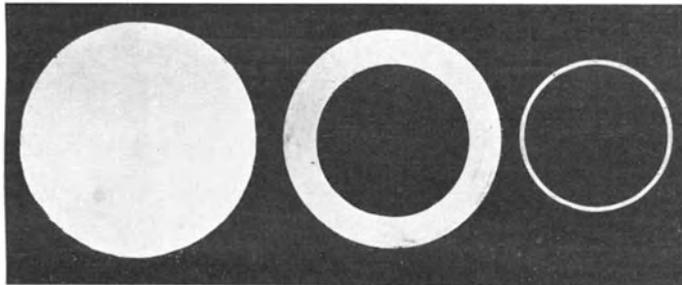


Abb. 4. Querschnittsverhältnisse zwischen Block, Hohlblock und gepilgertem Rohr beim Mannesmann-Pilgerschritt-Verfahren.



Abb. 5. Baumann-Abdruck von einem silizierten Rundstab.



Abb. 6. Baumann-Abdruck von einem silizierten und harmetierten Rundstab.

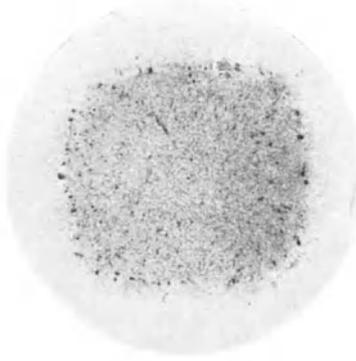


Abb. 7. Baumann-Abdruck von einem unsilizierten Rundstab.

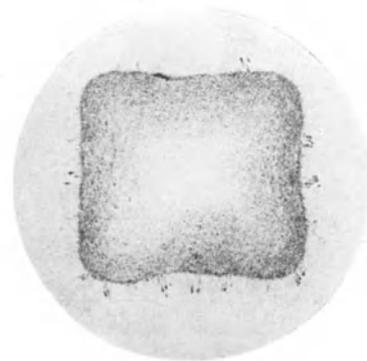


Abb. 8. Baumann-Abdruck von einem unsilizierten und harmetierten Rundstab.

nur darin, daß das Herunterwalzen vom Hohlblock auf das fertige Rohr nur in einem Kaliber durch Auswechseln entsprechend größer werdender Dorne vor sich geht. Vor Jahren hat man für diese Dorne Gußeisen verwendet. Diese Dorne setzten leicht Material an, so daß sie durchschnittlich nur bis zu 30 Stichen Verwendung finden konnten. Systematische Unter-

suchungen haben uns zu einer bestimmten Speziallegierung geführt, die nicht mehr Material ansetzt bzw. -klebt. Unsere Dorne halten heute durchschnittlich 2000 Stiche aus. Die gefürchtete Riefenbildung ist damit beseitigt worden.

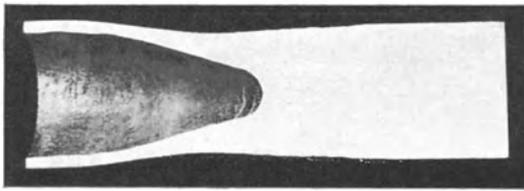


Abb. 9. Längsschnitt durch ein Lochstück eines Stiefelwalzwerks.

Von dem Automatikwalzwerk gelangen die Rohre durch ein Glättwalzwerk und eine Maßwalze auf das Kühlbett. Der ganze Walzvorgang nimmt etwa 1¼ Minute in Anspruch, so daß die Rohre in den Temperaturen des oberen Umwandlungspunktes auf das Kühlbett gelangen.

Die Anwendung hoher Dampfdrucke hat in neuerer Zeit die Aufmerksamkeit auf die Festigkeit bei höheren Temperaturen gelenkt. Unsere

Versuchsanstalt in Düsseldorf hat sich ganz besonders mit den Warmfestigkeiten unseres Rohrwerkstoffes befaßt. Die Abb. 10 zeigt Mittelwerte der Streckgrenze bei 400° in Abhängigkeit von der Analyse.

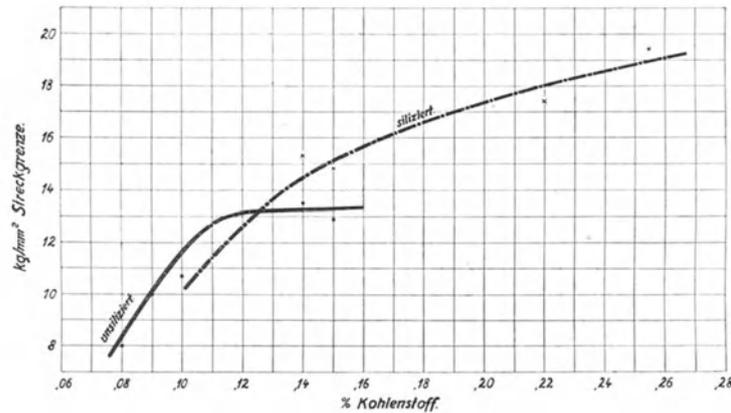


Abb. 10. Die Streckgrenze bei 400° in Abhängigkeit von der Temperatur.

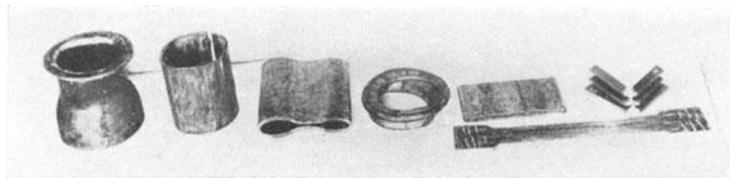


Abb. 11. Technologische Rohrproben bei nicht siliziertem Material.

Interessant ist der Umstand, daß bei unseren Materialien bei geringem Kohlenstoffgehalt unter 0,12% der unsilizierte dem silizierten Werkstoff überlegen ist, hingegen bringt eine Steigerung des Kohlenstoffgehaltes bei unsiliziertem Werkstoff keine nennenswerte Steigerung der Streckgrenze mit sich; bei höheren Festigkeiten muß man also auf silizierten Werkstoff zurückgreifen. Insbesondere dann, wenn eine Bruchfestigkeit von etwa 45 kg gefordert wird, was einem Kohlenstoffgehalt von etwa 0,2% entspricht.

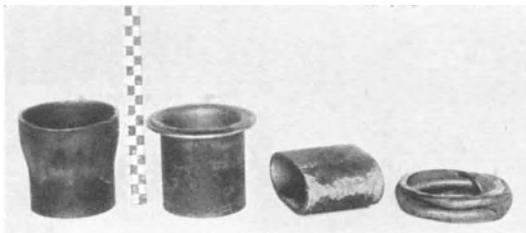


Abb. 12. Technologische Rohrproben bei 3proz. Ni-Stahl.

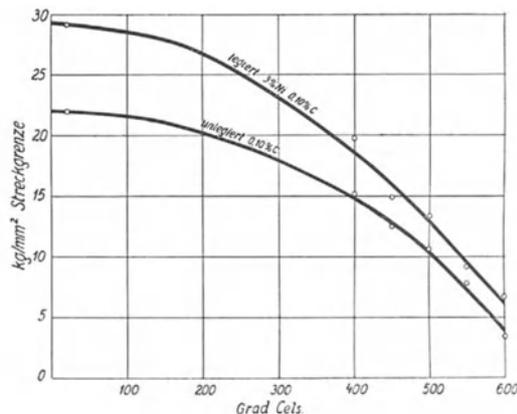


Abb. 13. Die Streckgrenze von legiertem und nicht legiertem Stahl gleichen C-Gehalts.

Aus den vorhergehenden Vorträgen und aus der Besprechung derselben muß man den technologischen Proben bei Rohren, wie sie eine Zusammenstellung derselben die Abb. 11 zeigt, besondere Bedeutung beimessen. Als die wichtigsten Proben wurden die Aufdornprobe und die Abschreckbiegeprobe bezeichnet.

Wir haben die Erfahrung gemacht, daß sich der nichtsilizierte Werkstoff bei diesen Proben günstiger als der silizierte verhält. In bezug auf die Abschreckbiegeprobe versagt der bekannte 3 proz. Nickelstahl, wie Abb. 12 zeigt, vollkommen. Das völlige Zusammenschlagen der Härtebiegeprobe ist ohne Aufreißen beim 3 proz. Nickelstahl nicht möglich. Zweifellos liegt die Streckgrenze beim Nickelstahl höher als die des unlegierten und unsilizierten Stahles. Hierüber gibt die Abb. 13 Auskunft, in der die Streckgrenze bei Zimmertemperatur und bei 400—600° einmal von einem 3 proz. Nickelstahl mit 0,1% Kohle und das andere Mal mit einem unsilizierten weichen Stahl von gleichem Kohlenstoffgehalt aufgestellt wurde.

Die vorstehenden Darlegungen zeigen die Unterschiede zwischen siliziertem, nichtsiliziertem und mit Nickel legiertem Werkstoff. Da keine dieser drei Materialsorten alle gewünschten Vorzüge vereinigt, wird man sich von Fall zu Fall für eine derselben entschließen müssen, je nachdem, ob man auf eine hohe Streckgrenze oder ob man auf besonders hohe Zähigkeit des Werkstoffes Wert legt.

II. Prüfung der Kesselbaustoffe.

Erfahrungen mit der Kerbschlagprobe bei der Abnahme von Kesselblechen und Kesseltrommeln.

Von Dipl. Ing. E. Helfrich, vom Rheinischen Dampfkesselüberwachungsverein, Düsseldorf.

Im folgenden soll berichtet werden, welche Beobachtungen beim Rheinischen Dampfkesselüberwachungsverein gelegentlich der Abnahmeprüfung von Kesselmaterial unter Anwendung der Kerbschlagprobe gemacht worden sind, und welche Schlüsse man daraus ziehen kann.

Bekanntlich wurden im Jahre 1921 von der Vereinigung der Großkesselbesitzer die Materialvorschriften für Landdampfkessel in der Absicht weiter ausgebaut, die Betriebssicherheit ihrer Hochleistungskessel durch eine peinliche Auswahl des zur Verwendung kommenden Baustoffes auf eine möglichst hohe Stufe zu bringen. Bei dieser Erweiterung der Materialvorschriften wurde auch die Kerbschlagprobe zur Blechprüfung mit herangezogen. Mit Rücksicht auf die Bedeutung guten Glühzustandes des Materials für Vorhandensein wichtiger mechanischer Eigenschaften soll ja die Kerbschlagprobe die Möglichkeit bieten, diesen guten Glühzustand bei der Materialprüfung nachzuweisen. Inwieweit sie in der Lage ist, diese Aufgabe zu erfüllen, darüber hat bereits Herr Prof. Baumann auf der Godesberger Tagung des Deutschen Landdampfkesselausschusses 1925 ausgeführt, daß die Kerbschlagprobe zurzeit die einzige Probe sei, die Aufschluß über den Glühzustand der Bleche gäbe; ferner sagt Dr. Moser in der Niederschrift von 1926 eines Lehrganges für den Dampfkesselüberwachungsingenieur auf der Kruppschen Gußstahlfabrik:

„Gültig bleibt für den Praktiker, daß die Kerbschlagprobe ihm Aufschluß darüber gibt, ob der Werkstoff in der geeignetsten Wärmebehandlung, d. h. im Gefügestand größter Zähigkeit vorliegt oder nicht.“

Der Ausschuß für das Studium der Kerbschlagprobe des Deutschen Verbandes für die Materialprüfung der Technik, dessen Obmann Prof. Striebeck ist, stellt in seinen Mitteilungen vom Mai 1925 folgendes fest:

„In den nachstehenden Leitsätzen sind die neueren Forschungsergebnisse berücksichtigt. Sie beseitigen die berechtigten Bedenken, die gegen die Kerbschlagversuche als Abnahmeprüfung erhoben wurden und machen sie zu einer wertvollen Zähigkeitsprobe bei der Abnahme von Werkstoffen.“

Diese jüngeren Urteile über die Kerbschlagprobe sollen deshalb wiedergegeben sein, da sich gegen ihre Anwendung nicht geringe Widerstände gezeigt haben und teilweise noch zeigen. Die sachlichen Gründe dafür stützen sich auf Erscheinungen, die Widersprüche bei Deutung der Versuchsergebnisse im Gefolge haben können. Solche Widersprüche haben sich nun auch anfänglich bei unseren Abnahmeprüfungen gezeigt. Unmittelbar nebeneinander liegende Proben des gleichen Bleches ergaben weit auseinander liegende Kerbzähigkeitswerte, ohne daß sich hierfür zunächst ein Grund finden ließ. Ein Bodenblech z. B. von 28 mm Dicke wies am Kopfende eine Kerbzähigkeit von 6,3 mkg/qcm, die weitere Probe 12,9 und eine dritte 8,7 mkg/qcm auf. Ein 26 mm-Mantelblech ergab Kerbzähigkeitswerte von 5,6 und 7,4 mkg/qcm und nach erneuter Glühbehandlung 9,0 und 16,0 mkg/qcm. Derartige Ergebnisse waren nicht selten und geeignet, durch ihren offenbaren inneren Widerspruch die Zuverlässigkeit und damit die Zweckmäßigkeit und den Wert der Kerbschlagprüfung überhaupt in einem zweifelhaften Licht erscheinen zu lassen.

Die inzwischen veröffentlichten Ergebnisse von Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet haben aber Klärung insoweit gebracht, als sie zeigten, daß das Streuen der Versuchswerte in den Versuchsbedingungen begründet liegt, gegen deren Schwankungen besonders hinsichtlich Probenbreite und Versuchstemperatur sich die Kerbschlagprobe als sehr empfindlich erwies.

Die sogenannte Normalprobe, wie sie bezüglich des Schlagwerkes und der Probeabmessungen von dem Verband für die Materialprüfung der Technik genormt wurde, ist die Charpyprobe von 30×30 mm Probenquerschnitt, 30×15 mm Schlagquerschnitt, 4 mm Rundkerb und 2 mm Schlitzbreite. Abgesehen von der Probenbreite, die ja durch die jeweilige Blechdicke gegeben war, kam diese Probe für das 75 mkg-Pendelschlagwerk auch bei der

Abnahme unserer Kesselbleche zur Anwendung. Sie wurde dem Blech so entnommen, daß die Bohrung des Rundkerbes senkrecht zur Blechoberfläche liegt, die Blechdicke also als Probenbreite erscheint und damit dem Probestück auf beiden Seiten die Walzhaut verblieb. Die Schwierigkeiten, die bei einer so entnommenen Probe bei dickeren Blechen durch das erwähnte Streuen der Versuchsergebnisse entstanden, machten schon sehr bald eine Änderung der Versuchsbedingungen nötig. Es wurde die Eigentümlichkeit der Kerbschlagprobe erkannt, über eine gewisse Probenbreite hinaus keine eindeutigen Ergebnisse mehr zu zeigen. Bei großer Breite liegen die Werte in einer Tieflage, bei geringerer in einer Hochlage der Zähigkeitswerte, während im Grenzgebiet beide auftreten, wodurch eben das Streuen verursacht wird.

Die Versuchsbedingungen wurden dann dahin abgeändert, daß bei Blechen über 25 mm Dicke die Probestreifen halbiert wurden, so daß die halbe Blechdicke als Probenbreite erscheint und die Probe nur einseitig die Walzhaut aufweist. Wie weit nun die danach in der Abnahmepraxis sich deutlich bemerkbar machende Verringerung der Schwierigkeiten auf Konto dieser Änderung oder wie weit sie auf Konto der immer mehr erfolgenden Einstellung der Walzwerke auf die Kerbschlagprobe zu schreiben ist, läßt sich nicht trennen. Immerhin waren in dem Überblick über die Abnahmetätigkeit am Ende des Jahres 1924 die Kerbschlagprobe mit 6,0%, im April 1926 nur noch mit 2,3% an dem Ausfall beteiligt, nachdem allerdings inzwischen auch noch einige andere Änderungen notwendig geworden waren. Diese bestanden in der Berücksichtigung der Versuchstemperatur und in einer noch weiteren Herabsetzung der Probenbreite.

Bei einer vergleichenden Durchsicht der verschiedenen Ausgaben der Richtlinien der Vereinigung für die Materialprüfung zeigt sich, daß das Kapitel Kerbschlagprobe durch die Nutzbarmachung der jeweilig gemachten Erfahrungen die meisten Abänderungen erfuhr. Der Einfluß der Versuchstemperatur äußert sich ähnlich wie die Probenbreite durch Hoch- und Tieflage der Versuchswerte je nach der Temperaturhöhe. Ebenso hatte sich im Laufe unserer Abnahmarbeiten auch die obere Grenze der Probenbreite mit 25 mm als noch zu hoch zur sicheren Vermeidung des Streugebietes erwiesen. Es waren also, um die Versuchsbedingungen so zu gestalten, daß das Gebiet der Hochlage der Kerbzähigkeit sowohl hinsichtlich der Temperatur als auch Probenbreite für die Abnahme zur Anwendung kommt, zwei Wege möglich. Entweder die breiteren Proben durch Erwärmen in das Gebiet der Hochlage zu bringen oder ohne Veränderung der Temperatur durch Niedrighalten der Probenbreiten in dem Gebiet der Hochlage zu halten. Es hat bei der Abnahme einige Schwierigkeiten gemacht, daß die Richtlinien vom November 1925 beide Wege offenließen und außerdem noch eine Veränderung der Kerbform vorsahen, während die Mindestzähigkeit von 10 mkg/qcm für alle Fälle bestehen bleiben sollte.

Wenn auch grundsätzlich die Einwirkung der verschiedenen Temperaturhöhen, Probenbreiten und Kerbformen festzuliegen scheint, so steht doch zahlenmäßig ihr Einfluß nicht so fest, daß man bei der Abnahme z. B. entscheiden könnte, welche Temperatur für eine Probenbreite von 30 mm mit 0,5 mm Scharfkerb zu wählen ist, damit die Versuchsbedingungen einer Probe von 15 mm Breite und 4 mm Rundkerb bei Zimmertemperatur gleich sind. Denn da für beide gleiche Kerbzähigkeit von 10 mkg/qcm verlangt wird, ist die Gleichwertigkeit der Versuchsbedingungen Voraussetzung.

Bei der Abnahmetätigkeit unseres Überwachungsvereins, über die hier berichtet wird, ist deshalb von diesen in den Richtlinien vorgesehenen Änderungen kein Gebrauch gemacht worden. Hierfür kamen aber noch einige andere Gesichtspunkte hinzu:

Da die Kerbform Einfluß auf das Ergebnis hat, dürfte bei der Herstellung der Probe die Innehaltung der genauen Abrundung des Kerbes bei Wahl einer Kerbform von 0,5 mm Radius wesentlich, ihre praktische Ausführung jedoch nicht ohne Schwierigkeiten sein, während sich der Rundkerb von 4 mm auch ohne Präzisionsarbeit gut herstellen läßt. Ferner spricht gegen die Wahl einer schärferen Kerbform, daß sich mit Zunahme der Schärfe des Kerbes die für das Streugebiet kritische Temperatur mehr der Zimmertemperatur nähert bei Probenbreiten, die bei weniger scharfem Kerb schon außerhalb des Streugebietes liegen. Gegen eine Erhöhung der Versuchstemperatur sprachen die von Mailänder bekanntgegebenen Versuche, die zeigten, daß auch ungesundes Material durch Erhöhung der Versuchstemperatur in eine Hochlage der Kerbzähigkeit gebracht werden kann.

Als Beispiel für die Nutzenanwendung des Gesagten sei folgender Fall erwähnt: Bei der Prüfung des Materials für ein Großkraftwerk genügten vier Trommeln hinsichtlich der Kerbzähigkeit den Bedingungen nicht. Es handelte sich um 20 mm breite Proben mit 4 mm Rundkerb, die, ebenso wie ihre Kontrollproben, eine Kerbzähigkeit zwischen 5 und 7 mkg/qcm zeigten. Das Walzwerk schlug, fußend auf die Richtlinien, die in ihrer damaligen Fassung eine Versuchstemperatur nicht unter Zimmertemperatur vorschrieben, eine Wiederholung der Proben bei etwas erhöhter Temperatur vor. Dieser Vorschlag wurde aus den dargelegten

Gründen abgelehnt und ein Nachglühen der Trommeln verlangt mit dem Erfolg, daß nach dieser Glühung auch nach den alten Versuchsbedingungen befriedigende Werte erzielt wurden.

Als der für die Abnahmepraxis bessere Weg erscheint es deshalb, von Scharfkerben abzusehen, die Form der Charpyprobe beizubehalten und als Versuchstemperatur 15—20° Zimmertemperatur zu wählen, wobei die Probenbreite so festzulegen ist, daß die Ergebnisse eindeutig und den Fährnissen des Streugebietes entzogen sind.

Um über die diesen Forderungen genügende Probenbreite einen Anhalt zu gewinnen, sind die bei unseren Abnahmarbeiten festgestellten Ergebnisse, getrennt nach Materialart und Probenbreite, zusammengestellt: Bis 15 mm Breite ergab sich bei der Abnahme ein Ausfall von etwa 2%, bei 15—18 mm Breite ein solcher von ebenfalls 2%, bei 18—20 mm Breite von 3%, bei 20—24 mm Breite von 9%, bei 24—26 mm Breite von 6%, bei 26—30 mm Breite von 14%. Der Sprung auf einen mehrfach höheren Wert des Ausfalles liegt also bei der Probenbreite von 20—24 mm.

Es ist deshalb im Interesse des Zutrauens zu den Ergebnissen der Kerbschlagprobe zu begrüßen, daß die Richtlinien der Vereinigung für die Materialabnahme in ihrer Neufassung nicht über eine Probenbreite von 15 mm hinausgehen. Hiermit ist allerdings der Nachteil verbunden, daß durch eine Probe von dieser Breite bei dickeren Blechen nur ein Teil des Blechquerschnittes geprüft werden kann. Bei Prüfung durch mehrere, dem ganzen Blechquerschnitt aus mehreren Zonen entnommenen Kerbschlagproben hat sich denn auch gezeigt, daß die Kerbzähigkeit der mittleren im Vergleich zu den äußeren Zonen erhebliche Unterschiede aufweisen kann. Die Prüfung von 60 mm-Blechen ergab z. B. Außenzone: Mittelzone: Außenzone Kerbzähigkeiten in mkg/qcm von

19: 15: 17	22: 16: 20
13: 14: 13	23: 12: 24
13: 13: 13	19: 15: 21
15: 12: 17	22: 15: 24

Die Mittelzone hatte also eine bis zu 12 mkg/qcm geringere Zähigkeit als die beiden Außenzonen, die unter sich verglichen beide fast immer gleiche Werte haben.

Aus diesen und anderen Versuchen scheint sich, wenn sie auch erst in geringer Zahl ausgeführt sind, zu ergeben, daß es sich bei Blechen über 40 mm Dicke empfiehlt, auch die Mittelzone daraufhin zu prüfen, ob ein genügend langes Glühen Erfolg bis in den Kern des Bleches gehabt hat. Wegen der guten Übereinstimmung der Werte in den Außenzonen dürfte sich eine Prüfung beider Blechseiten erübrigen, wenn es nicht überhaupt zweckmäßig sein dürfte, die Prüfung nur auf die in allen Fällen ungünstigere Mittelzone zu beschränken. Eine derartige Beschränkung findet ja bereits bei geschmiedetem Material statt. Die Proben kommen hier zur Anstempelung an dem rohgeschmiedeten Kesselkörper, bei dem die Oberflächenzonen durch Abdrehen fortfallen. Bei der Anstempelung hat sich als zweckmäßig erwiesen, die genaue Lage der Probe in dem für die Fertigtrommel zur Verwendung kommenden mittleren Teil des Querschnittes dadurch sicherzustellen, daß der Stempel auf beide Enden des Probestückes aufgeschlagen wird.

Wenn nun in folgendem die erzielten Durchschnittswerte der Kerbschlagproben aus den Arbeiten unseres Überwachungsvereins mitgeteilt werden, so ist beim Vergleich von gewalztem und geschmiedetem Material dem vorerwähnten Umstand Rechnung zu tragen, daß bei letzterem die Mittelzone und bei ersterem mehr die Außenzone zur Prüfung kam.

Diese Mittelwerte betragen:

Für F I	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 5px;">gewalztes Material</td> <td style="padding-left: 5px;">14,5 mkg/qcm</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 5px;">geschmiedetes Material</td> <td style="padding-left: 5px;">14,1 „</td> </tr> </table>	gewalztes Material	14,5 mkg/qcm	geschmiedetes Material	14,1 „
gewalztes Material	14,5 mkg/qcm				
geschmiedetes Material	14,1 „				
Für F II	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 5px;">gewalztes Material</td> <td style="padding-left: 5px;">13,8 „</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 5px;">geschmiedetes Material</td> <td style="padding-left: 5px;">13,9 „</td> </tr> </table>	gewalztes Material	13,8 „	geschmiedetes Material	13,9 „
gewalztes Material	13,8 „				
geschmiedetes Material	13,9 „				
Für Nickelstahl	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding-right: 5px;">gewalztes Material</td> <td style="padding-left: 5px;">—</td> </tr> <tr> <td style="padding-right: 5px;">geschmiedetes Material</td> <td style="padding-left: 5px;">20,4 „</td> </tr> </table>	gewalztes Material	—	geschmiedetes Material	20,4 „
gewalztes Material	—				
geschmiedetes Material	20,4 „				

Der Vergleich zeigt, daß geschmiedetes und gewalztes Material in der Kerbzähigkeit praktisch keinen Unterschied ergibt, immer jedoch wieder unter ausdrücklichem Hinweis auf das oben Gesagte, und daß er bei dem härteren F II-Material gegenüber F I sowohl bei Blechen und noch mehr bei geschmiedetem Material nur unwesentlich ist.

Einige Versuchsreihen seien noch erwähnt, bei denen aus denselben Probestreifen Kerbproben von 15 und 30 mm entnommen worden sind, wie es in der Arbeit von Dr. Moser¹⁾ als abgekürztes Verfahren zur Bestimmung der beiden Werkstoffkenngrößen, Arbeitskonstante und Arbeitsschnelligkeit angegeben ist.

Diese beiden Begriffe sollen primäre Eigenschaften des Werkstoffes bezeichnen, die beide die Ergebnisse der Kerbschlagprüfung beeinflussen, jedoch durch geeignete Prüfverfahren getrennt angegeben werden können.

¹⁾ Stahleisen 1922 und 1924 und Kruppsche Monatshefte 1924.

Die Arbeitskonstante stellt die Eigenschaft des Werkstoffes dar, eine ihm eigentümliche Arbeitsmenge beim Kerbschlagversuch aufzunehmen, und zwar in Meterkilogramm pro Kubikzentimeter des verformten Volumens. Um diese ihm eigentümliche Arbeitsmenge aufzunehmen, d. h. um die zur Aufnahme erforderliche Volumenverformung vollziehen zu können, braucht der Werkstoff jedoch Zeit. Diese Zeit ist beim Versuch gegeben durch die Hammergeschwindigkeit des Fallwerkes. Wird nun der Querschnitt der Probe größer durch Verwendung größerer Probenbreiten, so wird auch die Zeit wachsen müssen, die der Werkstoff zur Volumenverformung dieses größeren Querschnittes braucht. Oder aber, wenn die Zeit, die die Probe zur Volumenverformung hat, gleich bleibt infolge Beibehaltung derselben Hammergeschwindigkeit, wird sich bei größeren Querschnitten die ihnen entsprechende Volumenverformung nur zum Teil auswirken können, also geringer werden. Um wieviel sie geringer wird, das findet prozentual seinen Ausdruck in der Arbeitsschnelligkeit des Werkstoffes.

Abgesehen nun davon, daß die beiden Begriffe Arbeitskonstante und Arbeitsschnelligkeit zur Charakterisierung eines Werkstoffes beitragen, können sie nach der Deutung von Moser auch Aufschlüsse über die Behandlung geben, die ein Werkstoff erfahren hat und dadurch auch für die Abnahme in besonderen Fällen von Bedeutung werden.

Als Beispiel seien entsprechende Versuche an fünf aus Flußeisen II geschmiedeten Trommeln angeführt, bei denen vom oberen Ende Längs- und Querproben 15×15 und 15×30 qmm Schlagquerschnitt und vom unteren Ende Querproben beider Größen entnommen wurden. Wo zwei Zahlen angegeben sind, sind von demselben Probenstück zwei gleichartige Proben entnommen.

Wegen der geringen Zahl der durchgeführten Versuche kann über die Brauchbarkeit des Verfahrens für die praktische Materialabnahme noch nichts gesagt werden, es käme auch nur in besonderen Fällen, etwa zur Feststellung der besonderen Art einer erforderlich werdenden Nachbehandlung, in Betracht. Aber auch hier dürfte der Umstand, daß einige Proben der Querschnittsgröße 15×30 bei Wiederholung des Versuches ein wesentlich abweichendes Ergebnis hatten, die dieser Probenbreite anhaftende Unsicherheit erneut bestätigen und damit die Eindeutigkeit der Versuchsergebnisse in Frage stellen. Außerdem scheint auch bei der 15×15 mm-Probe die volle Volumenverformung nicht immer eingetreten zu sein, wie sich aus dem Überschreiten einer 100proz. Größe der Arbeitsschnelligkeit in einigen Fällen ergibt.

Wenn nun zum Schluß etwas über den Erfolg der Kerbschlagprobe gesagt werden soll, so ist zu unterscheiden zwischen einem direkten und indirekten Erfolg.

Der direkte Erfolg besteht in der Zurückhaltung von ungeeignetem Material von der Verwendung zum Kesselbau. Zahlenmäßig sind auf Grund der Kerbschlagproben von mehr als 400 geprüften, geschweißten und geschmiedeten Trommeln 22 nachbehandelt und 3 zurückgewiesen worden, ebenso sind von etwa 1800 geprüften Blechen 36 nachbehandelt und 12 zurückgewiesen worden. Nicht einbegriffen sind in diesen Zahlen die Werkstoffteile, bei denen außer der Kerbschlagprobe auch andere Proben nicht genügten. Der weitaus größte Teil der nachbehandelten oder zurückgewiesenen Teile fällt in die erste Zeit der Anwendung der Kerbschlagprobe.

Hierdurch kommt dann der nicht zu unterschätzende indirekte Erfolg der Kerbschlagprobe zum Ausdruck, der sich in wesentlich schärferer Betriebsüberwachung und Verbesserung der Werkseinrichtungen der Walzwerke ausgewirkt hat. Auf den größeren Werken ist heute kaum ein Glühofen in Betrieb, der nicht mit meist selbst registrierenden Vorrichtungen zur Messung der Temperaturen versehen ist. Ferner werden in vielen Fällen Vorproben von den Werken genommen, nach deren befriedigendem Ausfall erst das Werkteil dem Sachverständigen zur Abnahme vorgelegt wird.

Die Zweckmäßigkeit der Kerbschlagprüfung kann auf Grund unserer Erfahrungen als erwiesen gelten, manche anfänglich bei ihrer Einführung noch vorhandenen Schwierigkeiten sind als behoben zu betrachten. Sie ist ein brauchbares Mittel in der Hand des Sachverständigen, das Vorhandensein wertvoller Eigenschaften unseres Kesselbaumaterials nachzuweisen.

		Aufgenommene Arbeit in mkg bei Schlagquerschnitt		Arbeitskonstante in mkg/cm	Arbeits-schnelligkeit %
		15×15	15×30		
1.	O. Q.	28,1	45,5	4,5	82
	O. L.	41,7	61,7	6,6	75
2.	U. Q.	22,5	47,3	3,6	über 100
	O. Q.	30,2	26,1 u. 43,7	4,8	43 u. 73
	O. L.	41,7	41,4	6,6	über 100
3.	U. Q.	30,2	67,1	4,8	„ 100
	O. Q.	30,2	49,1	4,8	82
	O. L.	37,8	67,5	6,0	90
4.	U. Q.	26,4	37,8	4,2	72
	O. Q.	41,7	68,0	6,6	82
	O. L.	56,3	91,5	8,9	82
5.	U. Q.	37,8	22,5 u. 37,8	6,0	30 u. 50
	O. Q.	30,2	18,4 u. 39,6	4,8	31 u. 66
	O. L.	37,8	58,6	6,0	7,8
	U. Q.	24,9	18,4 u. 45,5	3,9	38 u. 93

Vorschlag für die Abnahme von Kessel- und Dampfrohren.

Von Oberingenieur E. Koch, I.-G. Farbenindustrie A.-G. Ludwigshafen.

Aus den Ausführungen des Herrn Direktors Rosdeck und des Herrn Generaldirektors Thomas haben wir die für uns erfreuliche Aussicht entnommen, daß uns in allernächster Zukunft nur das Allerbeste vom Besten an Rohren für unsere Kessel geboten werden wird. Das enthebt uns aber nicht der Notwendigkeit und der Pflicht, die Rohre auch gründlich auf die Einhaltung dieser hervorragenden Eigenschaften zu prüfen. Die Vorschriften für die Prüfung der Rohre, wie sie im Landdampfkesseiauschuß beschlossen worden sind, und wie sie auch in ihren wesentlichen Teilen in die Richtlinien der Vereinigung übernommen worden sind, enthalten noch einige Lücken. Diese Lücken rühren letzten Endes daher, daß in der zurückliegenden Zeit Rohre so gut wie gar nicht der Prüfung unterworfen wurden. Es fehlte infolgedessen einerseits an der Erfahrung mit derartigen Prüfungen, andererseits waren auch die Werke nicht in genügendem Maße auf die Durchführung solcher Massenprüfungen eingerichtet. Ich darf feststellen, daß der letztere Punkt erfreulicherweise heute keine wesentliche Rolle mehr spielen dürfte. Dank dem Entgegenkommen der Röhrenwerke sind überall schon die nötigen Einrichtungen geschaffen. Die bisher gesammelten Erfahrungen gilt es nun weiter auszubauen, und der Zweck meiner Ausführungen ist der, Sie alle zur tätigen Mitarbeit am Ausbau dieser Prüfung zu bitten und einzuladen.

Die heute bestehenden Vorschriften sind in ihrer Form — Besichtigung der Rohre, Wasserdrukprobe und die stichprobenweise vorzunehmenden Proben, wie Zerreißversuch, Aufreiprobe usw. nicht geeignet, um mit Sicherheit zu verhindern, daß ein mit Fehlern behaftetes Rohr in einen Dampfkessel eingebaut wird. Sie haben an den Lichtbildern, die Herr Prof. Baumann eben vorführte, erkannt, daß eine ganze Reihe von Fehlern individueller Natur dem einen oder anderen Rohr anhaften kann, so daß wir eine Probe suchen müssen, die wir an jedem Rohr vornehmen können und die uns derartige Fehler mit größter Aussicht auf Erfolg auffinden läßt.

Ein großer Mangel bei den Proben besteht heute außerdem darin, daß wir heute noch nicht die Möglichkeit besitzen, Fehler, die nicht am Ende des Rohres selbst sichtbar auftreten, sondern die im Innern des Rohres vorhanden sind, erkennbar zu machen.

Wenn wir die vorhandenen Möglichkeiten prüfen, so haben zwei Proben die meiste Aussicht, praktisch verwendet zu werden und Erfolg zu versprechen: die eine ist eine etwas abgeänderte Abschreckbiegeprobe, bei der wir nämlich das Abschrecken weglassen, die zweite ist die Aufweitprobe, die wir aber auch für ihre Durchführung als Massenversuch an jedem einzelnen Rohr etwas modifizieren müssen. Der Abschreckbiegeversuch sieht vor, daß von einem gewissen Prozentsatz der Rohre ein Ring von etwa 100 mm Breite entnommen wird, der nach Abschrecken auf eine Höhe gleich der vierfachen Wandstärke zusammengedrückt wird. Diese Probe zeigt in sehr glücklicher Weise, ob das für die Herstellung des Rohres verwandte Material gut ist und ob der Glühzustand des Rohres ein guter ist. Dagegen ist diese Probe nicht ganz geeignet, um Fehler in der Herstellung des einzelnen Rohres, Ziehriefen usw. aufzudecken. Dafür eignet sich besser die Aufweitprobe. Sie ist in den Vorschriften in der Form enthalten, daß ins Rohrende ein konisch geformter Dorn bis etwa 30 mm Tiefe in das Rohr eingetrieben wird, der am erweiterten Ende einen Durchmesser hat, der um 10% größer ist als die Rohrlichtweite. Wenn man diese Probe an allen Rohren durchführen wollte, würde das eine überaus große Verschwendung an Material darstellen und auch zuviel Zeit in Anspruch nehmen. Es hat sich nun gezeigt, daß man diese Probe sehr gut dahin modifizieren kann, daß man an jedem Rohrende einen schmalen Ring absticht und das Aufweiten nur mit diesem Ring vornimmt. Die Wahl von 10% Aufweitung ist offenbar für die heute üblichen Abmessungen von Kesselrohren außerordentlich glücklich gewesen. Es fragt sich nur, ob bei zunehmender Wandstärke der Wert von 10% nicht nach oben zu verlegen wäre. Ich möchte daher dazu einladen, daß an den Stellen, wo die nötigen Einrichtungen und die nötige Zeit vorhanden sind, der Aufweitversuch bis zum Aufreißen des Ringes getrieben wird, so daß man genau messen kann: welche Ausweitung hält ein solches Rohr bis zum Bruch aus?, und gleichzeitig dabei beobachten kann: wie sieht das Rohr an der Bruchstelle aus? Hat sich dort eine gute Kontraktion ausgebildet, wie wir das vom Zerreistab her wissen und kennen, oder ist der Bruch infolge einer Ziehriefe oder einer Materialinhomogenität ohne Querkontraktion erfolgt? Wir haben nach den bisher vorliegenden Erfahrungen Aussicht, durch diese Probe mit weitgehender Sicherheit fehlerhafte Rohre von der Verwendung auszuschließen.

III. Neuere deutsche und amerikanische Ansichten über den Einfluß des Speisewassers bei der Entstehung von interkristallinen Rissen in Nietnähten.

Über die in Verbindungen von Kesselblechen auftretenden Laugenkonzentrationen.

Von Professor Dr.-Ing. e. h. **R. Baumann**, Stuttgart.

Seitdem in Amerika die Auffassung entstanden ist: Rißbildung in Kesselblechen könne darauf zurückzuführen sein, daß die im Speisewasser vorhandene Lauge das Flußeisen spröde mache, tritt immer ausgeprägter die Neigung auf, kritiklos jede Rißbildung auf diesen Einfluß zurückzuführen. Als anschauliches Beispiel darf der Fall erwähnt werden, über den in der Zeitschrift des Bayrischen Revisionsvereins 1926, S. 22, unter der Überschrift „Ein Beitrag zur Frage der kaustischen Sprödigkeit“ berichtet wird.

Da aber die Möglichkeit im Auge zu behalten ist, daß hochkonzentrierte Natronlauge die Zähigkeit der Bleche schädigen kann, nachdem in Eindampfapparaten und ähnlichen Einrichtungen weitgehende Zerstörungen auftreten¹⁾, war vor allem die Frage zu untersuchen, welche Konzentrationen im Dampfkesselbetrieb auftreten können.

Die Aufnahme und Durchführung der Untersuchung erfolgte im Auftrage der Vereinigung der Großkesselbesitzer.

Die einfache Überlegung zeigt, daß im eigentlichen Kesselwasser stärkere Konzentrationen nicht möglich sind, weil sonst ein ordnungsmäßiger Betrieb ausgeschlossen wäre (Spucken des Kessels). Deshalb ist die Möglichkeit des Auftretens höherer Konzentrationen vorwiegend auf die Stellen beschränkt, an denen der Kesselinhalt zwischen die Bleche der Nietverbindungen treten kann und diese der Erhitzung ausgesetzt werden. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. die Nietnaht ist dicht,
2. die Nietnaht ist undicht.

Im letzteren Falle tritt der Kesselinhalt in mehr oder minder langsamem Strom aus dem unter Kesseldruck stehenden Spalt usw. (der auch an Nieten usw. bestehen kann) an die umgebende Luft, hat also Gelegenheit zu verdampfen und die in ihm enthaltenen Bestandteile abzuschleiden. So ist es ohne weiteres erklärlich, daß sich unter Umständen große Mengen fester Abscheidungen bilden, die unter anderem auch Soda in verschiedenen Anteilmengen enthalten, die sich aus der Natronlauge des Kesselinhalts unter Einwirkung der Kohlensäure der Luft gebildet hat oder im Speisewasser gelöst enthalten war. Dieser Fall bietet für die planmäßige Verfolgung zunächst keinen Anreiz, da die Anreicherung des Salzgehaltes selbstverständlich ist. Andererseits aber darf nicht übersehen werden, daß von einem ordnungsmäßig in Stand befindlichen Kessel unbedingt verlangt werden muß, daß er dicht ist, weil sonst Schädigungen verschiedener Art auftreten können, auf die hier nicht eingegangen zu werden braucht (rasche Abkühlung der Bleche, Durchfeuchtung des Mauerwerks, ungleichförmiger Wärmezustand desselben, Rosten usw.).

1. Einfluß eines nach außen dichten Spaltes.

Für die folgenden Feststellungen genügt es deshalb, eingehend den ersten Fall ins Auge zu fassen. Um die auftretenden Konzentrationen zahlenmäßig ermitteln zu können, wurden die Verhältnisse nachgeahmt, wie sie sich in einer Nietnaht einstellen, die außen dicht ist, von innen her aber dem Kesselinhalt Zutritt gewährt. In der aus Abb. 1 ersichtlichen Weise wurde auf dem beheizten Boden eines kleinen Versuchskessels ein keilförmiger Spalt her-

¹⁾ Baumann, R.: Protokoll des internationalen Verbandes der Dampfkesselüberwachungsvereine, Chemnitz 1914; Hauptversammlung der Vereinigung der Großkesselbesitzer, Darmstadt 1925, S. 96 „Speisewasserpflge“.

gestellt, der eine solche Nietnaht darstellen soll. Oberhalb schließt sich der Wasserraum an. Durch Standrohr war der Überdruck auf ungefähr 1/2 at begrenzt.

Zunächst füllt sich der Spalt mit dem Kesselinhalt, dem eine Zusammensetzung gegeben war, die ungefähr 1% Lauge Na(OH) entsprach. Tritt Heizung ein, so verdampft voraussichtlich der Inhalt des von unten geheizten Spaltes stärker als der des Kessels, d. h. es tritt eine höhere Konzentration der Lauge im Spalt ein. Um die dort erreichte Konzentration zu ermitteln, wurde der Kessel schräg gestellt und abgelassen, bis nur noch der Spalt gefüllt war. Er enthielt ungefähr 25 ccm Lösung, deren Konzentration nun durch Titration mit einer 1/10 normalen Salzsäure¹⁾ und Methylorange als Indikator bestimmt werden konnte.

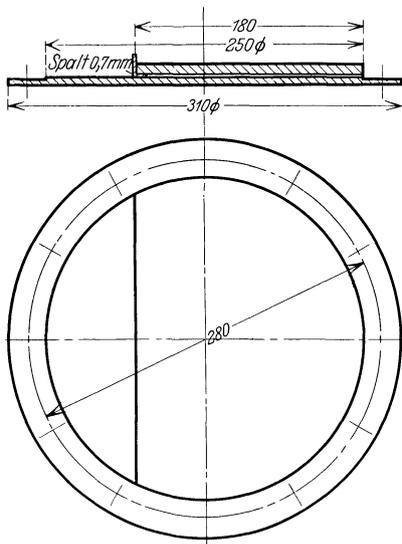


Abb. 1.

Von Einfluß auf die Konzentration konnten verschiedene Umstände sein. Zunächst sei angenommen, daß die Spaltbreite am Rand unverändert bleibe.

Je stärker die Verdampfung, desto öfter erneuert sich der Inhalt des Spaltes, so daß angenommen werden könnte, die Konzentration wachse mit der Verdampfungszahl. Die Versuche waren also bei verschieden starker Beheizung anzustellen.

In ähnlicher Weise wird die Zeit wirken, während welcher die Verdampfung erfolgt. Die Versuche mußten also bei verschiedener Dauer der Verdampfung stattfinden.

Genauere Überlegung zeigt, daß der Konzentration zwei Umstände entgegenwirken. Erstens wird, je stärker die Verdampfung ist, desto stärker die Strömung und Wirbelung

im Spalt, was auf Ausgleich mit dem Kesselinhalt hinausläuft. Zweitens wird dieser Ausgleich allein schon durch die Lösungs- bzw. Diffusionsvorgänge herbeigeführt.

Von großer Bedeutung ist es deshalb, ob der Inhalt des Spaltes unmittelbar nach der Verdampfung untersucht oder ob damit längere Zeit gewartet wird. Letzteres würde dem Vorgang entsprechen, der sich im Kessel abspielt, wenn der Betrieb, z. B. bei Nacht, unterbrochen wird. Dieser Fall mußte deshalb gesondert untersucht werden.

Die Versuchsergebnisse seien nun einzeln berichtet.

a) Einfluß der Versuchsdauer. I. Bei 80 kg/qm Std. Verdampfung, einer Spaltbreite von 0,7 mm und sofortiger Probeentnahme ergaben sich folgende Vermehrungen der ursprünglichen Konzentration:

Versuchsdauer . . in Min.	15	30	60	180	360
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,76	1 : 1,96	1 : 2,24	1 : 2,50	1 : 2,60
	1 : 1,44	—	1 : 1,84	1 : 2,23	1 : 2,20
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,76	1 : 1,96	1 : 2,24	1 : 2,50	1 : 2,60

Da es bei der vorliegenden Aufgabe richtig erschien, die stärkste Konzentration als den wichtigsten Fall zu betrachten und außerdem der höchste beobachtete

Wert mit den geringsten Versuchsfehlern durch Vermischung des Spaltinhalts mit Kesselwasser behaftet sein dürfte²⁾, sind in Abb. 2 die größten ermittelten Werte in starker Linie aufgetragen. Deutlich ist zu erkennen, daß die Linie einem Höchstwert zustrebt, der ungefähr bei dem dreifachen der ursprünglichen Konzentration liegen dürfte. Im vorliegenden Fall würde dies zu etwa 3% Na(OH) führen.

II. Bei 40 kg/qm Std. Verdampfung ergaben sich folgende Werte:

Versuchsdauer in Min.	60	180	360
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,36	1 : 1,46	1 : 1,56
	1 : 1,32	—	1 : 1,40
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,36	1 : 1,46	1 : 1,56

In Abb. 2 sind in schwacher Linie wieder die höchsten ermittelten Werte aufgezeichnet. Das Ansteigen erfolgt langsamer als bei einer Verdampfung von 80 kg/qm Std., ist aber in 6 Stunden noch bei weitem nicht beendet, so daß ein Schluß darüber, wann das Gleichgewicht zwischen Konzentrationssteigerung und

¹⁾ Das heißt in 1 l der Titrationslösung waren 1/10 des Molekulargewichts, also 3,647 g HCl enthalten. Es wurde so lange Säure zugeführt bis der eingebrachte Farbstoff von gelb in orange umschlug. Die Versuche sind von Herrn Dr.-Ing. Buchholz durchgeführt worden.

²⁾ Auf Vermeidung dieses Fehlers wurde mit besonderer Vorsicht geachtet. (Trockenwischen des Kesselbodens vor der Probeentnahme.)

Ausgleich mit dem Kesselinhalt erreicht ist, sehr ungewiß erscheint. Jedenfalls liegt der Wert über 1,6 und unter 3, wird also mit etwa 2 zu schätzen sein.

b) Einfluß der Höhe der Verdampfung. Dieser Einfluß geht in beschränktem Maße schon aus dem Vergleich der unter a I und a II angegebenen Zahlen hervor. Die höhere Verdampfung liefert auch stärkere Konzentrationsverhältnisse. Eingehender wurde dieser Einfluß verfolgt bei einer Versuchsdauer von 1 Std. mit 0,7 mm Spaltbreite und sofortiger Probeentnahme. Dabei fanden sich folgende Werte:

Abb. 3 gibt die höchsten ermittelten Werte in Abhängigkeit von der Verdampfungsstärke wieder. Zunächst steigt die Linie stark an, ein

Verdampfung . in kg/qm Std.	18	40	60	80	120	140
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,32	1 : 1,32	1 : 1,84	1 : 2,24	1 : 1,49	1 : 1,28
	1 : 1,24	1 : 1,36	—	1 : 1,84	1 : 1,47	1 : 1,37
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,32	1 : 1,36	1 : 1,84	1 : 2,24	1 : 1,49	1 : 1,37

Zeichen dafür, daß die Zunahme der Konzentration durch Verdampfung die Abnahme infolge Ausgleichs mit dem Kesselinhalt stark überwiegt. Nach Überschreiten einer Verdampfung von etwa 80 kg/qm Std. sinkt die Linie jedoch stark ab, vermutlich bedingt durch starke Wirbelung im Spalt und dessen Nachbarschaft (vgl. auch unter d).

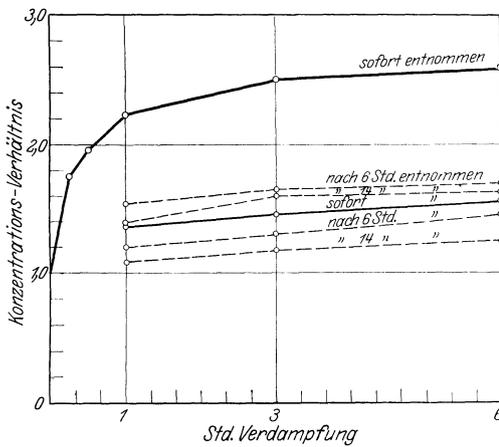


Abb. 2.

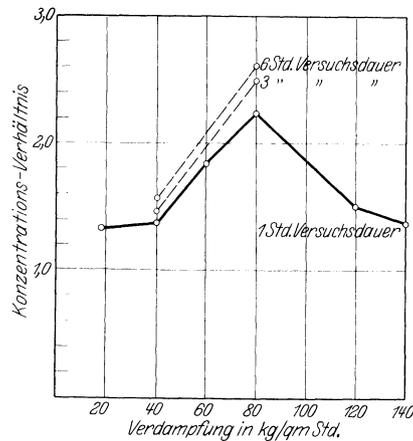


Abb. 3.

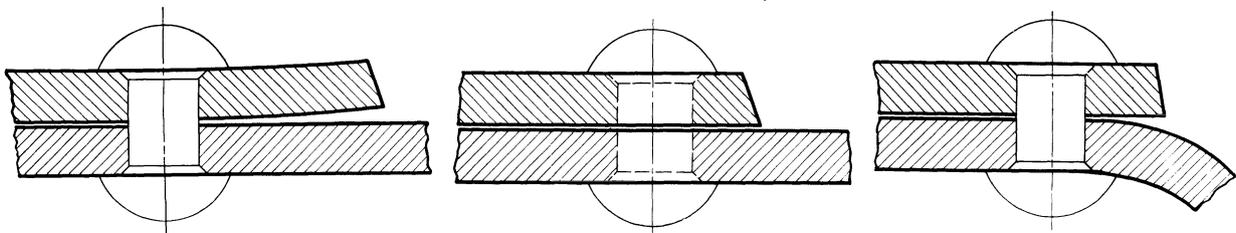


Abb. 4—6.

Es dürfte nicht ausgeschlossen sein, daß bei höheren Kesseldrücken der Höchstwert sich nach oben verschiebt, indem die Dampfentwicklung im Spalt geringe Wirbelung hervorruft. Dazu treten andere Einflüsse.

So macht sich z. B. die Versuchsdauer beim ansteigenden Ast geltend, wie unter a I. erörtert, so daß bei der Verdampfung von 80 kg/qm Std. ein Konzentrationsverhältnis von etwa 2,6 nach 6 Stunden erreicht wird (siehe oben unter a I). Im absteigenden Ast dürfte der Einfluß der Versuchsdauer ein anderer sein.

Die Konzentration wird nämlich, wenn die oben für den Abfall angenommene Erklärung zutrifft, um so rascher abfallen können, je höher der Höchstwert vorher gestiegen war.

Über den in diesem Fall besonders wichtigen Einfluß der Spaltbreite ist unter c) weiteres berichtet.

c) Einfluß der Spaltbreite. Die Breite des Spaltes zwischen aufeinanderliegenden Blechen kann bei ausgeführten Dampfkesseln in weiten Grenzen schwanken; ebenso ist die Gestalt des Quer- und Längsschnittes solcher Spalten sehr verschieden. In der Regel wird angenommen werden dürfen, daß die Breite der Öffnung am Rande gering ist durch die Tätigkeit des Stemmers. Selbst wenn die Bleche nach dem Nieten recht unvollkommen gepaßt haben. — Abb. 4—6 zeigen einige der üblichen Fälle in übertriebener Weise — so stellen sich,

doch nach dem Stemmen Öffnungen gemäß Abb. 7—9 dar, so daß die Spaltbreite am Rande (s), bedeutend kleiner ist als innen (S). Demgemäß ist beim Versuch dadurch ein verschieden

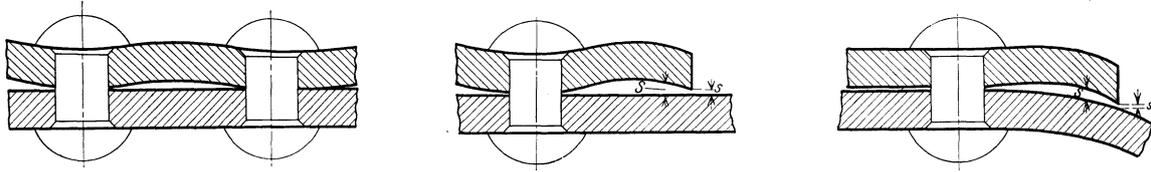


Abb. 7—9.

breiter Spalt hergestellt worden, daß an dem Rande (vgl. Abb. 10) ein Blechstreifen von verschiedener Dicke (d) eingelegt wurde.

Dabei ergaben sich dann Werte von $s = 1,5$ (ohne Einlage), $s = 0,7$ und $s = 0,3$ mm.

Bei Beurteilung der Ergebnisse ist im Auge zu behalten, daß bei diesem Vorgehen der Vorteil bestand, die zur Untersuchung verfügbare Menge der Flüssigkeit im Spalt in allen Fällen von angenähert gleicher Größe zu erhalten. Andererseits mußte der Dampf, der an der überdeckten Stelle entstand (wie im Kessel) durch den engen Spalt in das umgebende Wasser ausströmen und dort sowie im Innern des Spalts heftige Strömung und Wirbelung hervorrufen.

Mit den oben angeführten Spaltöffnungen wurden Versuche durchgeführt bei 80 kg/qm Std. Verdampfung, 1 Stunde Versuchsdauer und sofortiger Probeentnahme. Es wurden dabei folgende Werte erhalten:

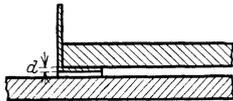


Abb. 10.

Spaltbreite in mm	0,3	0,7	1,5
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse . . .	1 : 2,13 1 : 2,45 1 : 2,33	— 1 : 2,24 1 : 1,84	— 1 : 1,47 1 : 1,48
Höchste Konzentrationsverhältnisse . . .	1 : 2,45	1 : 2,24	1 : 1,48

Abb. 11 gibt die Höchstwerte der ermittelten Konzentrationsverhältnisse in starker Linie in Abhängigkeit von der Spaltbreite wieder. Die obere Linie steigt mit abnehmender Spaltbreite zunächst rasch, später (zwischen 0,7 und 0,3 mm) langsamer an.

Ferner wurde der Einfluß der Spaltbreite bei 40 kg/qm Std. Verdampfung ermittelt.

Spaltbreite in mm	0,3	0,7	1,5
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse . . .	1 : 1,29 1 : 1,18	1 : 1,36 1 : 1,32	1 : 1,14 1 : 1,08
Höchste Konzentrationsverhältnisse . . .	1 : 1,29	1 : 1,36	1 : 1,14

Es ergaben sich folgende Werte:

In Abb. 11 sind die höchsten Werte des Konzentrationsverhältnisses im untern Linienzug auf-

gezeichnet. Die Linie steigt langsamer als bei den ersten Versuchen, fällt sogar gegen 0,3 mm Spaltbreite ein wenig ab.

Immerhin scheint mit Abnahme der Spaltbreite das Konzentrationsverhältnis anzusteigen, bei diesen Versuchen bis zu einem Verhältnis 1 : 2,45. Ob dieses Verhältnis bei noch engerem Spalt und starker Verdampfung beträchtlich weiter ansteigt, muß dahingestellt bleiben. Den möglichen Grenzfall bildet jedenfalls der Eintritt der Auskristallisation festen Salzes. Dies hätte zur Voraussetzung, daß nicht von der Wasserseite her die Konzentration raschere Abnahme erfährt als Zunahme durch die Verdampfung stattfindet. Deshalb war noch zu untersuchen, in welchem Maße die Konzentration durch den erwähnten Ausgleich vermindert wird in Abhängigkeit von Zeit und Konzentration. Am einfachsten konnten diese Versuche bewerkstelligt werden durch Einhaltung verschieden langer Zeiträume zwischen Versuchsende und Probeentnahme, wenn auch dabei die Verhältnisse etwas anders liegen als während des Betriebes (vgl. d).

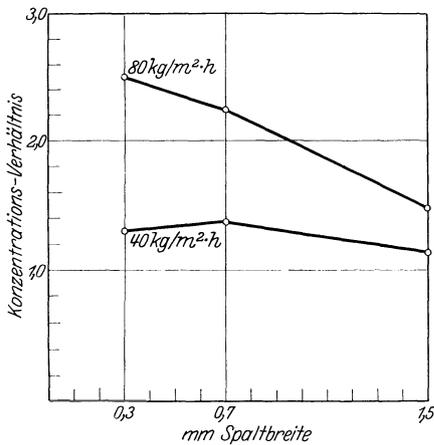


Abb. 11.

d) Einfluß des Zeitraumes zwischen Versuchsende und Probeentnahme. Wie mehrfach erwähnt, ist es für das hinsichtlich des Konzentrationsverhältnisses erlangte Ergebnis von großer Bedeutung,

wann die Probe für die Analyse entnommen wird, ob unmittelbar im Anschluß an den Versuch oder nach Verlauf eines gewissen Zeitraumes, in dem die Verdampfung ruht. Es besteht

nämlich die Möglichkeit, daß schon in der ruhenden Flüssigkeit durch Diffusion sich allmählich die Konzentration der Spaltlösung mit der des Kesselinhaltes ausgleicht. Deshalb erfolgte die Probeentnahme 1. im Anschluß an die Verdampfung, 2. 6 Stunden und 3. 14 Stunden nach der Verdampfung und zwar bei einer Spaltbreite von 0,7 mm, 1 Stunde Verdampfungsdauer und 80 kg/qm Std. Verdampfung.

Die Versuchswerte sind nebenstehende:

Probeentnahme	sofort nach	6 Std. Ende	14 Std. der Verdampfung
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 2,24	1 : 1,24	1 : 1,11
	1 : 1,84	1 : 1,55	1 : 1,20
	—	—	1 : 1,40
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 2,24	1 : 1,55	1 : 1,40

In Abb. 12 sind die höchsten der erhaltenen Werte aufgetragen und zwar in der stark ausgezogenen Linie.

Derselbe Versuch wurde durchgeführt bei 0,7 mm Spaltbreite, 1 Stunde Versuchsdauer und 40 kg/qm Std. Verdampfung.

Die erhaltenen Werte sind:

Probeentnahme	sofort nach	6 Std. Ende	14 Std. der Verdampfung
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,36	1 : 1,20	1 : 1,08
	1 : 1,32	1 : 1,18	1 : 1,02
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,36	1 : 1,20	1 : 1,08

In Abb. 12 sind die höchsten der erhaltenen Werte in der schwach ausgezogenen Linie wiedergegeben.

Es seien ferner hier die Versuchswerte angegeben bei 0,7 mm Spaltbreite, 3 Stunden Versuchsdauer und 80 kg/qm Std. Verdampfung.

Probeentnahme	sofort nach	6 Std. Ende	14 Std. der Verdampfung
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 2,23	1 : 1,66	1 : 1,60
	1 : 2,50	1 : 1,41	1 : 1,36
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 2,50	1 : 1,66	1 : 1,60

Dieselbe Versuchsanordnung jedoch bei 40 kg/qm Std. ergab folgende Werte:

Probeentnahme	sofort nach	6 Std. Ende	14 Std. der Verdampfung
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,46	1 : 1,31	1 : 1,18
	—	—	1 : 1,09
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,46	1 : 1,31	1 : 1,18

Ebenso wurden die gleichen Versuche bei einer Versuchsdauer von 6 Stunden durchgeführt. Die erhaltenen Werte bei 80 kg/qm Std. Verdampfung und 0,7 mm Spaltbreite sind:

Probeentnahme	sofort nach	6 Std. Ende	14 Std. der Verdampfung
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 2,60	1 : 1,71	1 : 1,64
	1 : 2,20	1 : 1,33	1 : 1,23
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 2,60	1 : 1,71	1 : 1,64

Die Ergebnisse der Versuche bei 40 kg/qm Std., 6 Stunden Verdampfung und 0,7 mm Spaltbreite sind folgende:

Probeentnahme	sofort nach	6 Std. Ende	14 Std. der Verdampfung
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,56	1 : 1,47	1 : 1,26
	1 : 1,40	1 : 1,22	1 : 1,11
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 1,56	1 : 1,47	1 : 1,26

Die bei diesen Versuchen erhaltenen Werte bestätigen nur die Ergebnisse der bereits in Abb. 12 aufgezeichneten Werte; sie sind in Abb. 12 durch gestrichelte Linien wiedergegeben.

Der Verlauf der Kurven zeigt, daß ein um so schnellerer Ausgleich eintritt, je höher das Konzentrationsverhältnis am Ende der Verdampfung gestiegen war, was auf stärkere Diffusionsvorgänge hindeutet. Außerdem ist bei bewegter Flüssigkeit ein stärkerer Ausgleich zu erwarten. So wirkt schon die verschieden große Abkühlung der erhitzten Kesselbleche und des Kesselinhaltes im Zeitraum zwischen der Verdampfung und der Probeentnahme dahin,

daß die Lösung in leichter Bewegung bleibt (Wärmeströmung). Im Kessel dürfte dadurch der Konzentrationsausgleich an sich noch befördert werden¹⁾.

Für die Erörterung der im Kesselbetrieb möglichen Konzentrationen schien es richtig, den Vorgang des Konzentrationsausgleiches noch näher zu untersuchen.

Um die Geschwindigkeitsverhältnisse beim Ausgleich der Konzentration zwischen Spalt- und Kesselinhalt unter möglichster Ausschaltung von Einflüssen der Strömung zu verfolgen, wurden folgende Versuche ausgeführt. In ein Glasgefäß 19,0 × 14,7 × 19,5 cm Inhalt wurde eine Scheidewand eingebaut, so daß zwei Abteilungen entstanden, die mit verschiedenen konzen-

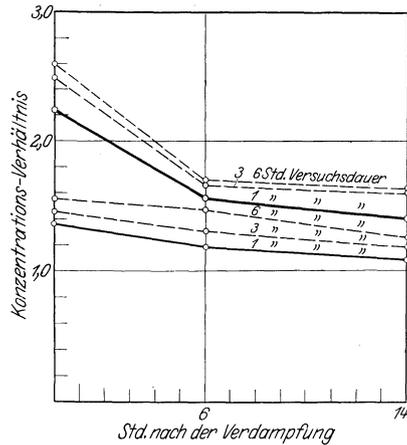


Abb. 12.

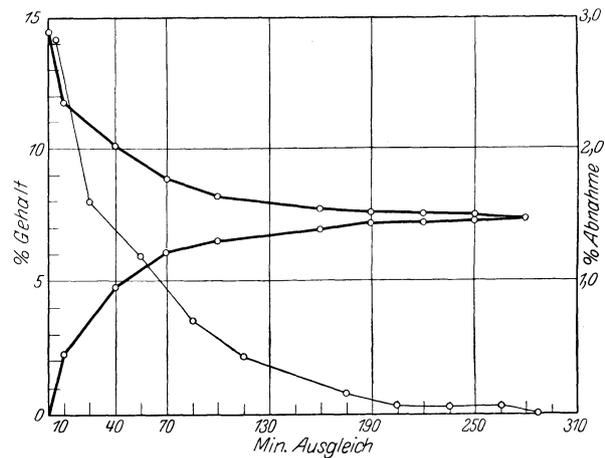


Abb. 13.

trierten Laugen gefüllt wurden. In der Scheidewand befand sich ein Schieber (Öffnung 14,7 × 0,3 cm). Bei geöffnetem Schieber hatten die beiden Lösungen Gelegenheit, ihre Konzentrationen gegeneinander auszutauschen. Die Versuche erfolgten bei ruhender Flüssigkeit. Die Konzentrationen wurden in Abständen von je einer halben Stunde gemessen. Vor der Probeentnahme wurde nach Schließen des Schiebers jede Lösung umgerührt. Infolgedessen standen nach jeder Probeentnahme immer wieder zwei nicht ausgeglichene verschieden stark konzentrierte Lösungen auf beiden Seiten des Schiebers, so daß der Ausgleich verhältnismäßig schnell erfolgen konnte. Wäre dagegen die Probeentnahme in größeren Zeitabständen erfolgt, so wäre der Ausgleich langsamer vor sich gegangen.

Im folgenden sind die Versuchswerte bei je halbstündiger Probeentnahme angegeben:

Zeit in Minuten	Lösung I Konzentration in %	Lösung II Konzentration in %	Konzentrations-Verhältnis	Lösung I Abnahme in %	Lösung II Zunahme in %
0	14,56	0,0	1 : ∞	2,84	2,28
10	11,72	2,28	1 : 5,14	1,60	1,48
40	10,12	4,76	1 : 2,12	1,20	1,36
70	8,92	6,12	1 : 1,46	0,71	0,40
100	8,21	6,52	1 : 1,26	0,44	0,44
130	—	—	—	—	—
160	7,77	6,96	1 : 1,11	0,17	0,20
190	7,60	7,16	1 : 1,06	0,07	0,04
220	7,53	7,20	1 : 1,04	0,07	0,08
250	7,44	7,28	1 : 1,02	0,08	0,08
280	7,36	7,36	1 : 1,01	—	—

In Abb. 13 ist die Abnahme der Konzentration der Lösung I und die Zunahme der Konzentration der Lösung II in Abhängigkeit von der Zeit in den stark ausgezogenen Linien wiedergegeben. Der Verlauf der Kurven zeigt, daß, wie zu erwarten war, der Ausgleich der Konzentrationen um so stärker erfolgt, je höher das Konzentrationsverhältnis zwischen den beiden Lösungen ist.

In Abb. 13 ist in der schwach ausgezogenen Linie die durchschnittliche Abnahme der Konzentration in jeder ½ Stunde aufgetragen. Auch der Verlauf dieser Kurve zeigt, daß der Ausgleich um so stärker und damit schneller erfolgt, je größer das Konzentrationsverhältnis zwischen den beiden Lösungen ist.

Läßt man den einzelnen Ausgleich langsamer erfolgen, als bei den besprochenen Versuchen, d. h. werden die Lösungen weniger oft durch Umrühren in eine in sich gleichförmige hoch und weniger hoch konzentrierte Lauge geschieden, dann erfolgt der vollständige Ausgleich, wie oben erwähnt, langsamer. Bei den folgenden Versuchen wurde, um dies zu zeigen, die Dauer des Ausgleichs, wie bei den Verdampfungsversuchen, zu 6 und 14 Stunden gewählt.

¹⁾ Anders können die Verhältnisse vielleicht an undichten Stellen unbeheizter Schlamm-sammler usw. liegen.

In Abb. 14 ist in den stark ausgezogenen Linien die Abnahme der Konzentration der Lösung I und die entsprechende Zunahme der Lösung II in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Zum Vergleich ist die entsprechende in Abb. 13

Zeit in Stunden	Lösung I Konzentration in %	Lösung II Konzentration in %	Konzentrationsverhältnis in %	Lösung I Abnahme in %	Lösung II Zunahme in %
0	7,20	0,00	1 : ∞	2,12	1,88
6	5,20	2,12	1 : 1,98	1,00	0,88
14	4,20	3,00	1 : 1,40	0,28	0,40
6	3,92	3,40	1 : 1,15	0,16	0,20
14	3,76	3,60	1 : 1,04	—	—

dargestellte Kurve hier in dünner Linie eingezeichnet worden. Ein Vergleich der beiden Kurvenzüge zeigt, daß bei seltener bewegter Flüssigkeit der Ausgleich ganz bedeutend länger dauert. Die Eigenbewegung der einzelnen Teilchen ist eben vergleichsweise gering.

In Abb. 15 ist die Abnahme der Konzentration der Lösung I in Abhängigkeit vom Konzentrationsverhältnis der Lösung II zu Lösung I dargestellt, und zwar stellt die obere Linie die Werte von dem in Abb. 13 dargestellten und die untere Linie die Werte von dem in Abb. 14 dargestellten Versuch dar. Der Verlauf dieser Kurven zeigt sehr deutlich, wie stark die Ausgleichsgeschwindigkeit zuerst mit der Größe des Konzentrationsverhältnisses wächst. Bemerkenswert erscheint dagegen, daß von einem bestimmten Konzentrationsverhältnis ab (etwa 1 : 4,0 bis 1 : 5,0) die Linie angenähert wagrecht verläuft, d. h. daß oberhalb eines bestimmten Konzentrationsverhältnisses die Diffusion nur wenig beschleunigt wird, wenn das Konzentrationsverhältnis weiter wächst. Dies dürfte damit zusammenhängen, daß am Rande der sich berührenden Laugen der Ausgleich stets sehr rasch erfolgt, sich aber nach dem Innern jeder Lösung langsam fortpflanzt.

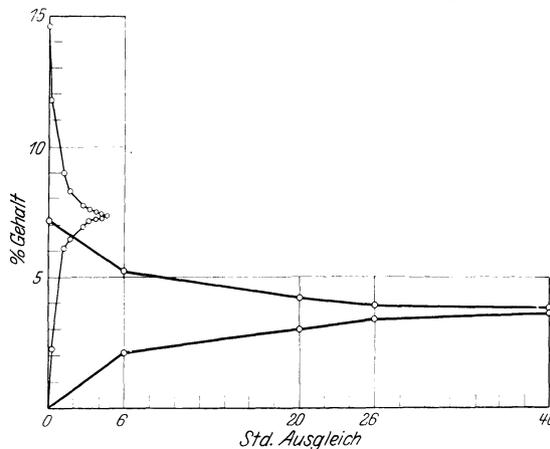


Abb. 14.

Im Versuchskessel vollzieht sich der Ausgleich unter Vermittlung eines wesentlich kleineren

Querschnittes; er wird behindert werden und dieser Einfluß wird sich bei einem konischen Spalt in steigendem Maße bemerkbar machen. Andererseits werden die Temperaturunterschiede den Ausgleich stark begünstigen. Können hiermit die Ergebnisse nach Abb. 13, 14 und 15 auch nicht zahlenmäßig auf die im Kessel bestehenden Verhältnisse übertragen werden, so ermöglichen sie doch eine Beurteilung der Art und der Größenordnung der Vorgänge im Kesselbetrieb. Sie machen es unwahrscheinlich, daß im Spalt sehr hohe Konzentrationen auftreten.

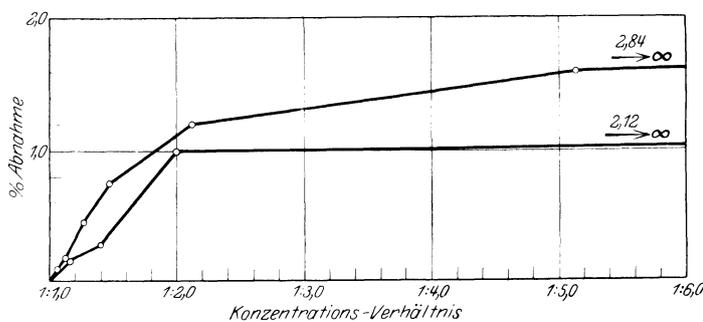


Abb. 15.

2. Einfluß eines nach außen undichten Spaltes.

Mehrfach ist hervorgehoben worden, daß die Verhältnisse grundlegende Änderung erfahren, wenn der Spalt nach außen hin undicht ist. Um den Einfluß einer solchen offenen Stelle zu prüfen, wurde ein Stück des Bodens im Bereich des Versuchsspaltes autogen herausgeschnitten und unvollkommen wieder verschmolzen. Eine Stelle zeigte nach einiger Mißhandlung das gewünschte Maß von Undichtheit, die zwar kein Tropfen, wohl aber unter dem Einfluß des Kesseldruckes ein Verdampfen nach außen zuließ.

Da die Spaltbreite, die Höhe der Verdampfung und die Zeit zwischen Versuchsende und Probeentnahme nach der Wasserseite hin die bisher ermittelten Einflüsse ergeben, ist im folgenden nur der Einfluß der Versuchsdauer ermittelt worden bei 80 kg/qm Std., 0,7 mm Spaltbreite und sofortiger Probeentnahme.

In der folgenden Zahlentafel sind die erhaltenen Ergebnisse wiedergegeben:

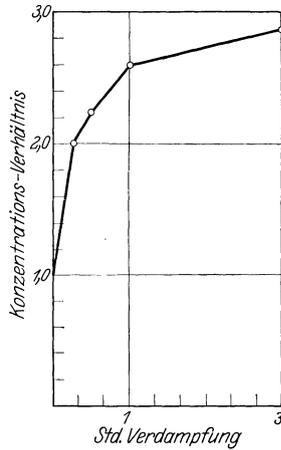


Abb. 16.

Versuchsdauer in Min.	15	30	60	180
Ermittelte Konzentrationsverhältnisse	1 : 2,01 1 : 1,89	1 : 2,12 1 : 2,24	1 : 2,18 1 : 2,08 1 : 2,27	1 : 2,05 1 : 2,87
Höchste Konzentrationsverhältnisse	1 : 2,01	1 : 2,24	1 : 2,60	1 : 2,87

In Abb. 16 sind die höchsten der ermittelten Werte in Abhängigkeit von der Verdampfungsdauer aufgetragen. Die Ergebnisse des sechsstündigen Versuchs sind nicht angegeben, weil für diese Verdampfungsdauer der Kesselinhalt zu gering war.

Um den Einfluß der Undichtheit allein zu ermitteln ist der entsprechende Versuch mit dichtem Spalt zum Vergleich heranzuziehen (Höchstwerte).

Versuchsdauer in Min.	15	30	60	180
Undichter Spalt	1 : 2,01	1 : 2,24	1 : 2,60	1 : 2,87
Dichter Spalt	1 : 1,76	1 : 1,96	1 : 2,24	1 : 2,50
Unterschied in %	14,2	14,3	16,1	14,8

Auch beim undichten Spalt strebt das Konzentrationsverhältnis einem Höchstwert zu. Seine Höhe muß in hohem Grade von all den Einflüssen, die früher erörtert worden sind, abhängen. Hiernach steht zu erwarten, daß die Höhe der Laugenkonzentration, die sich an einer Stelle bildet, an der die zu verbindenden Bleche mangelhaft aneinander liegen, sehr verschieden ausfallen und von niederen (wie sie bei den hier besprochenen Versuchen auch bei undichtem Spalt ausschließlich beobachtet werden konnten) bis zu beträchtlichen Werten ansteigen kann. Wirklich hohe Konzentration, insbesondere die Abscheidung festen Salzes, dürfte aber auf die Fälle beschränkt sein, in denen nach außen hin eine Verdampfung möglich ist, d. h. bei unvollkommen dichten Nähten, außerhalb der letzten wirksamen Dichtungsstelle (Salzblume). Herrscht nämlich im Kessel hoher Druck, so wird durch den Spalt ständig Abblasen erfolgen, im Spalt also keine hohe Konzentration verbleiben, auch wenn sich außerhalb hohe Anreicherung von Lauge (festes Salz, Salzblumen) vorfindet. Auch dies bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Versuche.

Eine bedeutungsvolle Bestätigung bilden die Analysen des Spaltinhalts bei untersuchten Kesseln, der sich nach Auseinandernehmen des Kessels vorfand. Vielfach fand sich ein großer Anteil von Kesselsteinbildnern bei geringem Alkaligehalt¹⁾. Die seltenen Fälle hohen Alkaligehalts erklären sich dann in folgender Weise. Der Kessel ist undicht, der Spalt wächst mit Kesselstein zu und zwar zuerst nahe der inneren Stemmkante. Der Kesselinhalt bläst dann weiter nach außen ab und füllt in erster Linie den offen gebliebenen Teil des Spaltes mit Salzblumen usw. Voraussetzung dafür ist genügende Weite desselben. Diese lag in allen beobachteten Fällen vor.

Soweit von diesen Versuchen auf die Verhältnisse im Dampfkessel geschlossen werden kann, kann das Ergebnis des gesamten Versuchs wie folgt zusammengefaßt werden.

Hohe Konzentrationen können sich in den Nähten bei ordnungsgemäß hergestellten Kesseln nicht ausbilden, solange der Kesselinhalt nicht ganz unzulässigen Salzgehalt aufweist.

Entstehung interkristalliner Risse in Abwesenheit von Speisewasser.

Von Prof. Dr.-Ing. e. h. R. Baumann, Stuttgart.

Aus dem ins einzelne gehenden objektiven Bericht von Herrn Dr.-Ing. Guillaume (siehe S. 1 u. ff.) über die Ergebnisse zahlreicher Kesselschäden und über den neuesten Vortrag von Herrn Prof. Parr zeigt sich, daß für die eingetretene Rißbildung mannigfache Gründe angegeben werden können, die zu ihrer Erklärung ohne Zurückgreifen auf die Parrsche Laugenhypothese ausreichen. Die überwiegende Zahl der Risse zeigt aber den kennzeichnenden Verlauf um die einzelnen Kristalle herum und Prof. Parr erachtet geradezu diesen interkristallinen Verlauf als Kennzeichen eines Risses, der im Kesselblech durch die Einwirkung

¹⁾ In den Spalt war also viel Wasser eingedrungen (Kesselstein), aber wenig Alkali verblieben.

der Lauge entstanden ist. Wenn nun auch Prof. Parr neuerdings nur noch von einer Beförderung der Rißbildung durch die Lauge spricht, so erscheint es doch geboten, zur Nachprüfung, bzw. Widerlegung seiner Hypothese festzustellen, ob interkristalline Risse auch ohne Lauge entstehen können. Die beste Stütze der bisherigen Auffassung wäre die Erzeugung interkristalliner Risse bei Abwesenheit von Lauge. Diesem Gedanken ist die Materialprüfungsanstalt Stuttgart gefolgt und es ist gelungen, unter bestimmten Bedingungen an trockener Luft in einem Kesselblech interkristallinen Rißverlauf willkürlich zu erzeugen. Abb. 1 zeigt als Beleg ein Stück eines solchen Risses. Über diese Versuche wird später eingehend berichtet werden. Deutlich ist zu erkennen, daß der Riß den Kornfugen folgt. Interkristalline Risse sind bei Flußeisen überhaupt nicht selten und es ist schon lange bekannt, daß die Kornfugen gegenüber gewissen Beanspruchungen eine schwache Stelle bilden. Abb. 2 zeigt z. B. den unteren Rand eines Eindampfgefäßes. Die Feuergase sind längs den Kornfugen eingedrungen und lösen die einzelnen Körner aus dem Materialverbande. Abb. 3 enthält zwar noch keinen Riß, sondern zeigt erst, wie das Verbrennen des Materials durch Anhäufung von Oxyden längs den Kornfugen erfolgt. Würde Beanspruchung eintreten, so bestünde kein Zweifel, daß der Riß in vorschriftsmäßiger Weise den durch die Einlagerungen geschwächten Kornfugen folgen würde. Aus Abb. 4 gehen sehr schön ausgebildete interkristalline Risse hervor. Es handelt sich um ein Stück, das beim Hartlöten infolge innerer Spannungen gerissen ist. Der nach Wunsch interkristallin verlaufende Riß aus Abb. 5 stammt von einem Salpetersäurefaß; auch hier hat Lauge nicht gewirkt. Abb. 6 zeigt den interkristallinen Rißverlauf im Innern einer Triebwelle, die im Freien arbeitete. Der inter-

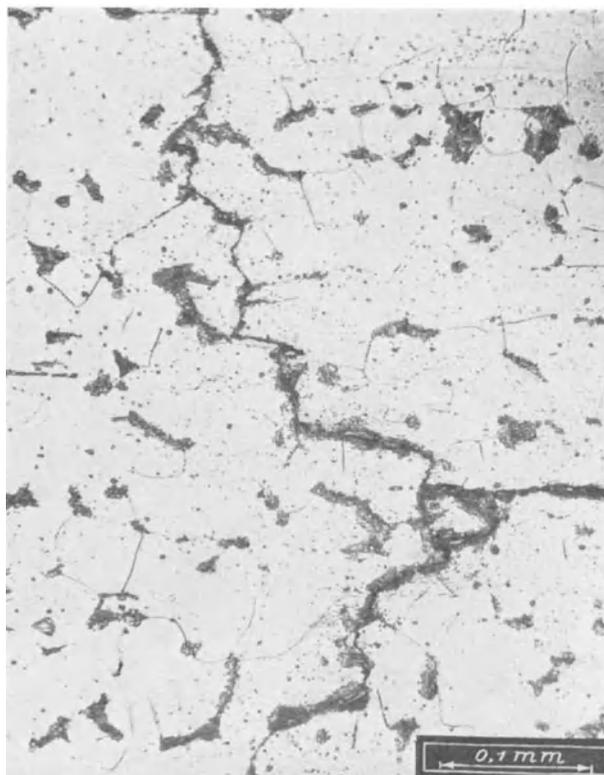


Abb. 1.

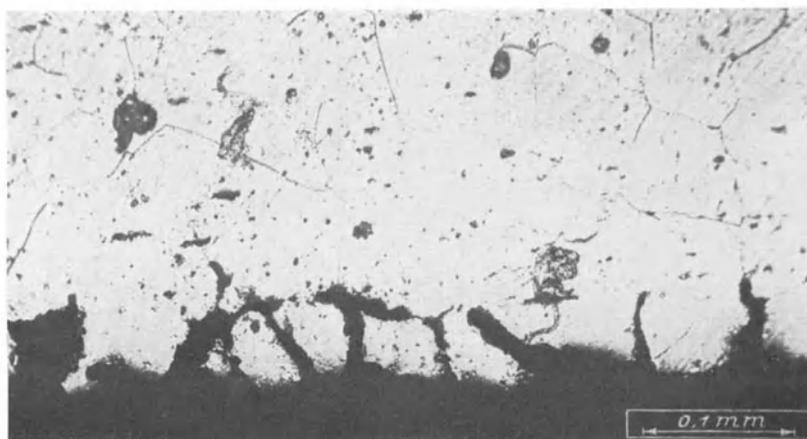


Abb. 2.

kristalline Riß in Abb. 7 ist im offenen Blech eines Flammrohrs entstanden, so daß die Einwirkung konzentrierter Lauge ausgeschlossen erscheint, und die Erklärung, der Riß sei unter der unmittelbaren Einwirkung der anstoßenden Feuerung entstanden, genügt. Besonders zu denken gibt Abb. 8. Der deutlich interkristalline, verzweigte Riß wurde im Gefüge eines noch nicht in Betrieb genommenen Kesselteils (Teilkammer aus Stahlguß) vorgefunden. Damit dürfte der Nachweis, daß interkristalline Risse kein sicheres Kennzeichen dafür sind, daß die Einwirkung von Lauge stattgefunden hat, in die Wege geleitet sein.

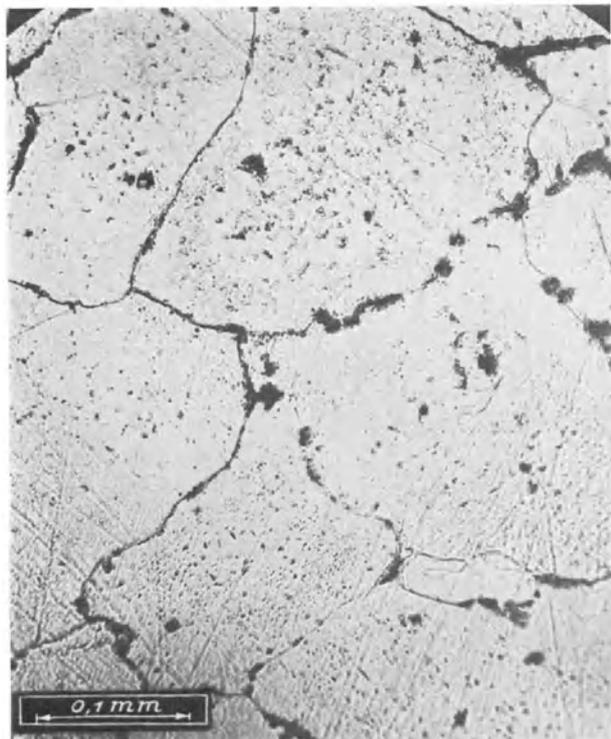


Abb. 3.

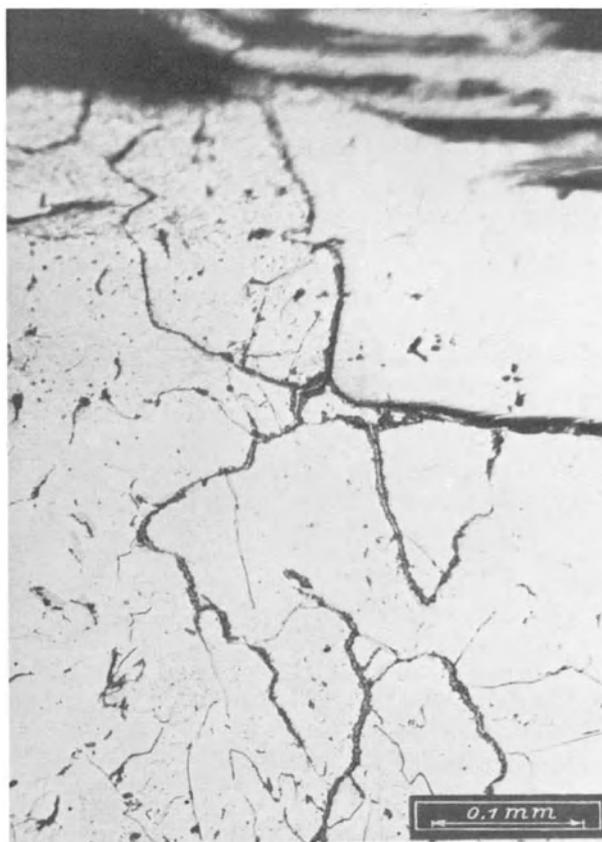


Abb. 4.

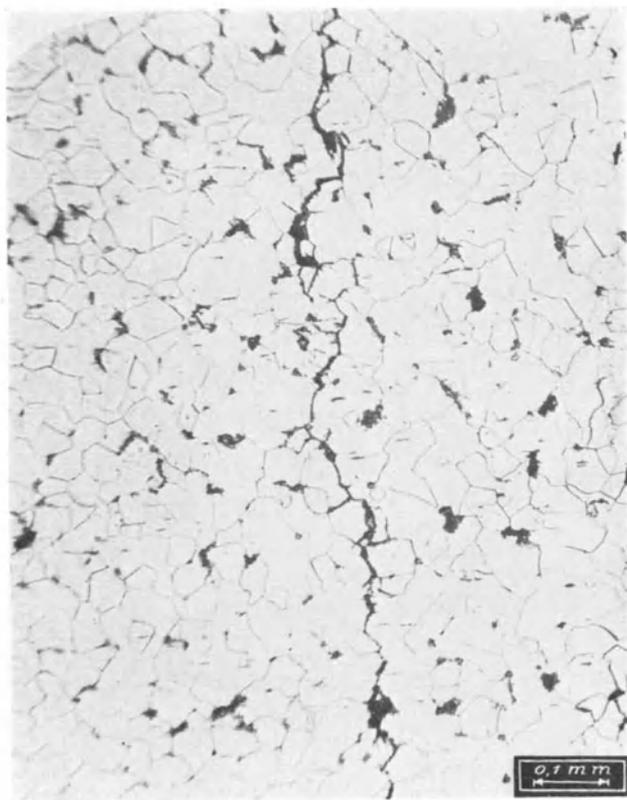


Abb. 5.

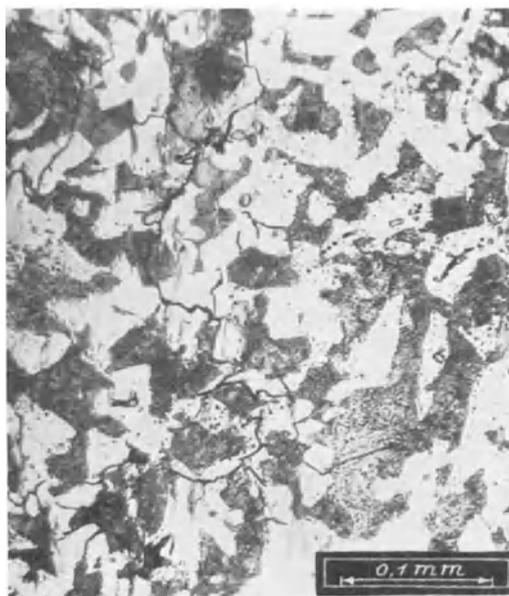


Abb. 6.

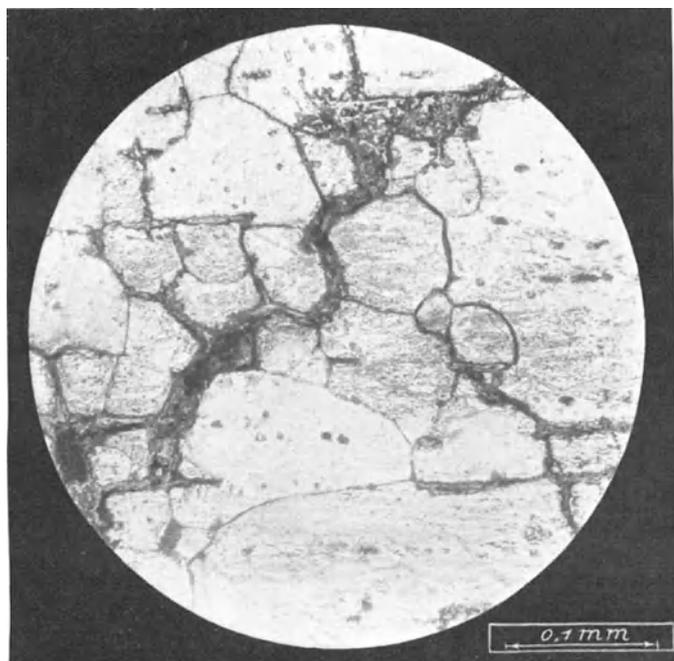


Abb. 7.

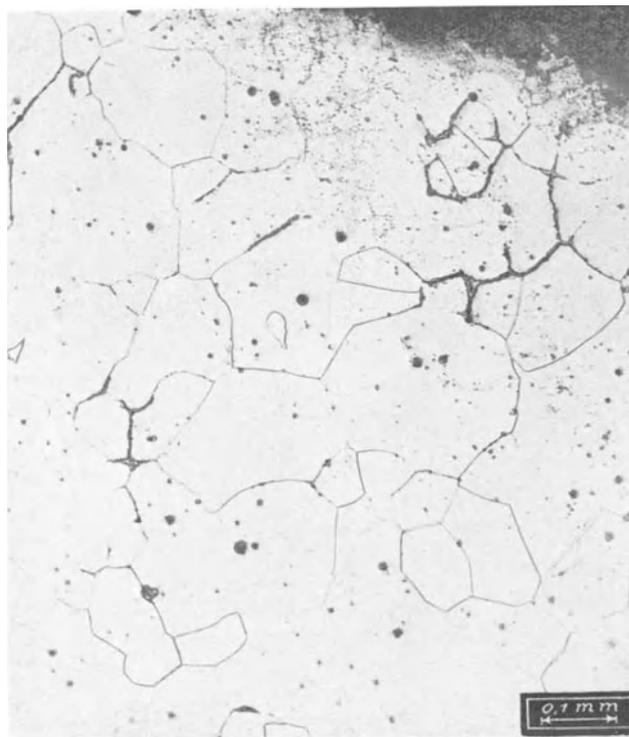


Abb. 8.

Zwei wesentliche Ursachen für Laugenbrüchigkeit.

Ein treffendes Beispiel wie groß die Unsicherheit über die Frage der Laugenbrüchigkeit in Amerika heute noch ist, gibt nachstehender Vortrag des Herrn F. B. Porter von den Fort Worth Laboratorien in Fort Worth, Texas, vor der amerikanischen Chemikergesellschaft in Tulsa. 5.—8. April 1926.

Kaustische Brüchigkeit ist ein Zustand beim Kesselstahl, dessen Hauptmerkmal darin besteht, daß der Stahl zeitweise brüchig ist und daß ein Reißen, das in den Nietlöchern beginnt, sich nach außen hin ausbreitet. Man hat viele Nietlöcher gefunden, bei denen man das Reißen nicht über den Nietkopf hinaus verfolgen konnte, d. h. also ungefähr $\frac{1}{2}$ Zoll weit. In anderen Fällen hat man Risse gefunden, die lang genug waren, daß sie Nietlöcher über eine Länge von 3—6 Fuß miteinander verbanden. Von dem Vorhandensein dieser langen Risse erhielt man erst Kenntnis, als die Lasche von der Trommel entfernt wurde, nachdem die Trommel aus dem Dienst genommen worden war. Diese Brüchigkeit und dieses Reißen ist als heimtückische Krankheit bezeichnet worden, die in einigen Fällen einen Angriff verursacht und in einigen anderen Fällen unter genau denselben Bedingungen dies nicht tut. Das Reißen ist immer unter der Wasserlinie festgestellt worden. Die Lecke, die infolge dieses Reißens entstehen, können gewöhnlich nicht durch Erneuerung der Nieten abgestellt werden. Es ist ein glücklicher Umstand, daß in den modernen Kraftanlagen ein derartiges Lecken bereits dazu genügt, daß der Kessel außer Dienst gestellt wird.

Das erste aufgezeichnete systematische Studium eines Falles dieser Art wurde im Jahre 1912 von der Universität von Illinois ausgeführt. Der Bericht eines Kesselfabrikanten aus dem Jahre 1915 führt 21 Fälle von Störungen an Kesseln zwischen 1897 und dem Datum des Berichtes an, von denen einige Explosionen waren. Alle ereigneten sich in dem Gebiet des weichen Wassers von Illinois und alle hatten die typischen Merkmale der Laugenbrüchigkeit. Für alle diejenigen, die den Gedanken der Laugenbrüchigkeit sich überhaupt zu eigen machten, wurde sie sehr schnell eine Erscheinung, die auf weiches alkalisches Wasser oder auf Wasser zurückzuführen sei, das beim Weichmachen überbehandelt worden war. Stromeyer hat nachgewiesen, daß im Flußeisen Risse infolge der Einwirkung von kaustischer Soda entstehen können, wenn der Stahl unter Zugbeanspruchung steht. Das Reißen trat nicht auf, wenn der Stahl unter Druck stand. Jones hat herausgefunden, daß Kalziumnitrat ein ähnliches Reißen verursacht. Die Wasserstofftheorie der Brüchigkeit ist in weite Kreise gedrungen und wohl

im allgemeinen auch angenommen worden. Die Arbeit von Williams und Homerberg in dem Massachusetts Institute of Technology hat diese Theorie näher mit Beanspruchungen und Unreinheiten im Stahl in Verbindung gebracht. Diese Arbeit erwähnt auch die mögliche Einwirkung von kaustischer Soda auf den intergranularen Zement. Eine große Menge Informationen über diesen Gegenstand hat sich angesammelt, man hat sie aber noch nicht in Wechselwirkung zueinander gesetzt. Jedenfalls hat ein Kesselfabrikant eng zusammengearbeitet mit der Universität von Illinois, bei der Bearbeitung der Schrift Nr. 94, dem Bureau of Standards, dem Massachusetts Institute of Technology, und wiederum mit der Universität von Illinois an irgendeiner noch nicht beendigten, unveröffentlichten Arbeit. Über die ganze Idee der kaustischen Brüchigkeit ist von Ingenieuren und Chemikern gelacht worden; aber das Erleben auch nur eines Falles einer derartigen Störung wird auch den größten Skeptiker überzeugen, daß dies ein tatsächlich vorhandener Zustand ist, der ein sorgfältiges Studium erfordert.

An der Universität von Illinois waren Kessel mit Unterbrechungen 12 Jahre lang bei 7 at Druck bei weichem alkalischen Wasser ohne Störung in Betrieb gewesen. Eine dreijährige Tätigkeit bei einem Druck von 10 at setzte drei Kessel außer Dienst, und soweit wir unterrichtet sind, hielten vier andere Trommeln denselben Dienst aus, ohne daß sie angegriffen wurden. Es gibt eine große Zahl anderer Kessel in Fort Worth, Dallas, Waco, McKinney, Houston, Baton Rouge, Louisiana und an anderen Stellen, die mit weichem alkalischen Wasser bei Drucken von 10—16 atü betrieben worden sind, die niemals Anzeichen einer Brüchigkeit aufgewiesen hätten. Die Wasser von Trinity Sands in Texas enthalten soviel Sulfat, daß sie etwa ein Verhältnis schaffen von drei Teilen Sulfat auf einen Alkalibestandteil, aber die anderen artesischen Wasser, die in den eben erwähnten Anlagen gebraucht werden, enthalten viel weniger Sulfat, einige von ihnen sogar nur einen sehr geringen Teil. In einer Anlage in Dallas, zwei Anlagen von den vier Anlagen in Houston, und in einer Anlage in Waco ist gelegentlich einmal eine Trommel durch Brüchigkeit verloren gegangen. In jedem Fall sind aber praktisch andere Trommeln, die genau denselben Dienst bei demselben Wasser zu verrichten hatten, immer noch in Dienst, während andere Anlagen, die genau dasselbe Wasser verbrauchten, unter dem Schaden überhaupt nicht gelitten haben.

Ein Bericht über die Anlage der Bloomington & Normal Street Railway, bei der an sechs Kesseln Schäden infolge von Brüchigkeit auftraten, schiebt die Ursache für die Brüchigkeit auf weiches, alkalisches Wasser, ohne daß jedoch der Stahl als ebenfalls zu dem Schaden beiträgend erwähnt wird. Aus diesem Bericht geht klar hervor, daß alle angegriffenen Kessel in zwei Sendungen aus der Kesselfabrik kamen, und daß ferner zwei andere Sendungen Kessel derselben Anlage, die offenbar dasselbe Wasser erhielten und denen auch dieselbe Behandlung zuteil wurde, von der Brüchigkeit nicht angegriffen wurden. Schäden infolge von Brüchigkeit, die vor einer Reihe von Jahren in der Brooklyn Rapid Transit Company Anlage auftraten, wurden dem Wasser zugeschrieben, wohingegen der diensttuende Chemiker feststellte, daß die Anlage, die unter der Brüchigkeit zu leiden hatte, während einer geringeren Zeitspanne und mit einer geringeren Konzentration von kaustischer Soda gearbeitet hatte als andere Anlagen, die dasselbe Wasser verwendeten und bei denen keinerlei Störung auftrat. Man fand heraus, daß der Stahl bei der Bearbeitung zu großen Spannungen unterworfen worden war, oder daß er im Walzwerk auf ungeeignete Weise geglüht worden war. Wir hatten Gelegenheit, ein mikrographisches Studium zu machen von drei örtlich weit auseinanderliegenden Fällen von Brüchigkeit, und in jedem Fall hatten Seidell-New York Laboratorien den Eindruck, daß das beobachtete Reißen auf die Beschaffenheit des Stahls zurückzuführen war, unabhängig von irgendeiner Einwirkung kaustischer Wasserbestandteile oder von Gasen, die durch solche Laugen hätten verursacht sein können.

Die Frage, worauf man die Ursache für diese besondere Art der Brüchigkeit zurückführen soll, ist wichtig, wenn man Vorbeugemittel in Vorschlag bringen will oder wenn man die Frage endgültig lösen will für Anlagen, bei denen sich Neuerungen erforderlich gemacht haben. Der Schaden tritt oft innerhalb von drei Jahren bis zu sechs Monaten von der Zeit an gerechnet auf, wo die Kessel in Dienst gestellt worden sind. Das Reißen tritt an Teilen auf, wo nur geringe Spannungen vorhanden sind. Die tatsächlichen Spannungen in Laschennähten sind, wenn der Kessel im Dienst ist, nur gering im Vergleich zu anderen Abschnitten des Kessels. Die Spannungen, die während der Fabrikation der Trommel in den um die Niete herumliegenden Teilen verursacht werden, können hoch sein. Es ist eine schwer zu entscheidende Frage, ob das an den Nähten leckende Kesselwasser verdunstet und eine hohe Konzentration hervorruft und hierdurch das Reißen verursacht, oder ob zuerst die Brüchigkeit anfängt, wodurch das Reißen verursacht wird, das seinerseits das Lecken zur Folge hat. Wenn zuerst die Lecke vorhanden sind, so macht es wahrscheinlich nur sehr wenig Unterschied, wie hoch die Konzentration des Kesselwassers ist, und zwar aus dem Grunde, weil eine Konzentration selbst bis

zu dem festen Zustand schnell eintreten kann in den Nähten, sobald einmal ein Leck vorhanden ist.

Der allgemeine Eindruck ist bisher gewesen, daß es nur überbehandeltes, weichgemachtes Wasser ist, das leicht Brüchigkeit hervorruft. Ein kürzlich vorgekommener Fall von Brüchigkeit, wo man mit Zeolit behandeltes Wasser verbraucht hatte, könnte allerdings darauf hindeuten, daß jedes weich gemachte Wasser eine der für die Brüchigkeit notwendigen Voraussetzungen bilden könnte. Die Erwähnung des Kesseldruckes und des intermittierenden Betriebes im Vergleich zum kontinuierlichen Betrieb, führt uns zu der allgemeinen Feststellung, daß wir glauben, daß höhere Drucke und intermittierender Dienst mit dazu beitragen können, daß die Wahrscheinlichkeit der Brüchigkeit vergrößert wird. Dies basiert jedoch lediglich auf den obigen Feststellungen, denn andererseits waren von Kesseln, die genau unter demselben Druck und mit demselben Wasser arbeiteten, einige angegriffen und andere nicht. Ein Druck von 10 atü, der an der Universität von Illinois den Verlust von vier Kesseln verursachte, muß als sehr niedrig für große moderne Anlagen angesehen werden.

Unter den früher vorgeschlagenen Heilmitteln, die aber nicht allgemein Eingang gefunden haben, waren organische Stoffe und Bichromate.

Sowohl die Kesselfabrikanten als auch die Verbraucher von Kesseln widmen heute dem Charakter des Stahls und seiner Herstellung größere Aufmerksamkeit. Dies ist auf Grund unserer heutigen Erkenntnisse über dieses Phänomen eine der besten Vorsichtsmaßnahmen, die man treffen kann. Noch drei weitere Schutzmittel sind in Vorschlag gebracht worden, und man benutzt sie heute, ohne daß man jedoch die absolute Gewißheit hat, daß sie diese Störungen verhindern werden. Es sind dies: Verstemmen der Innennähte der Kessel, wobei der Gedanke der ist, daß man verhindern will, daß alkalisches Wasser überhaupt in die Nähte eindringt und sich dort konzentriert; ferner geringe Alkalinität des Wassers im Kessel. — Selbst bei Verdampfern ist es bei den meisten weichgemachten und weich alkalischen Wässern eine schwierige Sache, die Alkalinität in dem Kessel auf unter 25 grains zu halten, der Grenze, die vorgeschlagen worden ist. Man hat drittens empfohlen, den Sulfatgehalt des Kesselwassers auf dem dreifachen Wert der Gesamtalkalität des Kesselwassers zu halten. In vielen Fällen kann dies aber nur geschehen, wenn man das Wasser mit Schwefelsäure behandelt. Die Verwendung von Natriumsulfat und Magnesiumsulfat hat sich als nicht zufriedenstellend erwiesen. Bei großen Anlagen mit Verdampferanlagen ist geplant, Wasser aus dem Kessel herauszuziehen, es mit Säure zu behandeln und es dann wieder in den Kessel zurückzugeben. Es ist eine gefährliche Maßnahme, in dem gereinigten Zusatzwasser oder Kesselwasser Säure zu verwenden, und zwar wegen des geringen Alkaligehaltes in diesem Speisewasser.

Zusammenfassend kann man also sagen, daß die einzige Erklärung für die Laugenbrüchigkeit und ihr Auftreten bei einigen Kesseln einer Anlage und ihr Fehlen bei anderen Trommeln derselben Anlage, ferner dafür, daß sie ganz fehlt bei sämtlichen Kesseln von anderen Anlagen, die genau dasselbe Wasser verwenden, die ist, daß der Stahl überbeansprucht und schlecht ist, wozu dann der Laugengehalt des Wassers erschwerend hinzukommt.

Beitrag zur Theorie der Laugenbrüchigkeit¹⁾.

Vortrag von S. W. Parr²⁾ und F. G. Straub³⁾, Illinois, in der 29. Jahresversammlung der American Society of Testing Materials vom 21. Juni 1926 in Atlantik City, N. Y.

Die Ursache der Brüchigkeit von Kesselblechen⁴⁾ und ihre Vermeidung.

Bearbeitet von Oberingenieur Dr.-Ing. e. h. M. Guilleaume, Ammoniakwerk Merseburg.

Dieser Aufsatz soll der 29. Jahresversammlung der Amerikanischen Gesellschaft für Materialprüfung (Philadelphia Pa., Spruce Street 1315) am 21. bis 25. Juni 1926 in Atlantik City N. Y. vorgelegt werden. Er ist als Manuskript gedruckt und bezweckt hauptsächlich die Anregung

¹⁾ Bemerkungen des Übersetzers: Der Sinn des Wortes „embrittlement“ wird durch das deutsche Wort „Brüchigkeit“ nicht völlig getroffen. Das englische Wort bezeichnet offenbar nicht nur einen Zustand, sondern auch den Vorgang, der allmählich zu dem Zustande führt. An einzelnen Stellen der Schrift ist offenbar unter „embrittlement“ auch die Folge der Brüchigkeit, nämlich die Zerstörung durch das Brüchigwerden, verstanden. Der Einfachheit des Ausdrucks halber ist das deutsche Wort „Brüchigkeit“ beibehalten worden, man möge immer dabei denken, daß es hier in der Hauptsache auf den Vorgang und die Folgen des Brüchigwerdens ankommt.

²⁾ Professor der angewandten Chemie, Universität Illinois, Urbana III.

³⁾ Assistent für besondere Versuche, Universität Illinois, Technische Versuchsstation, Urbana III.

⁴⁾ Veröffentlicht mit Erlaubnis des Direktors der Technischen Versuchsstation der Universität Illinois. Die Arbeit ist inzwischen als Bulletin 155 der Universität Illinois, Urbana, erschienen und kann von dort bezogen werden.

der Diskussion. Schriftliche Diskussionsanträge sind dem Sekretariat zur Vorlage bei der Versammlung zu übergeben. Der Aufsatz wird noch Korrekturen und Änderungen erhalten und darf weder ganz noch teilweise veröffentlicht werden, solange er nicht durch das Sekretariat der Gesellschaft freigegeben ist.

Drei Arten von Blechrissen werden unterschieden:

1. solche, die durch unmittelbares Zerfressen des Materials,
2. solche, die durch Ermüdung,
3. solche, die durch kaustische Lösungen

verursacht werden.

Jede dieser drei Arten hat ganz besondere Unterscheidungsmerkmale, die es möglich machen, Brüchigkeitsrisse, wenn sie gleichzeitig mit anderen vorkommen, zu erkennen. Es ist untersucht worden, ob die Brüchigkeit der Kesselbleche auf bestimmte Landstriche der Vereinigten Staaten beschränkt ist, es ist aber festgestellt worden, daß in manchen Fällen die Brüchigkeit auf die Behandlung des Speisewassers zurückgeführt werden muß. Daher ist es weniger wichtig, die Gegend, aus der das Wasser stammt, zu kennen, als vielmehr die Eigenschaften des Wassers selbst, weil sie unter Umständen eine Gefahr bedeuten.

Es wurde eine Untersuchungsmethode erdacht, bei der das Auftreten der Brüchigkeit willkürlich herbeigeführt werden konnte. Dadurch war man in der Lage, sowohl die Bedingungen, unter denen sie eintritt, als auch die Mittel zur Verhinderung zu studieren. Die Ergebnisse der Studien zeigen, daß zwei Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein müssen, wenn Brüchigkeit hervorgerufen werden soll:

1. eine Streckung des Metalls über die Streckgrenze hinaus,
2. eine Konzentration von Ätznatron von mehr als 350 g im Liter.

Gleiche Versuche ohne Ätznatron ergeben keine Wirkung. Versuche mit verschiedenen Metallsorten, vom reinsten, das zu erhalten war, bis zu einem solchen mit einem hohen Gehalt von Verunreinigungen, zeigten, daß die Verunreinigungen die Bedingungen nicht verändern.

Soweit die Versuche hier ergeben haben, zeigen sie, daß eine Hemmung der Brüchigkeit erreicht würde, wenn die örtlichen Spannungen ausgeschaltet werden könnten. Dies ist jedoch wohl unmöglich. Die Veränderung oder die Kontrolle der chemischen Eigenschaften des Wassers hingegen erwies sich als wirksam. Angaben von in Betrieb befindlichen Anlagen, die sich über eine Periode von 10 Jahren erstrecken, stimmen insofern mit den Ergebnissen der Versuche zur künstlichen Herbeiführung von Brüchigkeit überein, als bei Innehaltung eines Verhältnisses von Natriumsulfat zu Ätznatron über den Wert 2 hinaus eine Brüchigkeit nicht mehr eintrat. Freies Natriumkarbonat im Wasser erzeugt an sich keine Brüchigkeit, aber es ist gefährlich, weil es durch Hydrolyse in Ätznatron verwandelt werden kann.

Photographien von Fällen, bei denen Brüchigkeit im Betrieb aufgetreten war, und zwar in weit auseinanderliegenden Gegenden, von Buffalo bis nach Südkalifornien und von Michigan bis nach Texas, zeigen die weite Verbreitung dieser Schwierigkeit. Mikroskopische Bilder beider Arten von Rissen, sowohl der natürlich entstandenen wie der künstlich hervorgerufenen, ermöglichen ihre genaue Kennzeichnung und veranschaulichen ihre charakteristische Eigenart.

1. Einführung.

In den letzten Jahren wurde eine hier und da auftretende Erscheinung bekannt, die man als „Brüchigkeit des Kesselbleches“ bezeichnet. Bei dem verhältnismäßig seltenen Vorkommen dieser Schwierigkeit und ihrer mehr oder weniger dunklen Ursache wurde die Tatsache der Brüchigkeit vielfach nicht anerkannt. Sowohl der Beweis für ihr Vorhandensein wie auch die Bedingungen, unter denen sie eintritt, sind jedoch heute von besonderer Wichtigkeit. Dies wird noch mehr betont durch die Tatsache, daß sich anscheinend in den letzten Jahren die Zahl der Kesselschäden, für die die Brüchigkeit verantwortlich zu machen ist, vermehrt hat.

Es muß zunächst erwähnt werden, daß die hier vorliegenden Studien von der Technischen Versuchsstation der Universität Illinois als Fortsetzung früherer Forschungen durchgeführt wurden, und zwar unter Bedingungen, welche jede Möglichkeit ausschlossen, daß die geleistete Arbeit einem geschäftlichen Sonderinteresse irgendeiner gewerblichen oder industriellen Unternehmung diene, vielmehr sollte sie allen denjenigen zugute kommen, die entweder bei der Energieerzeugung oder bei der Herstellung von Kesseln beteiligt waren. Besondere Anerkennung verdienen alle Quellen für unsere Erfahrungen. Unter streng neutralen Bedingungen wurde eine umfassende Menge von Angaben zur Verfügung gestellt. Wo immer auf solche Angaben Bezug genommen wird, geschieht dies mit ausdrücklicher Erlaubnis der daran Interessierten. Wo die Angabe von Bezugsquellen vorenthalten wird, möge man annehmen, daß dies als zweckmäßig erschien. Kurz gesagt, man hat versucht, sowohl bei der Sammlung der Er-

fahrungen wie bei der Gewinnung von Versuchszahlen Methoden anzuwenden, die die Echtheit der Tatsachen und den uneigennütigen Charakter der erlangten Versuchsergebnisse außer Diskussion stellen.

2. Die Entwicklung des Begriffes „Brüchigkeit“.

Es wird hierbei nicht nötig sein, einen Überblick über die geschichtliche Entwicklung der Erscheinung der Brüchigkeit zu geben. Jeder Bücherkatalog genügt dazu. Aber es muß darauf hingewiesen werden, daß bei den anfänglichen Erfahrungen auf diesem Gebiete Zusammenhänge angenommen wurden mit den Schäden an bearbeiteten Metallen in Fabrikationsvorgängen, bei denen ätzende Lösungen arbeiten, wie z. B. bei der Herstellung oder bei dem Gebrauch von Ätznatron. Unter diesen Umständen gebrauchte man den Ausdruck „kaustische“ (ätzende) Brüchigkeit. Es wurde bald klar, daß eine gewisse Beziehung besteht zwischen der Brüchigkeit, die von wirklich ätzenden Lösungen herrührte, und der Brüchigkeit, die bei Kesselwässern auftritt. In der Tat erwies sich bei solchen Kesseln das verwendete Wasser als kaustisch. Der übliche Ausdruck „kaustische“ Brüchigkeit, der oft für solche Fälle angewendet wurde, erschien daher bei den vorliegenden Kesseln zwar berechtigt, trotzdem aber wurde hier nur der allgemeine Ausdruck „Brüchigkeit“ benutzt. In diesem Zusammenhange sei auf eine früher veröffentlichte Forschungsarbeit der Technischen Versuchsanstalt der Universität Illinois verwiesen¹⁾. Mit dieser Arbeit wurde der Versuch gemacht, eine Beziehung zwischen ätzenden Lösungen und der brüchigmachenden Wirkung festzustellen. Auch wurden kurze Bemerkungen gemacht (S. 13 und 46 des Berichtes) über die Mittel, die eine Verhinderung der Schwierigkeit ermöglichen. Es ist aber zu berücksichtigen, daß zur Zeit der Veröffentlichung des Berichtes Nr. 94 unsere Kenntnisse von der Ursache der Brüchigkeit und den Mitteln zu ihrer Verhütung noch sehr dürftig waren. Diese Tatsache war auch für die Wiederaufnahme der Studien auf diesem Gebiete ausschlaggebend. Die anscheinend gesteigerte Zahl von Kessel-schäden muß ferner als Grund für die Wiederaufnahme der Arbeiten angeführt werden.

Zunächst beschloß man eine kritische Übersicht über die Lage anzufertigen mit der Absicht, über jeden Zweifel hinaus die Tatsachen für und gegen das wirkliche Vorhandensein einer solchen Erscheinung wie die Brüchigkeit festzustellen.

Bei den Diskussionen über die den Gegenstand behandelnden Berichte, mochten sie die Brüchigkeit als eine wirkliche Tatsache bezeichnen oder von dem Märchen von der Brüchigkeit sprechen, machte sich nämlich beharrlich ein gewisser Zweifel am wirklichen Vorhandensein der Brüchigkeit bemerkbar. Daher richteten sich die Arbeiten in ihrem ersten Stadium auf die Feststellung des Vorhandenseins oder Nichtvorhandenseins der Erscheinung.

Zur Erforschung der Brüchigkeit erachtete man es daher für wesentlich, zunächst die Erkennungsmethode zu entwickeln, die unbedingt zuverlässig war und die ermöglichte, solche Erscheinungen von anderen, mit ähnlichen oder verwandten Bedingungen zu unterscheiden. Dies führte unmittelbar zur Erforschung der Risse an gewalztem oder sonst bearbeitetem Blech. Die Forschungen in dieser Richtung haben entdeckt, daß drei Arten von Rissen vorkommen:

1. Korrosionsrisse,
2. Ermüdungsrisse,
3. Brüchigkeitsrisse.

Jede dieser drei Arten ist verschieden und kann bestimmt unterschieden werden von den anderen mit Hilfe der mikroskopischen Untersuchungen. Ihre wesentlichen Eigentümlichkeiten sollen im folgenden kurz beschrieben werden.

3. Korrosionsrisse.

Wie der Name besagt, sind solche Risse verursacht durch unmittelbare Korrosion (Zerfressen) des Metalls. Es ist wohl bekannt, daß zwischen Metallteilchen, die in ihrer chemischen Zusammensetzung, ihren physikalischen Eigenschaften, ihren Beanspruchungen, ihrer Dichte, ihrem Gehalt an Verunreinigungen verschieden sind, eine elektrische Potentialdifferenz besteht, die in elektropositiver Ladung des einen und negativer Ladung des anderen Teiles sich äußert. Diese Potentialdifferenz ergibt einen galvanischen Strom. In Gegenwart eines Elektrolyten beginnt dann eine auflösende Wirkung am positiven Pol. Hierbei entwickelt sich eine Korrosion. Die Korrosionsriefen werden, wie naturgemäß zu erwarten, bei Metall, welches durch Kräfte beansprucht ist, der Richtung der Kräfte folgen. Da ferner Elektrolyten mit lösender Wirkung so ionisiert sind, daß die Wasserstoffionen vorherrschen, so finden wir solche Beispiele von Korrosionen in Gegenwart von Elektrolyten, wie Nitraten, Chloriden und Sulfaten. Die Korrosionserscheinungen werden verhindert, wenn Hydroxylionen vor-

¹⁾ Brüchigkeit, eine Wirkung von Ätznatron auf weiches Flußeisen. Bericht Nr. 94.

handen sind, mit anderen Worten, bei alkalischer Natur des Elektrolyten. Dadurch ist es erklärlich, daß wir keine Risse bei alkalischen Kesselspeisewässern zu erwarten brauchen. Eine Studie der chemischen Zerstörung, wie sie oben beschrieben wurde, bedarf zwar nicht notwendig der metallographischen Untersuchung der Struktur der zerstörten Metalloberfläche. Die beigefügten Bilder (Abb. 1 a u. b) zeigen aber trotzdem die Oberfläche von Rissen dieser Art in Vergrößerung und natürlicher Größe. Als eine besondere Eigentümlichkeit ist in der Vergrößerung festzustellen, daß die Richtung der Riefen den Beanspruchungslinien folgt, und zwar ohne Rücksicht auf die Kornfläche, mit anderen Worten: sie erstrecken sich quer durch die Körner durch und lassen die Korngrenze bei ihrer Entwicklung unbeachtet.

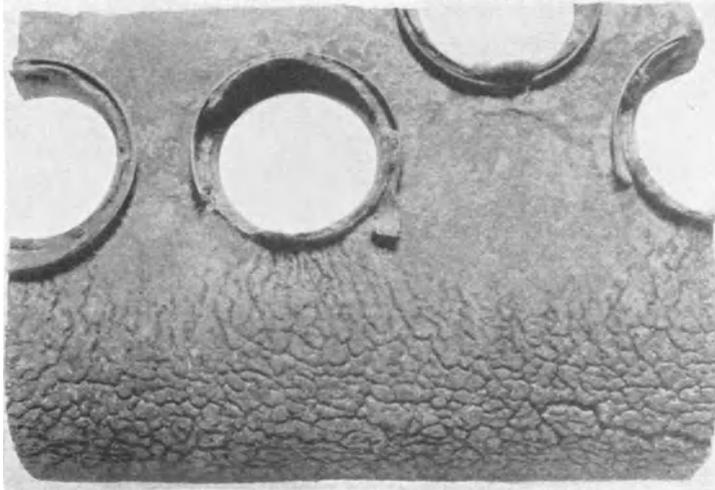


Abb. 1 a. Korrosionsrisse.



Abb. 1 b. Korrosionsriß, 50fach vergrößert.

4. Ermüdungsrisse.

Die nähere Betrachtung von Rissen, die durch Zugbeanspruchungen allein hervorgerufen sind, liefert interessantes und anschauliches Material. Für das Studium der Metallrisse ist aus dem überreichlich vorhandenen Material dieser Art, welches von den Ermüdungsforschungen der Metalllaboratorien herrührt, hier eine Abbildung (Abb. 2) beigefügt im Hinblick auf ihre Beziehung zur allgemeinen Natur der Blechrisse. Es scheint, daß in Metallen, die häufig wechselnder Belastung ausgesetzt sind, beim Herannahen des Bruches sich Risse entwickeln, die unter dem Mikroskop eine ganz bestimmte Eigenart aufweisen. Dies liefert eine bequeme Methode zu ihrer Erkennung. Bei der Prüfung einiger typischer Proben sieht man deutlich daß Risse, die eine Folge der Ermüdung sind, die Körnerstruktur des Bleches nicht beachten, sondern einen von Korngrenzen ganz unabhängigen Verlauf nehmen. Sie sind daran zu erkennen, daß sie bei ihrer Entwicklung quer durch die Körner und nicht zwischen den Körnern durchgehen.

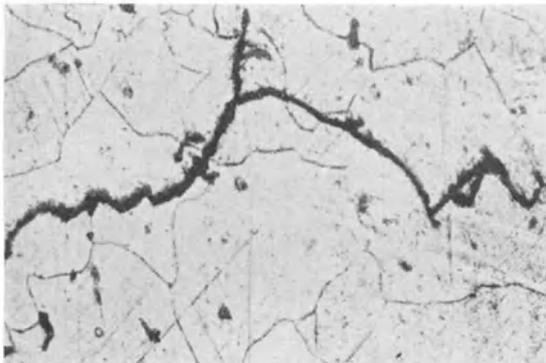


Abb. 2. Ermüdungsriß (transkristalliner Verlauf). V = 350.

5. Brüchigkeitsrisse.

Wir sind jetzt imstande, die Risse, die in Begleitung der Brüchigkeit auftreten, von den oben beschriebenen zu unterscheiden. Die Mikrophotographie zeigt nämlich ihre ganz besondere Eigenart, die, wie man gefunden hat, in allen Fällen diesen Rissen eigen ist. Bei allen Vergrößerungen von Brüchigkeitsrissen, besonders wenn die Oberfläche des Metalls so geätzt wird, daß die Korngrenzen klar hervortreten, zeigt sich deutlich, daß diese Brüchigkeitsrisse ohne Ausnahme den Korngrenzen folgen. Zwei typische Vergrößerungen machen dies in Abb. 3 a und b anschaulich.

Mit dieser Methode, mit der man sehr zuverlässig jeden der Risse an Kesselblechen bestimmen kann, ist es möglich gewesen, eine ausgedehnte Überwachung ihres Vorkommens

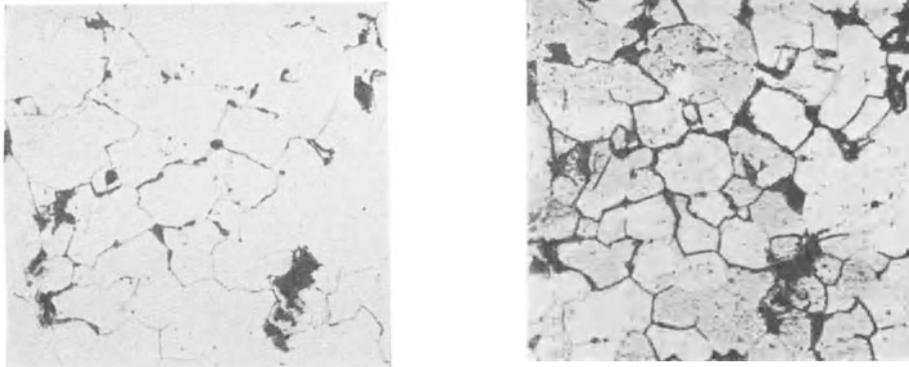
durchzuführen, sowohl geographisch als auch vom Gesichtspunkte der Fabrikation und der Wasserbehandlung.

Es dürfte bei dem hier verfügbaren Raum nicht möglich sein, im einzelnen das erschöpfende Beweismaterial für die Brüchigkeit und ihre Folgen, welches sich angesammelt hat, anzuführen. Nur einige typische Beispiele sollen genannt werden:

Im allgemeinen sind die Fälle von Brüchigkeit nach zwei Richtungen zu unterscheiden:

1. nach den Örtlichkeiten, an denen besondere Arten von Wässern vorkommen,
2. nach der Behandlung des Wassers mit Chemikalien, die eine Brüchigkeit zur Folge haben.

Bezüglich des ersten Gesichtspunktes ist es klar, daß gewisse Landstriche bestimmt werden könnten, in denen die Brüchigkeit deutlicher auftritt als in anderen, wo Brüchigkeit nicht



a) Ungeätzt.

b) Geätzt.

Abb. 3. Brüchigkeitsrisse, den Korngrenzen folgend.



Abb. 4.

vorkommt. Die Wässer dieser Landstriche sind dadurch gekennzeichnet, daß die Sulfate meist vollständig fehlen. Diese Erscheinung ist aber von einer anderen, sehr deutlich erkennbaren begleitet, einer, die in erster Linie für die brüchigmachende Wirkung verantwortlich zu machen ist, nämlich der Anwesenheit von freiem Natriumbikarbonat. Daraus geht hervor, daß diese Wässer nur vorübergehende Härte haben, infolge der Gegenwart der Bikarbonate von Kalk, Magnesia und Eisen, und daß die Sulfate dieser Stoffe im wesentlichen fehlen. Die Lage solcher Gegenden kann man, ohne ihre Grenzen genau umschreiben zu wollen, ganz allgemein festlegen, wie in der Landkarte Abb. 4 geschehen. Das ist nun nicht notwendigerweise so zu verstehen, als ob wir behaupten wollten, mit diesen Angaben all die Örtlichkeiten zu erfassen, wo wir auf Wasser solcher Art stoßen, denn es ist eine Tatsache, daß man seit dem

zunehmenden Übergang von Oberflächenbrunnen zu tieferliegenden Versorgungsquellen fast in jeder Gegend auf Wasser von isolierten Brunnen stößt, die keinen Zusammenhang mit dem betreffenden Landstrich haben.

Im zweiten Falle ist, wie wir später sehen werden, die Zahl der Ursachen der Brüchigkeit, die auf die Wasserbehandlung zurückzuführen ist, zwar verhältnismäßig klein, aber man sollte

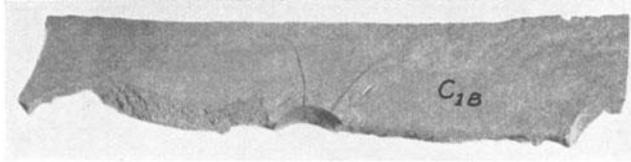


Abb. 5. Stück eines gerissenen Kesselbleches.

jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es nur einen bestimmten Fall dieser Art darstellt.

Aber noch zwei andere Seiten des Problems bedürfen einer kurzen Erwähnung.

1. Die Beschränkung der Schädigung auf eine besondere Bauart des Kessels ist ganz ohne bestätigende Beweiskraft. Damit wollen wir sagen, daß wir Beispiele für die Brüchigkeit an Kesseln der verschiedensten Herstellungs- und Bauarten in genügender Zahl gefunden haben, um sicher festzustellen, daß die Brüchigkeit nicht beschränkt ist auf eine besondere Herstellungs- oder Bauart. Alle Standardbauarten von Feuer- und Wasserrohrkesseln sind bei der Untersuchung vertreten gewesen.

2. Ein heftiger Streit hat sich um die Frage erhoben, ob die Brüchigkeit nicht auf eine fehlerhafte Zusammensetzung des Eisens zurückgeführt werden kann. Diese Frage scheint in unseren Forschungen dahingehend entschieden worden zu sein, daß Brüchigkeit ohne Rücksicht auf die Verunreinigungen oder die chemische Zusammensetzung des Kesselbleches vorkommt und daß eine Erklärung der Brüchigkeitsschäden, bei der man versucht, sie auf die Fehlerhaftigkeit des Eisens zu schieben, ohne tatsächliche Grundlage ist. Damit wollen

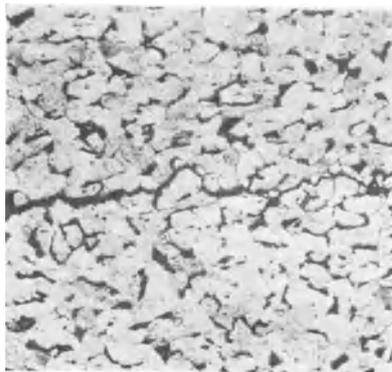


Abb. 6a. $V = 100$.

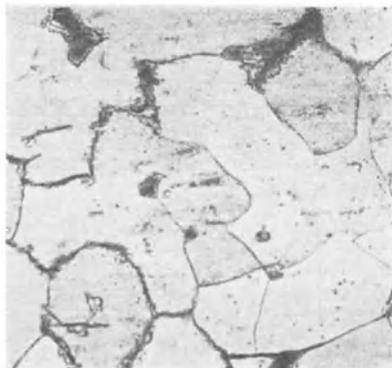


Abb. 6b. $V = 500$.

Abb. 6a u. 6b. Brüchigkeitsrisse.

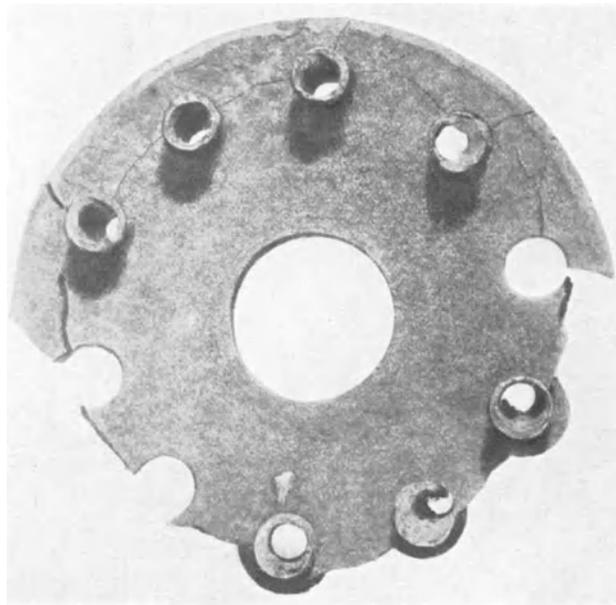


Abb. 7. Gerissener Flansch.

wir sagen, daß die Brüchigkeit nicht beschränkt ist auf fehlerhaftes und unreines Eisen, sondern daß sie ganz übereinstimmend im besten Eisen sowohl wie in dem geringerer Güte vorkommt. Die Abb. 6a und b soll zur Illustrierung dieser Tatsachen dienen.

6. Zusammenfassung der wesentlichsten Merkmale der Brüchigkeit.

Die ins Auge springenden wesentlichen Merkmale der Brüchigkeit werden noch besser verstanden werden auf Grund einer Übersicht über die typischen Bilder, die den zahlreichen zu unserer Kenntnis gekommenen Fällen entnommen sind. Abb. 7 z. B. ist ein Abblaseflansch. Aus der Häufigkeit, mit der diese Art der Schädigung vorkommt, mag geschlossen werden, daß die Schwierigkeit durch die Erschütterung beim Abblasen noch besonders erhöht wird.

Abb. 8 ist die Außenseite einer Trommel, bei der 26 Nietköpfe durch kräftige Hammerschläge abgeschlagen worden sind. Abb. 3 und 6 zeigen metallographische Untersuchungen der Brüchigkeitsrisse an den gleichen oder ähnlichen Kesselblechen, die im Betrieb schadhaft wurden.

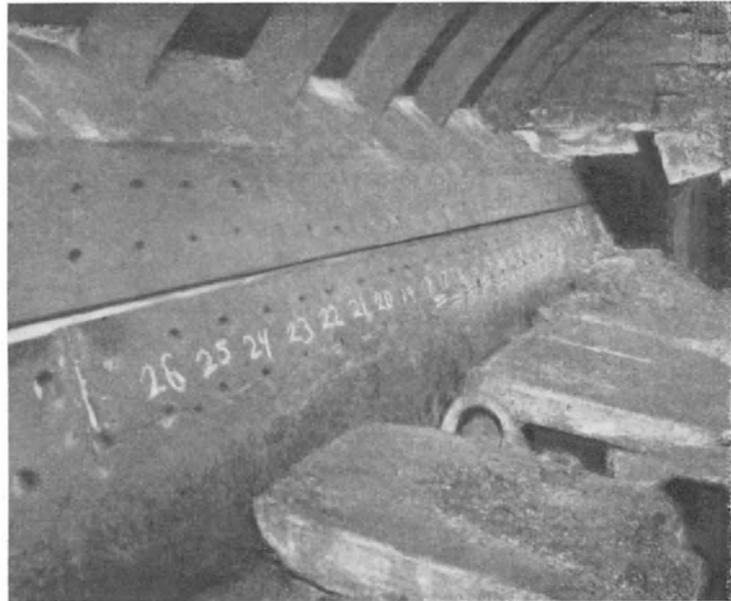


Abb. 8.

Das wesentliche an diesen Rissen ist wie folgt zusammenzufassen:

1. die Richtung der Risse entspricht nicht der Richtung, in der die höchste Beanspruchung erfolgt,
2. die Risse beginnen an der vom Wasser nicht berührten Seite des Bleches,
3. die Risse gehen im allgemeinen von Nietloch zu Nietloch, obgleich sie öfter auch eins auslassen, indem sie gleichsam Blechinseln stehen lassen,
4. die Risse sind unregelmäßig in ihrer Richtung,
5. die Risse erstrecken sich niemals in das volle Blech über die Nietnaht hinaus,
6. ein Wachsen der Bleche kommt nicht vor,
7. wo eine außergewöhnlich starke Wirkung eingetreten ist, platzen die Nietköpfe ab oder sind mit einem leichten Hammerschlag ohne Mühe zu beseitigen.

Die Bedingungen für die Lage der Risse im Kessel können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. die Risse liegen immer unterhalb des praktischen Wasserspiegels,
2. alle Risse befinden sich an beanspruchten Nietnähten,
3. sie treten an Stellen auf, an denen die höchsten örtlichen Beanspruchungen vorhanden sind,
4. die Risse treten auf an Blechen mit praktisch einwandfreier chemischer Zusammensetzung sowohl als auch in solchen von geringer Güte.

Zahlentafel 1 enthält die chemische Analyse von Kesselblechen, an denen einige typische Fälle von Brüchigkeit eingetreten sind. Es dürfte von Interesse sein, diese Analyse mit solchen von Standardproben von hochwertigem Material zu vergleichen, die uns unmittelbar vom Hersteller geliefert wurden zur Lösung einer späteren Aufgabe, nämlich für die willkürliche Erzielung der Sprödigkeit beim Laboratoriumsversuch.

Die chemischen Bedingungen, die für Kesselspeisewässer, in denen Sprödigkeit eintritt, wesentlich sind, sind kurz gefaßt folgende:

1. Natriumkarbonat muß immer im Speisewasser vorhanden sein,
2. Sulfathärte ist gewöhnlich abwesend, oder mit Rücksicht auf das vorhandene Natriumkarbonat nur in geringem Maße vorhanden, Natriumsulfat ist ähnlich in geringem Maße vorhanden wie Natriumkarbonat,

Zahlentafel 1. Chemische Analyse von Kesseln, die durch Sprödigkeit gerissen sind.

Aufstellungsort der Kessel	Kohlenstoff %	Mangan %	Phosphor %	Schwefel %
Bloomington III	0,17	0,26	0,015	0,046
Hartland III	0,22	0,39	0,017	0,024
Champaign III	0,20	0,50	0,005	0,024
Los Angeles, Californien	0,22	0,54	0,013	0,036
Houston, Texas	0,26	0,34	0,014	0,025
Railway	0,14	0,37	0,018	0,018

3. Kessel, die von solchen Schäden betroffen worden sind, gebrauchten Wasser nach den wesentlichen Eigenschaften unter 1. und 2. Als eine Folge der chemischen Reaktion im Kessel entwickeln sich dort kaustische Eigenschaften mit Ätznatron im Überschuß über etwa vorhandenes Natriumsulfat.

Zahlentafel 2 gibt die Analyse von Brunnenwässern, die in brüchig gewordenen Kesseln verwendet wurden.

Zahlentafel 2.

Analyse von Brunnenwässern, mit denen Kessel, die durch Sprödigkeit gerissen sind, gespeist wurden, in mg pro Liter.

	Bloomington III	Urbana and Champaign III	De Kalb III	Mc Henry County III	Watseka III	Paxton III	Sycamore III	Los Angeles, Kalif.	Dallas, Texas	Denver, Colo	Houston, Texas
Kalziumkarbonat	250	263	222	169	150	269	249	96	40	16	70
Magnesiumkarbonat	184	171	127	140	81	179	169	1	27	7	0
Natriumkarbonat	86	122	106	84	238	107	54	208	586	161	192
Natriumsulfat	0	3	2	0	22	64	4	154	322	40	0
Natriumchlorid	104	13	3	10	15	7	6	138	123	19	327
Eisenoxyd u. Aluminiumoxyd	3	3	2	14	2	1	5	—	—	1	0
Silizium	15	22	11	6	8	49	32	26	68	17	—
Gesamt feste Stoffe	642	597	473	423	516	675	519	623	1166	261	589

7. Die versuchsmäßige Herbeiführung der Brüchigkeit.

Es wird sofort einleuchten, daß eine Methode, mit der man die Erscheinungen der Brüchigkeit willkürlich herbeiführen könnte, ein bequemes Mittel wäre, um sowohl die Ursache der Schwierigkeit, als auch Mittel für ihre Beseitigung zu finden. Interkristalline Risse sind bei weichem Stahl eine ganz abnormale Erscheinung. Wenn folglich weicher Stahl zum Bruch gebracht werden kann unter Bedingungen, die man willkürlich bemessen oder beeinflussen kann, und unter solchen Bedingungen, die gleichartig denen der wirklichen Vorgänge im Kessel sind, so wären Ursache und Abhilfe auf dem besten Wege zur Lösung.

Wie wertvoll die unmittelbare Erlangung von Erkenntnissen auf diesem Wege ist, wird beleuchtet durch das einzige andere Mittel. Dies ist der langfristige Versuch mit Kesseln, die in wirklichem Betrieb sind. Da Brüchigkeit unsichtbar und in manchen Fällen sehr langsam eintritt, so ist es sofort klar, daß die letztere Methode des Versuches meistens hoffnungslos ist wegen der dazu nötigen Zeiträume. Es ist jedoch zu betonen, daß ein solcher Versuch, der sich über die Zeit erstreckt, die seit der Veröffentlichung des letzten Berichtes verflossen ist — nämlich 10 Jahre —, erfolgreich gewesen ist. Alle Ergebnisse in diesem Zusammenhang stimmen damit überein und sind in der Tat beweiskräftig geworden durch die Ergebnisse der kurzfristigen Laboratoriumsversuche.

Der Apparat, mit dem man zuletzt die Brüchigkeit versuchsmäßig herbeiführte, ist in Abb. 9 abgebildet. Er besteht aus einem Behälter *A* aus gezogenem Stahl, der die Lösungsflüssigkeit enthält, und der Einrichtung zur Hervorbringung der Materialspannung *B*. Die Spannung wurde hervorgebracht und dauernd beibehalten mit Hilfe der Feder *C* und des Tauchkolbens *D*. Die Stopfbüchse *E* läßt den Tauchkolben dampfdicht in den Behälter eintreten. Der Probestab ist mit *F* bezeichnet. Der Teil *B* ist in *A* befestigt und durch Bolzen, die hier nicht angegeben sind, gesichert. Temperatur und Druck werden den Verhältnissen entsprechend durch einen elektrischen Heizkörper auf konstanter Höhe gehalten.

Zahlentafel 3. Chemische Analyse der untersuchten Metalle.

Bezugsquelle	Bezeichnung	Kohlenstoff %	Mangan %	Phosphor %	Schwefel %	Silizium %	Nickel %	Molybdän %
F. S.	Flanschenstahl	0,18	0,45	0,012	0,027	—	—	—
Armco	Armcoeisen	0,023	0,017	0,003	0,010	0,01	—	—
M. Z.	Magneteisen	0,04	0,020	0,004	0,007	0,07	—	—
C. R.	Kalt gerollt	0,30	0,42	0,015	0,044	0,04	—	—
1112	S. A. E. 1112	0,15	0,76	0,215	0,126	0,01	—	—
2312	S. A. E. 2312 ¹⁾ 2)	0,115	0,45	0,018	0,025	0,20	3,5	—
2212	Spezial ¹⁾ 2)	0,13	0,45	0,018	0,020	0,26	1,57	0,25
2330	S. A. E. 2330 ²⁾	0,30	0,478	0,023	0,015	0,05	3,42	—

1) Geliefert durch Central Steel Co., Manillon Ohio.

2) Auf 6,4 mm flach geschnitten von 31,8 mm Durchmesser.

Zahlentafel 4. Zerreißversuche mit den untersuchten Materialien.

Bezugsquelle	Bezeichnung	Wärmebehandlung	Elastizitätsgrenze kg/qcm	Streckgrenze kg/qcm	Zugfestigkeit kg/qcm	Querschnittsverminderung %
F. S.	Flanschenstahl	wie erhalten	2290	2480	4240	61
Armco	Armcoeisen	ausgeglüht 950°	2250	3850	3700	70
M. I.	Magneteisen	„	1758	2110	3560	72
C. R.	Kalt gerollt	wie erhalten	4930	5900	6010	55
C. R. A.	Kalt gerollt	ausgeglüht 850°	—	2560	4550	56
1112	S. A. E. 1112	„ 900°	3340	3450	5200	75
2312	S. A. E. 2312	„ 900°	2600	2810	5260	75
2212	Spezial	„ 900°	2460	2590	5280	75
2330	S. A. E. 2330	„ 850°	2880	3460	5440	57

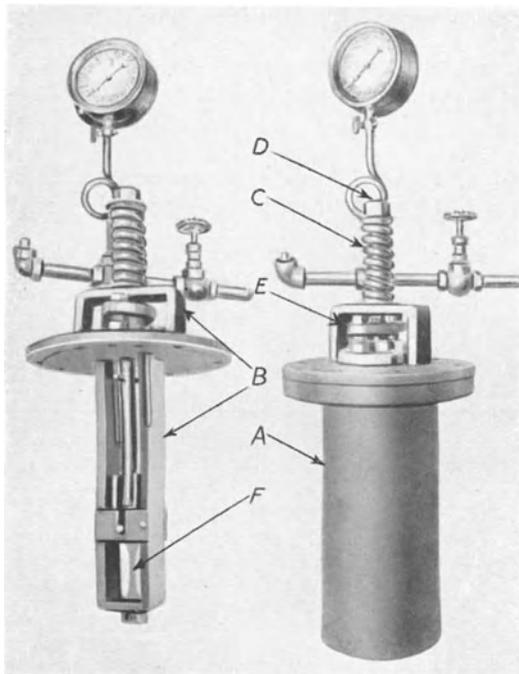


Abb. 9. Apparat zur versuchsmäßigen Erzeugung von Brüchigkeit.

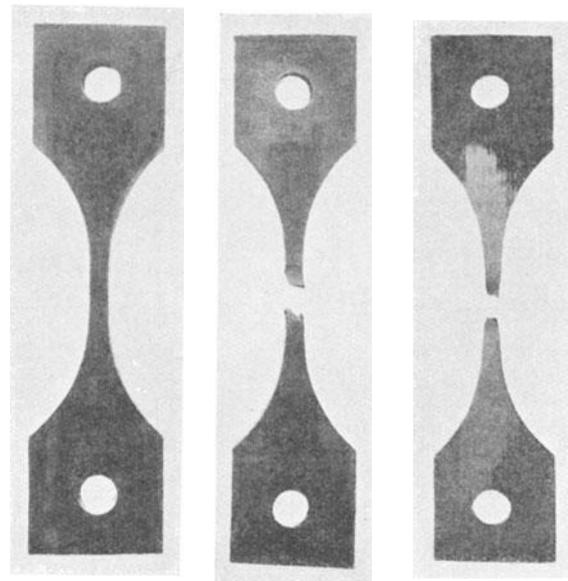


Abb. 10a—c. Form der Probestäbe F, Abb. 9.

Als Material für die Brüchigkeitsversuche wurde ein weicher Stahl verwendet. Zahlentafel 3 enthält die chemischen Analysen und die Herkunftszeichen der verschiedenen untersuchten Materialien. Zahlentafel 4 enthält die physikalischen Eigenschaften der Metalle. Die zu prüfenden Materialstäbe hatten die in Abb. 10a—c gezeigte Form. Bei der Herstellung der Probestäbe wurde sorgfältig darauf geachtet, daß die Löcher genau in der Mittellinie lagen, so daß die Zugbeanspruchungen gleichmäßig verteilt waren. Die Versuchsstäbe wurden zuletzt noch mit Schmirgelpapier Nr. 1 am schmalen Teil blank poliert. Hierbei war die Richtung der Politur parallel zur Längsrichtung des Stabes.

Der zu prüfende Probestab wurde mit einem Mikrometer gemessen und sein Querschnitt berechnet. Die zur gewünschten Zugbeanspruchung nötige Belastung wurde berechnet und danach die Spannung der Normalfeder zur Erzeugung der berechneten Belastung bestimmt. Der Probestab wurde dann in den Halter gesetzt und mit dem Kolben durch einen Stift verbunden. Der Kolben selbst wurde durch Niederschrauben der Schraube an seinem oberen Ende angespannt. War dann die Feder auf richtige Länge zusammengedrückt, so wurde die Stopfbüchse gedichtet und der obere Teil der Apparatur in den Behälter eingeführt. In diesen war vorher die gewünschte Flüssigkeitslösung gefüllt worden.

Die Teile wurden fest miteinander verschraubt, in den elektrischen Ofen gebracht und bis zum gewünschten Druck erhitzt. Druck, Temperatur und Federlänge wurden in gleichmäßigen Zeitabständen aufgeschrieben. Wenn die Brüchigkeit plötzlichen Bruch des Probestabes herbeiführte, so zog die Feder den Kolben hoch und zeigte so den Bruch des Probestabes an.

Es wurde festgestellt, daß das Loslösen in allen Fällen augenblicklich und ohne Anzeichen einer langsamen Dehnung erfolgte.

Der mittlere Querschnitt der Probestäbe betrug 0,323 qcm. Die Einstellung der Belastung geschah etwa mit einer Genauigkeit von 70 kg/qcm bei einer Gesamtzugkraft von 2812 kg/qcm.

Bei der Berechnung der Zugkraft wurde die zusätzliche Zugkraft des Dampfdruckes am Kolben außer acht gelassen.

8. Die Ergebnisse der Brüchigkeitsversuche.

Die Ergebnisse der Versuche mit den verschiedenen Materialproben sind in Zahlentafel 5—9 einschließlich zusammengestellt. Sie zeigen, daß zwei Bedingungen gleichzeitig erfüllt sein müssen, um eine Brüchigkeit des Stahls herbeizuführen:

1. die wirkliche Zugbeanspruchung muß über der Streckgrenze des Materials liegen, und
2. die Konzentration des Ätznatron muß höher als 350 g pro Liter sein.

Die Veränderung des Druckes bis auf 14 kg/qcm scheint keine merkbare Wirkung auf den Grad der Brüchigkeit zu haben.

Wenn destilliertes Wasser, eine Lösung von Karbonat oder von Natriumsulfat, an Stelle von Ätznatron angewendet wurde, wurde das Material nicht angegriffen, selbst wenn die Zugbeanspruchung ungefähr ebenso hoch war wie diejenige, die den Bruch verursachte, wenn Ätznatron angewendet wurde.

Die Temperatur des vorher vollständig ausgeglühten Probestabes hatte kaum merkbare Wirkung auf den Grad der Brüchigkeit, auch hat der Wert der Zugbeanspruchung keinmal die Streckgrenze unterschritten.

Zahlentafel 5. Einfluß von Zugspannung und Lösungskonzentration auf Flanschenstahl.

Lösung g NaOH pro Liter	Zugspannung in kg/qcm	Behälter	Zeit		Manometer- druck
			Tage bis zum Bruch	Tage ohne Bruch	
415	2110	1		22	4,6
400	2220	4		18	4,6
400	2320	4		16	4,9
415	2420	1		27	6,3
400	2490	1	1½		4,2
400	2760	4	2		3,9
400	3110	4	30 Stunden		3,5
400	3240	2	1½		3,2
400	3550	4	27 Stunden		3,5
40	3520	1		17	3,9
200	3300	3		16	2,8
210	3350	3		21	4,6
345	3240	4	14½		4,6
405	3520	4	4½		3,5
400	2760	4	2		3,9
455	3660	3	2¾		6,7
575	3280	3	8½		3,5

Zahlentafel 6. Einfluß von anderen Salzlösungen auf Flanschenstahl.

Angewendetes Salz	Konzentration im Liter	Zugbeanspru- chung	Behälter	Tage ohne Bruch	Manometer- druck
Reines	Kondensat	3420	1	28	3,5
Na ₂ CO ₃	500	3520	3	34	4,9
Na ₂ SO ₄	500	3160	4	30	4,9

Zahlentafel 7.

Einfluß vorhergehender Wärmebehandlung auf Flanschenstahl. Chemischer Angriff und Druck.

Lösung g NaOH im Liter	Beanspru- chung in kg/qcm	Behälter	Zeit in Tagen		Manometer- Druck at	Behandlung
			bis Bruch	ohne Bruch		
400	2760	4	2		3,9	keine ausgeglüht bis 1050° keine schwacher HCl 20 Min.
400	3520	2	2		3,9	
418	3520	2	0,82		3,9	
407	3520	2	0,82		3,2	
407	3520	2	0,71		3,9	
400	3520	2	1,5		3,9	
404	3520	4		16	0	
400	3240	2	1,5		3,2	
390	3520	2	2		21,0	

Zahlentafel 8. Einfluß der Kaltreckung.

Bezeichnung des Probestabes	Zugbeanspruchung vor dem Versuch	während des Versuches	Behälter	Manometerdruck at	Zeit in Tagen	
					bis Bruch	ohne Bruch
F. S.	3860 kaltgereckt auf 20% Verlängerung dauernd	2760	4	3,5	2	
F. S.		1755	2	3,5		22 ¹⁾
F. S.		1755	1	3,9		27
F. S.		3160	1	4,2	0,5	
C. R.		1755	2	6,0		24
C. R.		2670	2	6,0		24
C. R.		3160	2	5,6	17½	
C. R.		3860	2	6,0	1,3	
C. R. ¹⁾		2670	2	6,0	1,5	

1) Nach 22 Tagen mit Zerreißprobe geprüft. Zugfestigkeit 4860, bei einer Querschnittsverminderung von 52⁰/₁₀₀.

Zahlentafel 9. Wirkung der chemischen Zusammensetzung.

Bezeichnung des Probestabes	Lösung NaOH g im Liter	Zugbeanspruchung kg/qcm	Behälter	Zeit in Tagen		Manometerdruck	Streckgrenze
				bis Bruch	ohne Bruch		
Armco	409	3830	2		14	5,3	3860
Armco	400	3160	2	0,88		4,9	3860
M. I.	405	2460	2	0,96		3,5	2110
F. S.	418	3500	2	0,83		4,2	2470
1112	409	3860	2	3,5		3,5	3440
1112	400	2810	2	0,62		5,6	3440
1112	427	2460	4		20	5,6	3440
1112	427	1760	4		25	6,0	3440
2312	375	3370	2	1,2		5,6	2810
2312	450	3020	4	8,5		6,0	2810
2212	385	3160	2	0,88		4,6	2580
2330	375	3860	4	3,5		4,6	3460

Wenn das Metall besonders stark kalt bearbeitet war vor dem Versuch, so ist für den gleichen Grad der Brüchigkeit nicht etwa eine niedrigere Spannung nötig. Es scheint vielmehr, als ob in Wirklichkeit sogar eine höhere Beanspruchung nötig ist als für das ursprünglich unbearbeitete Metall.

Die Änderung in der chemischen Zusammensetzung des Metalls innerhalb der Grenzen, die für Flanschenstahl festgelegt sind, hat sehr geringen Einfluß auf den Grad der Brüchigkeit. So zeigt Stahl der folgenden allgemeinen Zusammensetzung keine Änderung im Verhalten bezüglich der brüchigmachenden Wirkung.

Kohlenstoff	0,023—0,30%.
Mangan	0,017—0,45%.
Phosphor	0,003—0,012%.
Schwefel	0,007—0,027%.

Die Einführung von 3,5% Nickel mit 0,115—0,7% Kohlenstoff hat keine andere Wirkung als die Hebung der Streckgrenze und folglich der Anfangsbeanspruchung zur Einleitung der Brüchigkeit. Eine Kombination von 1,5% Nickel mit 0,25% Molybdän zeigt dasselbe Verhalten wie Nickel allein.

Wenn der Schwefel 0,215% und der Phosphor 0,126% überschreiten, erfährt der Eintritt der Brüchigkeit eine bemerkenswerte Beschleunigung.

Die brüchigen Probestäbe sind nicht korrodiert, aber bedeckt mit einer dünnen, glänzenden, blauschwarzen, festhaftenden Haut von magnetischem Eisenoxyd. Sie zeigen keine merkbare Verlängerung oder Querschnittsverminderung an der Bruchstelle. Abb. 10 zeigt einen infolge Brüchigkeit gebrochenen Probestab im Vergleich zu einer normalen Zugprobe.

9. Die metallographische Untersuchung der brüchig gewordenen Metalle.

Proben von gerissenem Stahl erhielt man von verschiedenen Beispielen dieser Art von Kesselschäden. Wenn diese unter dem Mikroskop untersucht wurden, zeigte sich, daß die Risse interkristallin waren. Weicher Stahl bricht aber unter normaler Beanspruchung, entweder statischer oder Dauerbeanspruchung, ziemlich unabänderlich in transkristalliner Weise. Die Tatsache, daß ein Brüchigkeitsriß zwischen den Körnern durchgeht, zeigt an, daß er nicht als normaler Riß zu bezeichnen ist. Überdies geht der Bruch ohne merkbare Deformation des Kornes vor sich, also noch eine Abweichung von dem gewöhnlichen Verhalten des weichen Stahles bei statischen Brüchen. Wenn man den Bruch bei stärkerer Vergrößerung prüft, so bemerkt man, daß er zwischen den schmalen Karbidstreifen durchgeht, aus denen sich das Perlitkorn zusammensetzt.

Die im Laboratorium spröde gemachten Probestäbe haben, wie man bei der Prüfung fand, eine große Zahl von Rissen im gestreckten Teil, und alle diese sind interkristallin, ohne irgendeine merkbare Deformation des Kornes, wie die Gefügevergrößerungen in Abb. 11a, b und 12a, b zeigen.

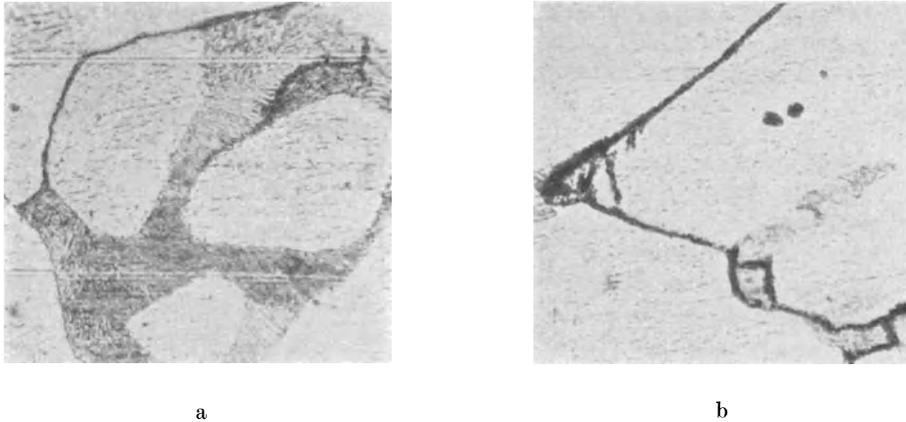


Abb. 11. Interkristalline Risse der Versuchsstäbe. $V = 900$.

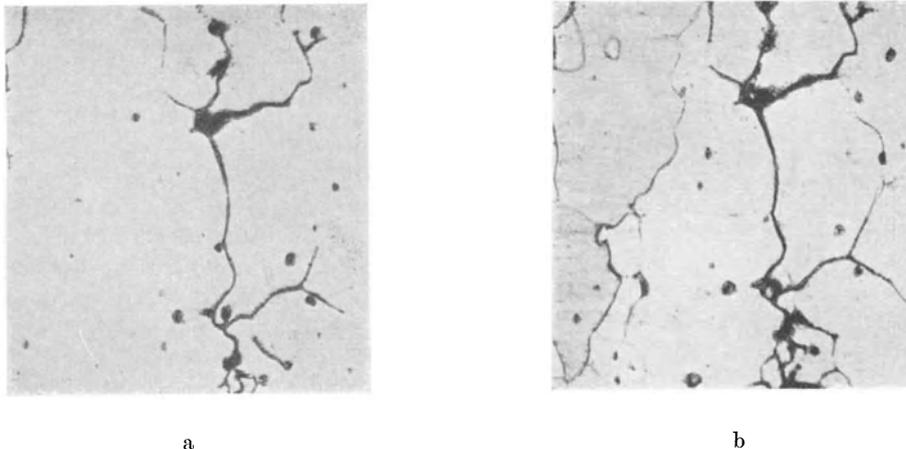


Abb. 12. Interkristalline Risse der Versuchsstäbe. $V = 250$.

10. Die Hemmung der Brüchigkeit.

Da die Brüchigkeit ein Ergebnis der vereinigten Wirkung von Chemikalien und mechanischer Beanspruchung ist, so kann man sie auf zweierlei Weise zum Stillstand bringen. Erstens muß die Beanspruchung so weit vermindert werden, daß eine Brüchigkeit nicht mehr eintritt. Dies würde möglich sein, wenn man die in Wirklichkeit konzentrierten Beanspruchungen, wie z. B. an den Nietköpfen, um die Nietlöcher herum usw., berechnen und den Kessel so konstruieren könnte, daß diese Beanspruchungen niedrig genug gehalten würden.

Selbst dies aber wäre kein vollkommener Schutz, da doch noch unbekannt örtliche Beanspruchungen vorhanden sein und die Bedingungen für die Brüchigkeit erfüllen könnten.

Die Beseitigung der anderen Ursache, nämlich der chemischen Einwirkung, bei deren Fehlen die Brüchigkeit nicht eintreten würde, dürfte das beste Vorgehen sein. Aber auch sie ist in einigen Fällen deshalb schwierig, weil ein Wasserwechsel nicht mehr möglich ist. Einen bedeutenden Schritt vorwärts aber könnte man machen durch die Neutralisierung der Alkalität mit Hilfe von Chemikalien. Vollständige Neutralisation dürfte freilich unmöglich sein, ohne den Kessel zu gefährden.

Als man beobachtete, daß die Brüchigkeit niemals eintrat in karbonathaltigem Wasser bei hohem Sulfatgehalt, erhob sich die Frage, ob nicht die Innehaltung eines bestimmten Verhältnisses zwischen Natriumsulfat und Ätznatron schon genügend sei, um die Ribbildung zu verhindern. Versuche über die Wirksamkeit der verschiedenen Verhältnisse Na_2SO_4 und Na_2CO_3 zu NaOH sind im Laboratorium vorgenommen worden. Die Ergebnisse dieser Versuche enthält Zahlentafel 10.

Zahlentafel 10. Die Wirkung der Steigerung der Verhältnisse. $\frac{\text{Na}_2\text{SO}_4}{\text{NaOH}}$ und $\frac{\text{Na}_2\text{CO}_3}{\text{NaOH}}$

Lösung g NaOH im Liter	Verhältnis		Spannung kg/qcm	Behälter Nr.	Zeit in Tagen		Manometer- druck kg/qcm
	Na_2SO_4 zu NaOH	Na_2CO_3 zu NaOH			bis zum Bruch	kein Bruch	
455	0	—	3520	3	$2\frac{3}{4}$		6,3
447	0,7	—	3520	3	$4\frac{1}{2}$		6,3
365	1,2	—	2820	3	$6\frac{1}{2}$		6,3
500	1,8	—	2820	3	$10\frac{1}{2}$		6,3
430	2,1	—	2820	3		41	7,0
398	—	0	2820	1	$2\frac{1}{2}$		6,3
415	—	0,3	2820	1	5		7,0
430	—	0,7	2820	1	11		7,0

Bei der Untersuchung der schützenden Wirkung von Natriumsulfat und Natriumkarbonat ergab sich, daß diese Salze in der Ätznatronlösung schwer löslich waren. Bei Anwendung des normalen Versuchsapparates hatte die Einführung von Sulfat bis zu einem Verhältnis von 2 Teilen Sulfat zu 1 Teil Ätznatron keine Wirkung auf die Zeit der Brüchigkeit. Man fand, daß das Sulfat sich auf dem Boden des Behälters und ohne Berührung mit dem Probestab abgesetzt hatte. Der Behälter wurde dann so geändert, daß der Probestab von einem Stahlmantel umgeben wurde, so daß zwischen ihm und dem Probestab nur ein Raum von 0,8 mm Weite blieb. Diesen füllte die Lösung aus.

Zu Beginn des Versuches wurde dann eine verdünnte Lösung angewendet und dieselbe konzentriert, indem man so lange Dampf aus dem Behälter abließ, bis die gewünschte Konzentration von Ätznatron erreicht war. Auf diese Weise wurden Bedingungen hergestellt, die sich denjenigen in den Kesselnähten näherten. Die in Zahlentafel 10 enthaltenen Ergebnisse wurden mit dem geänderten Versuchsapparat erzielt. Bei Öffnung des Behälters wurde gefunden, daß die Schutzsalze die Oberfläche des Probestabes mit Kristallen überzogen hatten.

Die Wirkung eines Sulfatkarbonatverhältnisses in einer in Betrieb befindlichen Anlage wurde in einem Zeitraum von zehn Jahren studiert. Diese Anlage, die Kraftstation der Universität Illinois, hatte bereits eine Zeitlang Erfahrungen in den Störungen durch Brüchigkeit gesammelt. Als 1915 drei neue Trommeln nach nur fünf Dienstjahren ersetzt werden mußten, wurde folgendes System der Speisewasserbehandlung eingeleitet: Das Sulfatkarbonatverhältnis im Speisewasser wurde auf zwei gehalten. Dies geschah durch Neutralisierung von etwa 70% der Alkalinität durch Schwefelsäure. Das Wasser wurde in Absitzbehältern von je 15 cbm behandelt. Etwa 50 kg Kalk wurden in jeden Behälter gegeben und dazu nach genügendem Umrühren und Absitzen die notwendige Menge Säure. Von jedem Behälter wurden täglich nach der Kalkbehandlung Analysen gemacht, desgleichen nach Hinzufügung der Säure, zur Bestimmung der totalen Alkalinität. Ebenso wurden durch tägliche Analysen die Kaustizität und totale Alkalinität des Wassers in jedem Kessel bestimmt.

Nach zehnjährigem Betrieb bei dieser Behandlung wurden die Kessel im Februar 1926 vollständig untersucht. Probenieten wurden entfernt und eine eingehende Untersuchung in bezug auf Anzeichen von Undichtigkeiten um die Nietlöcher herum angestellt. Der Inspektor der Hartford Dampfkesselüberwachungs- und Versicherungsinspektion erklärte dann, daß die Trommeln in vollkommen gutem Zustande seien. Die Nieten wurden wieder eingezogen, und die Kessel sind seitdem wieder in Betrieb.

Ein Behandlungssystem mit dem Prinzip kontinuierlichen Zuflusses wurde erfunden und ist jetzt in verschiedenen Kraftzentralen im Bezirk Chicago in Gebrauch. Das Wasser ist zeolithhaltig mit niedrigem Sulfatkarbonatverhältnis. Dieses Verhältnis wird erhöht, indem man eine bestimmte Menge verdünnter Säure in ein Mischgefäß eintreten läßt, durch welches eine bestimmte Menge Wasser durchläuft. Dazu wird eine regelmäßige chemische Analyse des Kesselwassers in diesen Anlagen angefertigt.

Eine Kraftanlage in Champaign stellte 1916 Kessel in Dienst, die dasselbe Wasser gebrauchten wie die Universität Illinois, ohne aber die Säurebehandlung anzuwenden. Im Jahre 1925 erlitt das Werk eine beträchtliche Störung infolge der Brüchigkeit. Abb. 8 zeigt eine der verworfenen Trommeln dieser Anlage. Zwei andere Anlagen, die 9 und 10 Jahre lang mit einem bis auf 1,4 at gleichen Dampfdruck und mit nahezu dem gleichen Wasser arbeiteten, die eine aber mit Sulfatbehandlung des Wassers, die andere ohne dieselbe, dienen als langfristiger Versuch mit Ergebnissen, die vollständig mit den Angaben des Laboratoriums übereinstimmen. Die Kessel mit behandeltem Wasser sind in vorzüglichem Zustand, die anderen wurden nach neunjähriger Dienstzeit als unbrauchbar verworfen.

11. Der innere Vorgang bei der Entwicklung der Brüchigkeit.

Die erzielten Ergebnisse rechtfertigen die jetzt in den U. S. vorherrschende Meinung, daß weicher Stahl durch Ätznatron brüchig gemacht wird. Sie zeigen ferner, daß Ätznatron das einzige Salz ist, welches im Kessel Stahl brüchig macht. Beanspruchung und chemische Einflüsse scheinen jetzt die vorherrschenden Faktoren, von denen keiner ohne den anderen die Brüchigkeit hervorrufen kann.

Die Wirkung von Ätznatron verschiedener Konzentration auf weichen Stahl ist in Abb. 13 dargestellt, die das elektromotorische Kraftgefälle von Stahl zur Lösung angibt. Die Kurven zeigen das Potential von Stahl in bezug auf verschiedene Konzentrationen von Ätznatron gegenüber normalen NaOH, HgO und Hg. Die Messungen wurden nach der üblichen Kompensationsmethode gemacht. Abb. 13 zeigt weiter die Potentialdifferenz von im Laboratorium versprödetem Stahl und 10fach normalem NaOH. Das Potential desselben Metalls gegenüber der gleichen Lösung nach Abschleifen der Außenhaut ist ebenso angegeben.

Die Wirkung des Ätznatrons besteht in der Bildung einer dünnen, festen, zusammenhängenden Haut von magnetischem Eisenoxyd. Die Reaktion mit dem Hydroxylion allein ist



Wenn die Konzentration etwa auf 400 g im Liter gehalten wird, geht die Wirkung langsam vor sich ohne nennenswerte Bildung von Wasserstoff. Die Haut auf dem Eisen macht es passiv oder widerstandsfähig gegen weitere Einwirkung des Ätznatrons. Wenn diese Haut abgeschnitten, beseitigt oder durchbrochen wird, ist das reine Metall darunter ebenso aktiv, als der Stahl ursprünglich war. In einer Lösung von 10fach normalem NaOH (400 g im Liter) ist die Potentialdifferenz zwischen dem reinen und dem mit einer Haut bedeckten Metall etwa 0,7 Volt im kalten Zustande. Sie ist hinreichend, um eine langsame elektrochemische Wirkung hervorzubringen, welche ein Durchdringen bis zum reinen Metall begünstigt.

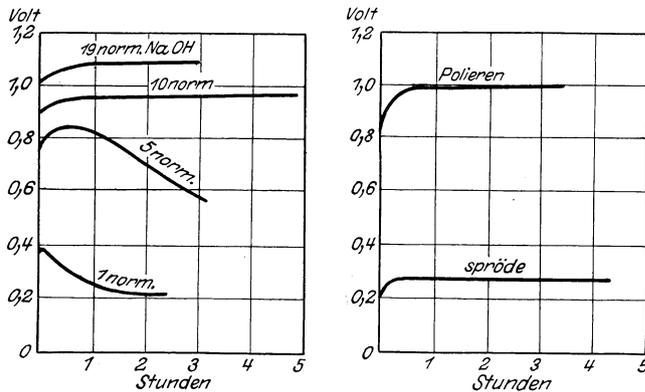


Abb. 13.

Solange das Metall unterhalb der Streckgrenze beansprucht ist, erzeugt die chemische Wirkung lediglich die Außenhaut aus schützendem Oxyd.

Wenn die Beanspruchung über die Streckgrenze hinausgeht, scheint die Außenhaut in den gestreckten Stellen zu brechen, und der chemische Angriff erfolgt auf das Metall und macht es brüchig. Diese Annahmen beziehen sich auf die kurzfristigen Laboratoriumsversuche.

Um eine klare Vorstellung von den Möglichkeiten eines chemischen Angriffes bei einer Beanspruchung des Metalls über die Streckgrenze hinaus zu erhalten, ist es nötig, sich klarzulegen, was im Stahl beim Erreichen der Streckgrenze vor sich geht. Bei einer statischen Festigkeitsprüfung findet man, daß eine bestimmte Belastungshöhe, nämlich die Streckgrenze, sich besonders kennzeichnet; nämlich durch ein Anwachsen der Verlängerung ohne eine nennenswerte Steigerung der Belastung. Über die Vorgänge im weichen Stahl bei Eintritt dieser bleibenden Deformation können zur Zeit nur erst Vermutungen geäußert werden. Unzweifelhaft ist sie eine Folge einer gewissen Umlagerung innerhalb des Metalls. Die Streckgrenze kann nämlich in weiterem Sinne als eine Funktion der Kristallfestigkeit aufgefaßt werden. Wenn die Spannungen größer werden als die Kristallfestigkeit, so tritt ein Gleiten innerhalb des Kristalls ein.

In einer Anhäufung von Kristallen, wie sie im weichen Stahl besteht, wird das Gleiten angehalten teils durch das Aufeinanderstoßen der Kristalle, teils durch den Widerstand in der Gleitebene selbst. Ein Metall, welches unterhalb der Streckgrenze beansprucht ist, ist ein wenig elastisch, es hat eine elastische Ausdehnung von etwa 0,1% seiner Länge. Wenn aber die Beanspruchung die Streckgrenze erreicht, so tritt ein Gleiten in den Kristallflächen ein. Dieses anfängliche Gleiten wird, wie gesagt, angehalten sowohl durch Anwachsen des Widerstandes entlang der Gleitebene als auch durch das Aufeinanderstoßen benachbarter Körner. Nach dem Gleiten in einem Kristall sind in ihm die Spannungen ausgeglichen. Hierdurch werden aber umgekehrt die Spannungen in den benachbarten Kristallen gesteigert. Man kann sich bei Erreichung der Streckgrenze die Neuordnung der Spannungen im Metall so denken, als ob bei jedem Gleiten eine wachsende Zahl von Kristallebenen am Widerstand gegen die äußeren Kräfte teilnehmen. Nach jeder Neuordnung innerhalb des Metalls (nach jedem Gleiten) ist

eine dauernde Deformation vorhanden. Eine weitere äußere Beanspruchung wird ein weiteres Gleiten hervorbringen und ein Recken der Kristalle in der Richtung des Zuges. Unzweifelhaft sind im Augenblick der Neuordnung der Spannungen im Metall die Kräfte an den Korngrenzen auf einem Höchstwert angekommen. Das Metall ist nun um mehr als 1% seiner Länge gestreckt. Hierbei ist als sicher anzunehmen, daß der amorphe Zement, dessen Existenz in den Korngrenzen vorausgesetzt sei, elektropositiv gegenüber den Metallkristallen ist, und deshalb eine innere Energie besitzt. Dies erklärt genügend seine höhere Empfänglichkeit für chemische Angriffe. Ferner muß eine Aufspeicherung von Energie in den Korngrenzen bei hohen Spannungen stattfinden. Dies macht sie ihrerseits in höherem Grade empfindlich gegen chemische Angriffe als vor der Beanspruchung.

Hat der Durchbruch einmal begonnen, so folgt der chemische Angriff demjenigen Wege, auf dem er chemisch aktiver ist, also demjenigen zwischen den Korngrenzen. Wenn die Korngrenzen angegriffen sind, verstärken sich notwendig die Kräfte, die das interkristalline Eindringen noch mehr begünstigen. Eine Beobachtung des Voranschreitens der Risse im spröde gewordenen Stahl zeigt, daß die Risse nicht immer an der Korngrenze beginnen. Oft beginnt ein Riß, indem er das äußere Korn durchdringt, aber wenn er einmal eine Korngrenze erreicht hat, geht er längs der Korngrenze weiter. Wenn ein anderes Metall, z. B. Nickel, welches in kleinen Mengen vollständig im Ferritkristall löslich ist, dem Stahl beigemischt wird, so hebt sich die Streckgrenze, da eine beständige Lösung von Nickel in Ferrit fester ist als Ferrit selbst. Das Gleiten beginnt dann bei einem höheren Wert, so daß also umgekehrt auch die Umlagerung innerhalb des Metalls aufgehalten wird. Wenn andererseits Schwefel- und Phosphorgehalt zunehmen, so beobachten wir eine Zunahme der Festigkeit des Ferrits, die begleitet ist von einem höheren Gehalt an diesen Elementen in den Korngrenzen. Die Streckgrenze hebt sich zwar, aber der chemische Angriff wird nicht so lange zurückgehalten, bis die Streckgrenze erreicht ist, weil die Korngrenzen selbst jetzt aktiv geworden sind.

In einem Metall, welches häufig kalt bearbeitet wurde, sind die Körner vollständig verändert. Ein Gleiten ist eingetreten entlang verschiedenartiger Ebenen, die Körner sind verlängert, die ursprünglichen Kristallgrenzen sind zumeist vollständig verschoben und die größte Spannung liegt dann in den Gleitebenen der Kristalle. An einem so gestreckten Material wird wahrscheinlich eine höhere Beanspruchung möglich sein, ehe der chemische Angriff eintritt. Es könnte dagegen möglich sein, daß ein geringer Grad von Kaltbearbeitung nur einen sehr kleinen Einfluß auf die nachfolgende Brüchigkeit des Materials hat¹⁾.

Man sollte erwarten, daß die Perlitinseln des Stahls das Gleiten der Kristalle hindern, und ebenso, wie der Kohlenstoff anwächst, sollte auch die Streckgrenze höher liegen. Brüchigkeitsrisse sollten nicht quer durch die Perlitreihen gehen. Dies wird auch zumeist unabänderlich so festgestellt.

12. Die Ursache der Brüchigkeit im Dampfkessel.

Wie bereits gezeigt, können interkristalline Risse im weichen Stahl nur entstehen durch die vereinigte Wirkung einer mechanischen Beanspruchung und eines rein chemischen Angriffes. Die Grenze, die für beide gesetzt wird, richtet sich nur nach den Bedingungen des Laboratoriumsversuchs und nach der Zeit der Versuche. Es besteht eine Möglichkeit, daß eine langsamere Wirkung nach einer längeren Periode, als nach dem Versuch zu erwarten, stattfindet, wenn die Beanspruchung oder die Konzentration der Lösung, die zu irgendeinem Grad nötig ist, herabgesetzt wird. Außerdem ist zu beobachten, daß bei den Brüchigkeitsversuchen das Metall von der Lösung umgeben ist, während in Kesseln die Lösung in einer dünnen Schicht zwischen die Kesselbleche eindringt. Daher können die Grenzen der Konzentration der Lösung, die notwendig ist, um eine Brüchigkeit hervorzurufen, im praktischen Betrieb gänzlich verschieden sein. Da aber eine Brüchigkeit nur in Nietnähten eintritt, die unter Spannung stehen, so ist es trotzdem möglich, sich vorzustellen, daß die Beanspruchung die Streckgrenze überschreitet und daß gleichzeitig die Lösung die höchste Konzentration erreicht, die beim Versuch angewendet wurde.

Wahrscheinlich erreichen bei allen Kesselblechen die Beanspruchungen an der Kante der Nietlöcher gelegentlich die Streckgrenze des Metalls. Es ist zu beachten, daß die mathematische Theorie der Festigkeitslehre angibt, daß örtliche Beanspruchung an der Kante eines Loches in einem Blech beinahe dreimal so groß sein kann als die mittlere Beanspruchung im Blech. Diese Spannungskonzentration an der Kante von Löchern, wie z. B. Nietlöchern, würde

¹⁾ Anmerkung des Bearbeiters: Der vorstehende Absatz ist im Zusammenhang des Aufsatzes nicht ohne weiteres verständlich. Man müßte aus dem Absatz den Schluß ziehen, daß hoher Nietdruck, eine Kaltbearbeitung kräftigster Art, den chemischen Angriff zurückhält. Der letzte Satz des Absatzes widerspricht dem aber wieder, wie auch der Schluß des Aufsatzes die Gefährlichkeit hohen Nietdruckes, also der Kaltbearbeitung, eindeutig hervorhebt.

schon allein eine genügend hohe Beanspruchung ergeben, um Brüchigkeit einzuleiten, wenn eine Lösung von passender Konzentration zu den Nietlöchern durchdringt. Nun werden während der Fabrikation der Kessel die Nähte durch Nietung zusammengebracht. Die Nietung wird heiß durchgeführt. Angenommen, daß man nur einen Nietdruck anwendet, der genügt, um die Naht dicht zu halten, so tritt doch eine sehr hohe örtliche Beanspruchung unter dem Nietkopf und rund um die Nietlöcher ein. Wenn man das Aussehen der Bleche und Laschen nach ihrer Entfernung von einem Kessel, der in Betrieb gewesen ist, betrachtet und die Ringe rund um die Nietlöcher sieht, wo die Laschen und Bleche durch die Nieten aneinander gehalten wurden, dann kann man kaum noch bezweifeln, daß das Metall über die Streckgrenze hinaus beansprucht worden ist. Wenn diese Beanspruchung nun addiert wird zu der Beanspruchung, die bei dem Arbeiten des Kessels eintritt, so entwickeln sich örtliche Beanspruchungen, welche die Brüchigkeit noch mehr begünstigen. Der scharfe Winkel, den der Nietkopf und der Schaft miteinander bilden, zusammen mit der Beanspruchung des Nietkopfes für sich, erzeugt unzweifelhaft an diesem Punkte eine Beanspruchung, die genügt, um die Brüchigkeit einzuleiten. Nicht selten springen an einem brüchig gewordenen Kessel die Nietköpfe ab, lange, ehe die Bleche genügend brüchig geworden sind, um Risse zu entdecken. Die Spannungen in Blechen, die durch das Nieten hervorgerufen werden, wurden durch R. Baumann studiert, der zeigte, daß die Bleche örtlich mit Spannungen beansprucht werden, die über die Streckgrenze hinausgehen, selbst wenn niedrige Nietdrücke angewendet werden. H. F. Moor stellte in seinem Bericht vor der A. S. für Stahlbehandlung im September 1925 fest, daß kein Zweifel mehr an dem Bestehen örtlicher Beanspruchungen existiere, die in genieteten Teilen um die Nietlöcher herum über die Streckgrenze des Metalls hinausgehen.

Diese Konzentration der Spannungen besteht in allen Kesseln in einem mehr oder weniger hohen Grade, jedoch in Abwesenheit der geeigneten Chemikalien im Kesselwasser tritt keine Brüchigkeit ein. Wenn das geeignete Chemikal, Ätznatron, in Abwesenheit von viel Sulfat oder Karbonat im Kesselwasser vorhanden ist, dann besteht die Möglichkeit, daß früher oder später der Kessel brüchig wird. Die Konzentration von Ätznatron im Kessel überschreitet zwar selten 17000 Teile auf 1 Million, oder etwa 265 g im Liter. Die Laboratoriumsversuche zeigen, daß Lösungen dieser Konzentration nicht gefährlich für den Stahl sind. Es besteht aber eine Möglichkeit, daß die wirkliche Konzentration von kaustischer Soda in der Nachbarschaft der Nietnähte zeitweise einen Wert erreicht, der viel höher liegt, und etwa 400000 Teile auf 1 Million Teile oder 6000 g im Liter erreicht. Es ist bekannt, daß Ätznatron selbst noch niedrigerer Konzentration, als es im Kesselbetrieb zugesetzt wird, nicht leicht unter Druck in Behältern mit Schraubenverbindungen gehalten werden kann. Lösungen mit anderen Salzen können zurückgehalten werden, aber bei kaustischer Soda streben Undichtigkeiten sich zu vergrößern. Kaustische Soda unter Druck im Kessel neigt zum Hindurchsickern durch die Naht, zwischen den Metallflächen. Wenn die Lösung zwischen den Flächen eindringt, besteht eine Tendenz zur Konzentration, worauf der Dampf entweder in den Kessel zurücktritt oder nach außen hin entweicht. Je mehr die Konzentration fortschreitet, um so tiefer dringt die Lösung in die Naht ein. Mit der Zeit wird die Lösung genügend konzentriert, um die Brüchigkeit einzuleiten. Wenn dazu noch genügend örtliche Beanspruchungen an demselben Punkt, an dem die Konzentration eintritt, vorhanden sind, dann beginnt die Brüchigkeit. Oft wird die Konzentration erreicht, und die Brüchigkeit arbeitet doch nicht voran, offensichtlich, weil es an genügenden Beanspruchungen mangelt. Die Durchdringung schreitet dann bis zu einer Undichtigkeit nach außen vor. Bei der Prüfung kann kein Vorhandensein einer Brüchigkeit gefunden werden. In anderen Fällen beginnt die Brüchigkeit, die Bleche werden geschwächt und ein Leck entwickelt sich, welches die Schädigung anzeigt. Wenn die Blechplatten von den Nähten des versprödeten Kessels entfernt werden, werden lösliche Salze zwischen den Blechen gefunden. Diese allein schon zeigen an, daß eine beträchtliche Konzentration an den Nietnähten stattgefunden haben muß. Ein anderer Beweis des chemischen Angriffes an den Nietnähten ist noch die Gegenwart von feinverteiltem, schwarzen, magnetischen Oxyd, welches sich auf der Oberfläche der Blechplatte niedergeschlagen hat.

Da zwei Faktoren für die Brüchigkeit gleichzeitig erfüllt sein müssen, so ist es möglich, daß an Kesseln im Betriebe zwar die Möglichkeit der Brüchigkeit besteht, ohne daß aber irgendeine Schädigung sich entwickelt. Die Tatsache, daß sich bei der Generaluntersuchung keine Zerstörung zeigt, ist noch kein Zeichen, daß der Kessel frei von Gefahr ist. Ein Beispiel hierfür ergab sich in einem Kesselbetrieb mit alkalischem Wasser. Diese Anlage war ca. acht Jahre in Betrieb und wurde als ein Beispiel einer Kesselanlage angeführt, die trotz alkalischem Wasser frei von Brüchigkeit arbeitet. Sechs Monate später entdeckte man die Zerstörung der Anlage, die sich als ein sehr schwerer Fall von Brüchigkeit erwies. Der verantwortliche Ingenieur hat oft darüber seine Verwunderung geäußert, daß besonders ein Kessel nicht explodiert war; so übel war er gerissen.

Die wirkliche Ursache der Brüchigkeit in Dampfkesseln kann daher zusammengefaßt werden als eine Wirkung einerseits der Konzentration der kaustischen Soda in den Nietnähten in Abwesenheit von einem Sulfat- oder Karbonatüberschuß, und andererseits der gleichzeitigen örtlichen Beanspruchungen in den Nietnähten.

13. Die Verhinderung der Brüchigkeit.

Die Ergebnisse der experimentellen Arbeit an dem Problem der Verhinderung oder Hemmung der Brüchigkeit zeigen, daß man ihr Einhalt gebieten kann, aber zur Zeit sind diese Versuche noch nicht vollständig genug, um endgültige Verhältnisse und Konzentrationen der darin enthaltenen Chemikalien aufzustellen.

An eine Beseitigung der Spannungen kann bei dem derzeit üblichen Bau der Kessel nicht gedacht werden, und wenn sie möglich wäre, könnte man sie doch bei den vielen bereits in Betrieb befindlichen Anlagen nicht erreichen. Die Praxis der inneren Abdichtung der Trommeln, wenn sie wirklich ein Hineindringen innerhalb der Nietnähte verhindern kann, zielt auf eine Verzögerung des Eintritts dieser Art von Schäden hin.

Die Beseitigung der Quelle des Übels, nämlich des Ätznatrons durch Änderung des Speisewassers, wird die wirksamste aller Methoden sein, aber in manchen Fällen ist sie nicht möglich und in anderen würde sie zum Gebrauch von Wässern führen, die andere Kesselwierigkeiten erzeugen.

Die Beseitigung eines hohen Gehaltes von Natriumkarbonat, indem man von einem Natriumsulfat-Natriumkarbonat-Verhältnis ausgeht, entweder durch die Anwendung von Schwefelsäure, Aluminium oder Magnesiumsulfat, hat aber auch ihre Nachteile. Die Säurebehandlung ist nur zu empfehlen bei Beratung und Überwachung durch einen Sachverständigen und bei Betriebsüberwachung durch einen Chemiker oder Ingenieur, der alle möglichen Gefahren kennt. Aluminium- und Magnesiumsulfatbehandlung ist sehr wirksam, wenn sie im Zusammenhang mit Absitzbehältern und Filtern angewendet wird, da diese den Eintritt der Kesselsteinbildner in den Kessel verhindern. Jedoch sind diese beiden Chemikalien, im Überschuß angewendet, ebenso gefährlich wie Säure, und sollten nur eingeführt werden nach einer genauen Berechnung der notwendigen Mengen durch einen Chemiker, der die eingeleiteten Reaktionen kennt.

Ein Punkt ist noch von besonderem Interesse, nämlich, daß unzerlegtes Natriumkarbonat als Schutzmittel wirkt. Wenn daher eine Anlage mit einem hohen Gehalt von Karbonaten arbeitet, so kann die Menge des gebildeten Ätznatrons geringer sein, da die Einführung frischer Karbonate dahin wirken würde, das Karbonatätznatronverhältnis hoch zu halten. Dadurch kann umgekehrt der Eintritt der Brüchigkeit gehemmt werden. Es sind Fälle angeführt worden, in denen das Verhältnis Natriumsulfat zu Natriumkarbonat außerordentlich niedrig war ohne Anzeichen einer Brüchigkeit. Die schützende Wirkung des Natriumkarbonates ist die klare Erklärung dafür.

Dies führt nun auch zur Frage, welches Mengenverhältnis denn in Betracht kommt. Bisher ist es in den wenigen Anlagen, die auf der Basis eines Alkaliverhältnisses arbeiteten, üblich gewesen, das Verhältnis des Natriumsulfates zur vollständigen Alkalinität (im Kesselwasser), ausgedrückt als Natriumkarbonat zu berechnen. Dieses Verhältnis ist zwar außerordentlich sicher, insoweit dabei alles Natriumkarbonat als potentielles Ätznatron betrachtet wird, aber es leitet in der Beurteilung der Arbeitsweise gewisser Kesselarten irre. Zahlentafel 11 gibt die

Zahlentafel 11. Analysen des Speisewassers verschiedener Kessel in Milligramm pro Liter.

umgerechnet mit: 1 g pro Gallon entspricht 0,0271 g pro Liter oder 27 mg pro Liter	versprödet				nicht versprödet		
	Denver, Colo	Champaign III	Universität Illinois nicht behandelt	Bloomington III 1925	Chikago III behandelt	Universität Illinois behandelt	Illinois Central Railroad Champaign III
Ätznatron NaOH	4760	860	1620	54	761	594	890
Natriumkarbonat Na ₂ CO ₃ . .	596	270	865	270	144	243	1540
Totale Alkalinität als Natriumkarbonat	6920	1400	3300	352	1150	1015	4700
Natriumsulfat Na ₂ SO ₄	1890	483	0,0	5400	2420	2430	297
Verhältnis: Natriumkarbonat zu Ätznatron	0,12	0,31	0,52	5,0	0,19	0,4	1,7
Verhältnis: Na-Sulfat zu Ätznatron	0,4	0,55	0,0	100,0	3,2	4,0	0,33
Verhältnis: Na-Sulfat + Na-Karbonat zu Ätznatron . .	0,52	0,87	0,52	105,0	3,4	4,5	2,06
Verhältnis: Na-Sulfat zu Total Alkalinität als Na-Karbonat	0,27	0,34	0,0	15,4	2,1	2,4	0,63

Analysen des Speisewassers von sieben verschiedenen Anlagen. Die ersten drei sind von brüchig gewordenen Kesseln, während der Rest von Kesseln stammt, die frei von Störungen sind. Die Bloomington-Anlage arbeitet jetzt mit einem sulfathaltigen Wasser, das mit Kalk und Soda behandelt wurde. Es zeigt den hohen Natriumsulfatgehalt, der durch die Reaktion von Kalziumsulfat und Natriumkarbonat während der Enthärtung herbeigeführt wurde.

Die Chicago-Anlage und die Universität Illinois behandelten karbonathaltiges Wasser mit Schwefelsäure. Das Verhältnis des Natriumsulfates zum Natriumkarbonat ist etwa 2 in beiden Fällen.

Die Chicago-Anlage arbeitet mit niedrigem Zusatz und höherem Dampfdruck und hat eine geringere Menge von bleibendem Natriumkarbonat als das Wasser der Universität Illinois. Wenn man annimmt, daß Natriumkarbonat auch ein Schutzmittel ist, so sollte das Verhältnis in einem in Betrieb befindlichen Kessel sein: Natriumsulfat + Natriumkarbonat zu Ätznatron. Wenn dies die Bedingung ist, so ist die Anlage mit niedrigerem Druck und höherem Zusatz offenbar mehr geschützt und könnte umgekehrt mit einem niedrigeren Natriumsulfat-Natriumkarbonat-Verhältnis arbeiten. Das Verhältnis Natriumsulfat zu Natriumkarbonat muß in einigen einzelnen Fällen irreführen. Lokomotiven der Illinois Central-Eisenbahn, die örtlich in Champaign mit alkalischem Wasser arbeiteten, zeigen dies, insofern das Sulfatkarbonatverhältnis nicht größer als 0,63 ist, während das Verhältnis Natriumsulfat + Natriumkarbonat zu Ätznatron über 2 beträgt. Dies ist viel sicherer und genügt offenbar zur Verhinderung der Brüchigkeit. Diese Erläuterungen mögen zeigen, daß jede Anlage nach sich selbst beurteilt werden muß, wenn man Vorschriften geben will zur Verhinderung der Brüchigkeit.

Die so gesammelten Erfahrungen, die in der einen oder anderen Beziehung fraglos noch ausgedehnt werden müssen, gestatten jedoch jetzt schon genügend sichere Schlüsse. Sie rechtfertigen daher ihre Bekanntgabe bereits im gegenwärtigen Stand der Untersuchungen.

Ursachen und Verhinderung von Brüchigkeit bei Kesselblechen.

Von **S. B. Applebaum** (Permutit Company).

Diskussion der Schrift von **S. W. Parr** und **F. G. Straub**.

Diese Schrift wird für die Öffentlichkeit gewiß von großem Wert sein, da sie ein besseres Verständnis schafft für die Ursachen von Kesselschäden sowie dafür, wie wichtig es ist, daß die Kessel in Ordnung sind. Die Ergebnisse von früheren Versuchen¹⁾ gaben alle an, daß die Spannung ein primärer und notwendiger Faktor ist für die Erzeugung von interkristallinen Rissen, aber keine dieser Veröffentlichungen gab irgendwelche Zahlen an über die Größe der Spannungen, die notwendig sind, damit derartige Risse hervorgebracht werden. Daher gipfelte jede Diskussion, wie man derartiges Reißen vermeiden könne, mehr oder weniger in einem Streit darüber, wie groß die für die Erzeugung der Risse erforderlichen Spannungen sein müßten. Die kürzlichen Vorlesungen vor dem A. S. M. E. Boiler Code Committee in bezug auf den Abschnitt Behandlung der Kessel im Betriebe sind ein Beispiel hierfür.

Anscheinend bestehen noch Meinungsverschiedenheiten darüber, welche Rolle die kautische Soda bei der Erscheinung spielt. Rosenhain und Archbutt legten der „Royal Society, London“ im Jahre 1919 eine Schrift vor mit dem Titel „Interkristalline Brüche bei Metallen bei längerer Anwendung von Spannungen“, in der sie eine Erklärung für diese nicht sehr allgemeinen Schäden gaben. Später, im April 1921, gab Dr. Rosenhain auf einer gemeinsamen Tagung der Faraday Society mit anderen englischen Gesellschaften in einer der allgemeinen Diskussion vorhergehenden Ansprache seiner Meinung über „Schäden an Metallen unter inneren und Dauerbeanspruchungen“ dahingehend Ausdruck, daß, wenn eine chemische Aktion auf den interkristallinen Zement überhaupt eintreten könne, die Produkte dieser chemischen Aktion doch bald die winzigen Spalten zwischen den Kristallen verstopfen und so die chemische Aktion zu einem Halt bringen würden, sofern nicht eine viskose oder visko-elastische Bewegung infolge von Spannungen vorhanden sei. Die Versuche von Prof. Parr bestätigen nun auf experimentellem Wege diese Ansicht, weil sie klar zeigen, daß der mit einer chemischen Lösung in Berührung stehende Stahl nicht reißt, solange nicht die Produkte der chemischen Aktion entfernt oder infolge von Spannungen gebrochen werden und daß derartiges Displacieren oder Brechen der Reaktionsprodukte nur dann stattfindet, wenn die Spannungen die Streckgrenze überschreiten.

¹⁾ Siehe z. B. Jones: Far. Soc. XVIII. und Bur. of Stand. Chem. a. Mat. Engr. Febr. 11, 1924.

Dr. Rosenhains Schlüsse in bezug auf die Bildung von Rissen, die sich auf Untersuchungsarbeiten stützten, waren die, daß die chemische Aktion lediglich eine beschleunigende Wirkung ausübt, daß aber das Reißen auch stattfindet unter Verhältnissen, wo die Möglichkeit einer chemischen Einwirkung überhaupt ausgeschlossen ist¹⁾. Diese Ansicht von Dr. Rosenhain wird bestätigt durch Beispiele von interkristallinen Brüchen, die man in Stahl fand, der kaustischer Soda überhaupt nicht ausgesetzt war, wie z. B. bei Brücken und anderen Stahlbauten²⁾, bei Wellen³⁾, bei Kesselblechen außen an den Nähten⁴⁾, bei Stahlfeuerrohren in Rauchkammern von Lokomotiven⁵⁾, in Kesseln, die ein Speisewasser verwendeten, das überhaupt keine kaustische Soda enthielt⁶⁾, in Dampfäumen oberhalb der Wasserlinie von Kesseln⁷⁾, ferner in vielen Fällen bei Nichteisen-Metallen⁸⁾. Von ausländischen Kesselbesitzervereinigungen ist außerdem berichtet worden, daß man das Reißen bei genieteten Nähten von Kesseln gefunden hat, bei denen das empfohlene Sulfat-Karbonat-Verhältnis vorhanden war.

Zu den obigen Ausführungen müssen außerdem noch alle die Fälle von Brüchigkeit hinzugefügt werden, die hervorgerufen werden durch Bearbeitung des Stahls in der Blauwärme (blue heat), wenn man den Ausdruck Brüchigkeit so verstehen will, daß er sich auf Brüche ohne plastische Deformation bezieht, die durch eine Spannung unter der Zugfestigkeitsgrenze des ursprünglichen Materials hervorgerufen werden. So berichtet z. B. Ridsdale⁹⁾ schon im Jahre 1898 von einer intergranularen Schwäche, die durch Hämmern des Stahls bei Blauhitze hervorgerufen wird. Neuerlich hat Baumann weitere Untersuchungen in dieser Richtung ausgeführt¹⁰⁾. Viele brüchige Nieten können auf diese Art und Weise hergestellt worden sein. Spencer¹¹⁾ berichtet von anderen Ursachen, die eine Brüchigkeit der Nieten herbeiführen können. Alle diese Fälle zeigen, daß die Brüchigkeit auch hervorgerufen werden kann von Spannungen allein, ohne daß irgendeine chemische Aktion vorhanden ist.

Prof. Parrs Versuche dürften sich auch für die Klärung der Frage als nützlich erweisen, wie groß die Konzentration kaustischer Sodalösung (20 000 Grains per gallon) sein muß, um diese Wirkung zu beschleunigen. Diese Konzentration ist zweifellos in dem Hauptteil des Kesselwassers nicht vorhanden, und daher wird die Frage der möglichen Konzentration auf diese Stärke innerhalb der Kesselnähte eine Frage von allererster Bedeutung. Sowohl die praktische Erfahrung als auch Experimente erweckten die Neigung zu der Meinung, daß ein nennenswerter Unterschied in der Konzentration nicht vorhanden sei. Nun ist es eine wohlbekannte Tatsache, daß Kessel, die man früher dadurch gedichtet hatte, daß man Kesselstein sich an den leckenden Stellen ablagern ließ, wieder anfangen zu lecken, wenn sie später mit einem anderen Wasser betrieben werden, das die Kesselstein bildenden Substanzen in einer Menge enthält, die unter dem Sättigungspunkt liegt. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, daß der alte Kesselstein, der die Zwischenräume ausfüllte, allmählich durch das mit diesen Substanzen nicht gesättigte Wasser wieder ausgelaugt wird. Dies ist ein Beweis dafür, daß jeder Raum, der unter der Wasserlinie liegt und einer Konzentration unterworfen ist, auch einer Auflösung oder Verdünnung unterworfen ist. Laboratoriumsversuche mit Lösungen von kaustischer Soda bestätigen dies. In den Versuchen des Verfassers¹²⁾ wird ein Stahlmantel erwähnt, der sich nahe an der Probe in dem Behälter befand, damit Natriumsulfat auf dem Probestück niedergeschlagen würde. Die Verfasser stellten fest, daß „auf diese Weise Bedingungen erreicht würden, die denjenigen in der Naht eines Kessels in bezug auf Konzentration gleich kämen“. Die Bedingungen sind jedoch vollständig voneinander verschieden, weil die Konzentrationen innerhalb und außerhalb des Kondensatbehälters bei diesen Versuchen offenbar dieselben waren, während in einem Kessel die Konzentration des Natriumsulfats in dem Hauptteil des Kessels niemals den Sättigungspunkt erreichen dürfte.

Ein anderer Faktor, der Berücksichtigung verdient, ist der Gehalt an Kalzium und Magnesium in den Quellwassern der erwähnten geographischen Distrikte. So ergab z. B. die Analyse des Champaignwassers¹³⁾, daß von einem gesamten Bestandteil an festen Körpern von 23 Grains je Gallone ungefähr 16 Grains Kalzium- und Magnesiumsalze waren. Diese Salze sind bedeutend weniger löslich als kaustische Soda, und ehe eine Konzentration von 20 000 Grains je Gallone in den Nähten erreicht werden kann, müssen

¹⁾ Rosenhain: Far. Soc. 1921, S. 14.

²⁾ Rosenhain: Far. Soc. 1921, S. 3.

³⁾ Baumann: B. R. V. 1925, Nr. 15.

⁴⁾ Baumann: B. R. V. 1925, Nr. 15, ebenfalls J. E. Fletcher: Far. Soc. 1921, S. 159.

⁵⁾ Fowler: Far. Soc. 1921, S. 82.

⁶⁾ Powells Diskussion über die Schrift von Prof. White, A. S. M. E. Journ. Dez. 1920.

⁷⁾ Stromeyer: I. and St. Inst. 1907 und Quack: V. d. I. 1925, S. 1091.

⁸⁾ Rosenhain: Far. Soc. 1921.

⁹⁾ I. and St. Bd. 1, S. 220ff. 1898.

¹⁰⁾ V. d. I., Forschungsheft 252.

¹¹⁾ Boiler Maker, Febr. 1926.

¹²⁾ S. W. Parr und F. G. Straub S. 43, Abs. 3.

¹³⁾ S. W. Parr und F. G. Straub Tafel II, S. 27.

sich mehr als 20000 Grains je Gallone Kalzium- und Magnesiumsalze angelagert haben. Daß sich tatsächlich Kalzium- und Magnesiumsalze in den Nähten niederschlagen, wurde bewiesen durch die Analyse von Ablagerungen, die man aus den Nähten eines brüchig gewordenen Kessels, der derartiges Wasser verbraucht hatte, herausgenommen hatte. Warum haben diese Kalzium- und Magnesiumsalze die Aktion nicht aufgehalten, wenn ein schützender mechanischer Überzug alles ist, was hierzu erforderlich ist?

In dem zweiten Absatz auf S. 19 der Schrift von Parr und Straub wird festgestellt, daß die in dem Laboratorium brüchig gemachten Proben eine große Zahl von interkristallinen Rissen zeigen, die sich in den beanspruchten Teil hinein erstrecken. Es wird jedoch nicht festgestellt, ob auch der schließliche Bruch selbst interkristalliner Natur war. Jones¹⁾, der, wie oben erwähnt, ähnliche Versuche machte als die, die in der vorliegenden Schrift beschrieben sind, stellte folgendes fest: „Im Falle der stärker konzentrierten Lösungen traten zuerst einige interkristalline Risse auf, aber der endgültige Schaden wurde im allgemeinen durch einen Bruch durch die Kristalle verursacht.“

Es wäre von Interesse zu erfahren, ob Prof. Parr diese Feststellung auf Grund seiner Versuche bestätigen kann.

In einem guten Betrieb kann der Ingenieur den Umstand, daß Kesselteile über die Streckgrenze beansprucht werden, nicht mit Gleichmut ansehen. Die Ansicht, daß derartige übermäßige Spannungen mit in Kauf genommen werden müssen, weil sie angeblich unvermeidlich sind, muß stark in Frage gestellt werden angesichts der vielen Untersuchungen, die die Gefahr zeigen, die hiermit verbunden ist, z. B. Ermüdung²⁾, das Verhalten von Metallen unter Dauerbeanspruchungen bei erhöhten Temperaturen³⁾, Einfluß von Deformation von Stahl bei verschiedenen Temperaturen auf Schlagprüfungen⁴⁾, der Einfluß von Stößen, interkristalline Ermüdung⁵⁾ sowie die Bestimmung der Dehnung von dicken Kesselblechen⁶⁾. Diese Untersuchungen müssen betrachtet werden im Zusammenhang mit Prof. Parrs Ergebnissen bei der Bestimmung der Ursache von Schäden. Auch das statistische Material, welches sich voraussichtlich in Zukunft noch ansammeln wird aus der Empfehlung in dem Boiler Code der A. S. M. E., Abschnitt „Kesselpflege“, nämlich: „alle Nähte zu untersuchen, welche lecken und nach entsprechendem Verstemmen nicht dicht bleiben“, dürfte noch dazu beitragen, unsere Kenntnis zu vergrößern über die verschiedenen Ursachen der zur Diskussion stehenden Schäden.

Man hat bereits Schritte unternommen, um von genieteten Nähten für Hochdruckkessel vollständig abzugehen. Diese Art der Konstruktion ist im Ausland bereits angenommen worden, sogar auch für Kessel, die unter mittlerem Druck stehen. Der Übergang hierzu macht es möglich,

1. die Notwendigkeit der Anhäufung größerer Stahlmassen an Nähten zu vermeiden, was immer eine Ungleichmäßigkeit der Wärmefortführung mit sich bringt, und

2. wird hierdurch ein geeignetes Glühen der fertigen Trommel nach ihrer Herstellung ermöglicht, was bei genieteten Trommeln nicht der Fall ist, so daß die nicht wünschenswerten inneren Spannungen, die auf die Herstellung zurückzuführen sind, behoben werden können oder zum mindesten auf eine sehr kleine zulässige Grenze zurückgeführt werden können.

Es mag von Interesse sein zu erwähnen, daß im Ausland nicht nur geschmiedete, sondern sogar wassergasgeschweißte Trommeln in Gebrauch gekommen sind, die nach geeignetem Glühen einem hohen hydraulischen Druck unterworfen werden, um ihre Dichtigkeit zu prüfen. Dann werden sie wieder gegläht, um die Spannungen zu beheben, die durch den hydraulischen Druck verursacht worden sind. Die Enden dieser Trommeln werden dann auf einer Drehbank abgedreht, wie dies bei gewölbten Kesselböden der Fall ist nach dem Glühen, um ein entsprechendes Einpassen zu gewährleisten. Genietete Rundnähte, die auf diese Weise entstehen, sind die einzigen Nähte an der Trommel.

¹⁾ Far. Soc., Dez. 1921.

²⁾ Z. B. U. O. I. Bull. 124, 136, 142 und 152.

³⁾ Z. B. French: A. S. T. M., Druckschrift 26.

⁴⁾ Richardson und McNutt: A. S. S. T. April 1924; Körber und Pomp: K. W. I. 1925.

⁵⁾ Smith, A. O. Corp. und Prof. Jasper: J. A. W. S. Jan. 1926.

⁶⁾ Baumann: B. R. V. 1925, Nr. 6, 7 und 8.

IV. Schutz der Kesselwandung gegen Einflüsse des Kesselwassers.

Chemische Einwirkung des Kesselinhaltes auf Eisen.

Von Prof. Dr. A. Thiel, Marburg.

Referat auf der Sitzung des Arbeitsausschusses für Speisewasserpflege der Vereinigung der Großkesselbesitzer am 14. Mai 1926 in Rothenburg o. T. und auf der wissenschaftlichen Tagung am 17. Sept. 1926 in Kassel.

1. Über die Einwirkung von wäßrigen Lösungen und von Wasser auf Eisen (Kesselblech).

Die seit September 1925 im Physikalisch-Chemischen Institut zu Marburg ausgeführten Untersuchungen hatten als nächstes Ziel die Entscheidung der Frage, ob die vermutete Aufnahme von Natrium durch Eisen unter Bedingungen, wie sie lokal beim Dampfkesselbetrieb vorkommen können, tatsächlich stattfindet.

Auf der Darmstädter Tagung der Vereinigung war über Versuche berichtet worden, bei denen die Einwirkung konzentrierter Laugen auf Eisenpulver zu Produkten geführt hatte, deren Verhalten (Wasserstoffentwicklung schon in der Kälte mit schwach alkalischem Wasser, langdauernde gleichzeitige Abgabe von Lauge) die obengenannte Erklärung nahelegte. Denn nach den im wesentlichen übereinstimmenden Angaben der Literatur¹⁾ war als sicher anzunehmen, daß reines Eisen, auch im aktivierten Zustande, sich bei Zimmertemperatur in schwach alkalischen Flüssigkeiten nicht unter Wasserstoffentwicklung lösen kann; schreibt man doch solchen Flüssigkeiten sogar eine erhebliche Rostschutzwirkung in Gegenwart von Sauerstoff zu, also unter Bedingungen, welche die Ionisierung des Metalls begünstigen. Die vorhandenen Potentialmessungen an aktivem Eisen lassen jedenfalls keine Möglichkeit für eine Zersetzung verdünnter Laugen durch Eisen unter Wasserstoffentwicklung bei Zimmertemperatur erkennen. Somit lag die Annahme nahe, daß das Eisen eine solche Fähigkeit einem Gehalte an Alkalimetall verdankte.

Von dem ursprünglich im Zusammenhange mit der Aussprache bei der Darmstädter Tagung beabsichtigten Versuche, das im Eisen vermutete Natrium direkt (etwa durch Verflüchtigung oder durch Amalgamierungsversuche) nachzuweisen, wurde abgesehen auf Grund der Überlegung, daß bei der festgestellten Unmöglichkeit einer Trennung des überschüssigen Eisens von den ihm fest anhaftenden Oxydationsprodukten mit Sicherheit eine chemische Veränderung des verdampfenden Alkalimetalls beim Passieren der Oberfläche zu erwarten war. Es ließ sich keine Isolierungsmethode erdenken, die unmittelbar Alkalimetall lieferte, und auch jeder Versuch, die vermutete Eisen-Natrium-Legierung als solche zu erweisen, mußte angesichts der unablösbaren Deckschicht aus Oxyden aussichtslos erscheinen.

So blieb denn nur ein indirektes Verfahren übrig. Als solches sollte die Untersuchung der von dem vorbehandelten Eisen einerseits entwickelten Wasserstoffmenge und andererseits abgegebenen Laugenmenge dienen. Zeigte sich Äquivalenz beider Reaktionsprodukte, so war damit ihre Entstehung aus Natriummetall und Wasser höchst wahrscheinlich und, wenn diese Äquivalenz stets auftrat, als sicher anzunehmen.

Ehe nun auf den systematischen Gang der Untersuchung ausführlich eingegangen wird, möge mit Rücksicht auf das Verlangen des Ingenieurs nach dem praktischen Forschungsergebnis des Chemikers das Ergebnis vorweggenommen werden.

Hauptergebnis nebst Schlußfolgerungen.

1. Gewöhnliches Eisen wirkt bei 100° und noch viel stärker bei 200° auf reines Wasser und auf Laugen (NaOH) jeder Konzentration ein. Das Minimum des Angriffs liegt in beiden Fällen zwischen 0,1 und 0,5 n Lauge.

¹⁾ Siehe z. B. Foerster, Abhandlungen d. Bunsen-Gesellschaft. — Liebreich, Rost u. Rostschutz. — Evans, Korrosion der Metalle. — E. Müller, Das Eisen.

2. Aktiviertes Eisen (Anätzung mit Säure) zersetzt sogar 0,01 n Lauge schon bei Zimmertemperatur.

3. Die passivierende Wirkung von Basen (Schutzschichtbildung) tritt in Gegensatz zu der durch die Wasserstoffbildung bei hohen Temperaturen verursachten Aktivierung des Eisens. Das Verhalten des Metalls wird sich nach dem Vorherrschen des einen oder des anderen Einflusses richten.

4. Die schützende Oxydschicht scheint eine Verbindung (oder Mischung von Verbindungen) mit höherem Sauerstoffgehalte, als der Formel FeO entspricht, zu sein; sie ist frei von Hydroxyden.

5. Mit stärkeren Laugen bei 200° behandeltes Eisen gibt Produkte von zwei verschiedenen Typen:

ein unter Wasser auch bei alkalischer Reaktion Wasserstoff entwickelndes Produkt, das langsam und sehr lange Lauge abgibt, und ein indifferentes Produkt, das sein Alkali schnell beim Waschen verliert. Nachträgliche Behandlung mit Lauge in der Kälte bedingt nicht die Erscheinung der hartnäckigen Adsorption.

6. Eine Untersuchung zur Aufklärung des Wesens der aktiven und langsam Alkali abgebenden Produkte verspricht erst dann Erfolg, wenn die Reaktion zwischen Eisen und Wasser bzw. verdünnten Laugen in jeder Beziehung erforscht ist.

7. Es ist denkbar, daß die durch Laugen hervorgerufenen Zerstörungen des Eisens auf der Bildung von Wasserstoff am Eisen und seinem Eindringen in das Metall beruhen, mithin eine besondere Form der Beizbrüchigkeit bilden.

8. Ob statt dessen oder daneben noch eine analoge Rolle der Alkalimetalle in Betracht kommt, ist im jetzigen Stadium der Forschung noch nicht zu entscheiden. Die Vermutung einer Aufnahme von Natrium durch Eisen ist bisher weder bewiesen noch widerlegt. Einige Beobachtungen am laugebehandelten Eisen lassen sich bis jetzt schwer ohne jene Annahme deuten.

9. Besondere Bedeutung für die Korrosionserscheinungen am Eisen dürfte den Schutzschichten (aus Oxyden) zukommen, die sich bei der Einwirkung wäßriger Lösungen auf dem Metall bilden. Es ist denkbar, daß ihre Zusammensetzung und ihre mechanische Beschaffenheit von der Art und Konzentration des Alkalis und von der Gegenwart sonstiger Elektrolyte im Wasser abhängen. Auf dieser Grundlage beruht vielleicht die Verschiedenheit in der Wirkung verschiedener Alkalien.

10. Nächste Aufgabe der Forschung ist das Studium der Natur und der Bildungsbedingungen der Schutzschichten im Zusammenhange mit der Art und Konzentration der im Wasser gelösten Stoffe, der Temperatur und den Einflüssen, welche einerseits aktivierend, andererseits passivierend auf Eisen einwirken. Hierbei wird die Frage nach der Aufnahme von Wasserstoff durch das Eisen eine besondere Rolle spielen, desgleichen die Adsorption von Lösungsbestandteilen durch die Schutzschicht. Die Dicke der letzteren und das etwaige Auftreten von Einwirkungsgrenzen ist von besonderer Wichtigkeit.

11. Die bisherigen Kenntnisse von der Elektrochemie des Eisens sind, wie einige der mitgeteilten Versuche zeigen, in mancher Hinsicht noch lückenhaft. Ihre Erweiterung, namentlich für das Gebiet der höheren Temperaturen, ist für die Beherrschung der Speisewasserprobleme nicht zu entbehren.

12. Untersuchungen an verformtem Eisen entbehren so lange einer sicheren Grundlage, als noch unzureichende Kenntnis vom Verhalten des normalen Eisens herrscht. Denn jedes Studium pathologischer Erscheinungen setzt genügende Beherrschung der normalen (physiologischen) Erscheinungen voraus.

Versuchsdurchführung.

Die systematischen Versuche zur Gewinnung von Präparaten, die entsprechend den früher beschriebenen Ergebnissen mit reinem Wasser bzw. in schwach alkalischer Lösung schon bei Zimmertemperatur, mehr noch beim Erhitzen bis zum Sieden, Wasserstoff und Lauge gaben, lieferten merkwürdige und zunächst unerklärliche Resultate. Als nämlich aus Gründen der Materialersparnis mit geringeren Mengen von Eisen gearbeitet wurde (bei praktisch dem gleichen Mengenverhältnis von Eisen zu Lauge und in derselben Apparatur wie bei den ersten Versuchen dieser Art), entstanden Reaktionsprodukte, die äußerlich keine Besonderheiten boten, aber weder Wasserstoffentwicklung noch auch die typische langsame Nachlieferung von Lauge zeigten. Dagegen ließ sich die früher geschilderte Erscheinung sofort reproduzieren, wenn man wieder, wie früher, mit größeren Eisenmengen (ca. 150 g) arbeitete.

In beiden Fällen wurde nun zunächst die Abgabe der Lauge quantitativ untersucht. Das charakteristische Bild des Verhaltens in einem wie im anderen Falle sei durch die folgenden Beispiele illustriert.

a) Große Menge Eisen.

150 g Eisenpulver (Kesselblechfeile) wurden mit 30 ccm karbonatfreier 2 n Natronlauge im Autoklaven zwei Stunden lang auf 200° erhitzt. Der Inhalt des eisernen Versuchsrohres war vollkommen trocken geworden. Das Produkt wurde mit 500 ccm kohlenstofffreien destillierten Wassers übergossen, geschüttelt, der Bodenkörper absitzen gelassen, die Lösung dekantiert und mit Salzsäure titriert.

Weiterhin wurde dann jedesmal mit 250 ccm Wasser übergossen, 15 Sekunden lang intensiv (in einer Flasche) geschüttelt, 2 Minuten lang absitzen gelassen, dekantiert und titriert. In einzelnen Fällen blieb das Produkt längere Zeit mit dem Wasser in Berührung, bevor abgegossen wurde.

Die Verteilung der titrierten Lauge (die ursprünglich 65,3 ccm n-HCl entsprach), auf die verschiedenen Auszüge ist aus der folgenden Zusammenstellung ersichtlich.

Zu diesen 51,36 ccm HCl sind noch 0,4 ccm zu addieren als Äquivalent der im Autoklavenwasser aufgefundenen Lauge. Ferner ist die beim Schütteln und Abgießen aus der Luft aufgenommene Kohlenensäure zu berücksichtigen. Die oben angegebenen Werte wurden mit Phenolphthalein als Indikator erhalten. Titriert man jedesmal weiter bis zum Umschlage des Methylorange und zieht vom Ergebnis das eines Blindversuches mit reinem Wasser ab, so erhält man eine weitere Menge Salzsäure, die dem gebildeten Karbonat entspricht. Dieser Zusatzwert enthält beträchtliche Versuchsfehler, weil er sich aus 47 Einzelwerten zusammensetzt. Als obere Grenze ergibt sich aber ein Wert von rund 7 ccm Säure. Zusammen ist mithin eine Menge von Lauge wie-

Nr. des Auszugs	ccm l n HCl	Bemerkungen	Nr. des Auszugs	ccm l n HCl	Bemerkungen
1	16,4		24	0,5	Absaugen statt Dekantieren
2	6,0				
3	2,8		25	0,4	von hier ab stets wie 24
4	1,9				
5	1,5		26	0,15	
6	1,3		27	0,15	
7	1,2		28	0,10	
8	1,55	4 Minuten stehen gelassen	29	0,06	
			30	0,03	
9	1,2		31	0,85	60 Stunden stehen gelassen
10	0,95				
11	0,8		32	0,55	
12	0,7		33	0,20	
13	0,65		34	0,13	
14	0,6		35	0,08	
15	0,5		36	0,04	
16	0,38		37	0,03	
17	0,23		38	0,02	
18	0,15		39	3,9	2 Stunden gekocht
19	0,10		40	0,4	
20	0,08		41	0,1	
21	0,85	30 Stunden stehen gelassen	42	0,06	
			43	0,04	
22	2,8	40 Std. stehen gel., mehrfach geschütt.	44	0,03	
			45	0,02	
23	0,6	20 Stunden stehen gelassen	46	0,22	wie 39
			47	0,06	

1 bis 47 = 51,36 cm HCl

dergefunden worden, die rund 59 ccm Salzsäure entspricht statt rund 65 ccm, d. h. rund 91%.

Auf dieses Zahlenergebnis ist aber weniger Wert zu legen als auf das typische Bild der langsamen Erschöpfung des Gehaltes an Alkali im Präparat.

b) Kleine Menge Eisen.

Nur 35 g Eisenpulver und 15 ccm Lauge; sonst alles genau wie bei a).

(Das zunächst unerklärliche Mehr an Lauge beruht, wie später gefunden wurde, auf der Verunreinigung der Feilspäne — nur dieser einen Lieferung — mit einem basisch reagierenden Stoffe; diese Verunreinigung wurde später durch Vorbehandlung entfernt. Hier kommt es aber nur auf den Gang der Laugenabgabe im ganzen an, und daher wird das Originalergebnis ohne jede Korrektur mitgeteilt.)

Nr. des Auszugs	ccm l n HCl	Bemerkungen
1	30,0	statt Dekantieren überall Filtration
2	2,2	
3 u. ff.	0,0	auch bei längerem Stehen
im Autoklaven für Karbonatgehalt	2,7	
	2,2	mit Methylorange
zusammen	37,1 ccm	statt 32,7

c) Nachträgliche Adsorption.

Die Verschiedenheit im Verhalten der Fälle a) und b) lehrt, daß die Langsamkeit der Laugenabgabe bei a) nicht gut von der Adsorption der Base am Eisenoxydüberzug bzw. der Bildung und dem späteren Zerfall einer salzartigen Verbindung des Oxyds mit der Base beruhen kann. Zur Prüfung dieser Folgerung wurde das Endprodukt der Extraktion im Ver-

such a), im ganzen 125 g, mit 25 ccm 2 n karbonatfreier Lauge 3 Tage lang stehen gelassen und dann in derselben Weise ausgezogen wie in Versuch a). Ergebnisse nebenstehend.

Nr. des Auszugs	ccm In HCl	Bemerkungen
1	51,5	
2	2,7	
3	0,3	
4	0,1	
5	0,05	30 Stunden stehen gelassen
6	0,05	60 " " "
7	0,02	24 " " "
8	0,02	24 " " "
9	0,01	48 " " "
1 bis 4	54,6 statt 54,3	

Bereits nach 4—5 Auszügen befindet sich also das Präparat wieder in dem Zustande, den es vor der Zugabe der zu adsorbierenden Lauge hatte, und letztere ist vollkommen ausgewaschen.

Die Verschiedenheiten im Verhalten der Produkte aus viel und aus wenig Eisen lassen sich somit kaum durch Adsorptionerscheinungen oder Ähnliches erklären, zumal da die Adsorption überhaupt keine besonders hervorstechende Rolle zu spielen scheint. Dagegen liegt die Vermutung nahe, daß die kleineren Eisenmengen durch die Einwirkung von Luftsauerstoff im Autoklaven

oberflächlich verändert werden, so daß sie die dem überschüssigen metallisch blanken Eisen eigenen Reaktionen nicht mehr geben.

In der Folge wurden daher Versuche unter gänzlichem Ausschlusse von Sauerstoff ausgeführt.

Kleinere Mengen von Eisen wurden mit Lauge in zugeschmolzenen Röhrcchen aus Jenaer Glas auf 200° erhitzt. Vor dem Zuschmelzen und schon vor der Zugabe der Lauge wurde mit Hilfe einer Hochvakuumpumpe jede Spur von Luft entfernt. Die Röhrcchen wurden in einen eisernen Schutzzylinder mit Schraubkappe gestellt und mit diesem im Autoklaven auf 200° erhitzt.

Alle so angesetzten Versuche ergaben schon in den ersten Stadien (wenn die Temperatur kaum auf 200° gestiegen war) Explosion der Röhrcchen. Die Ursache dieser Erscheinung ist in der lebhaften Gasentwicklung bei der Einwirkung des Eisens auf die Lauge zu suchen.

Weiterhin wurden dann Versuche mit offenen Röhrcchen, jedoch unter Gewährleistung der Sauerstofffreiheit, angestellt. Zu diesem Zwecke wurde das Röhrcchen unter Zwischenschalten eines Hahnes nach dem Auspumpen an der Hochvakuumpumpe ganz mit Lauge gefüllt, das abwärts gebogene freie Ende des Hahnrohres unter Quecksilber getaucht und das Gefäß zusammen mit dieser Absperrvorrichtung in den Autoklaven gebracht. Die so hergerichteten Röhrcchen zeigten sich am Ende des Versuches (2 Stunden Dauer) völlig unversehrt; das zur Absperrung benutzte Quecksilber war nicht nach innen eingedrungen. Die Flüssigkeit in der Röhre war vollkommen verschwunden, die Röhre über dem schwarzen, festen Reaktionsprodukt mit Gas (Wasserstoff) gefüllt.

Das Reaktionsprodukt gab Gasentwicklung beim Behandeln mit Wasser und zeigte langsame Laugenabgabe.

Nunmehr wurde zu der Prüfung des etwaigen quantitativen Zusammenhanges zwischen Gasbildung und Laugenbildung übergegangen. Erstere wurde bestimmt, indem die Präparate auf dem Filter ausgewaschen wurden, bis keine alkalische Reaktion in einer bestimmten Menge Waschwasser mehr zu erkennen war, und dann im Kolben am Rückflußkühler mit reinem Wasser gekocht wurden. Hierbei passierte ein langsamer Strom kohlenstofffreier Luft den Gasraum des Kolbens und strich dann nach energischer Trocknung über erhitzten Palladiumasbest, worauf er über ein Wasserabsorptionsgefäß das System verließ. Der im Kochkolben gebildete und am Palladium zu Wasser verbrannte Wasserstoff wurde somit in der Trockenvorlage als Wasser gewogen. Im Kolbeninhalt wurde dann am Schluß des Versuches die Menge der gebildeten Lauge durch Titration bestimmt.

Die Ergebnisse waren keineswegs eindeutig. Es wurde je nach der Herstellungsweise des Präparates bald die vielfache Menge Lauge (gegenüber der dem Wasserstoff äquivalenten), bald nur ein Bruchteil der zu erwartenden gefunden.

Eine weitere Verfolgung dieser Verhältnisse wurde aber unterbrochen durch die bei Blindversuchen aufgefundene Tatsache, daß schon das rohe, also in keiner Weise vorbehandelte Eisenpulver unter den gleichen Bedingungen deutlich Wasserstoff liefert, und zwar in Mengen von derselben oder gar noch höherer Größenordnung wie die Eisen-Lauge-Präparate.

Da sich hiermit die Grundlage der Prüfungsmethode auf etwaige Äquivalenz zwischen Wasserstoff und Lauge vollkommen veränderte, verschob sich auch die Richtung der Untersuchung. Denn jetzt mußte vor allen Dingen das Verhalten des unbehandelten Eisens gegen Wasser und verdünnte Laugen unter den für die beabsichtigte Prüfung in Betracht kommenden Bedingungen festgestellt werden. Bei der grundsätzlichen Wichtigkeit der Ergebnisse für die Beurteilung der Vorgänge im Kessel wurde die Untersuchung, soweit möglich, gleich auch auf Versuche unter Kesselbedingungen ausgedehnt.

Ziel der Untersuchung war die Ermittlung des Angriffs, den das Eisenpulver in Wasser und in Lauge unter verschiedenen Bedingungen der Konzentration und der Temperatur erfährt.

Hierbei wurde zunächst von konzentrierteren Laugen im allgemeinen abgesehen und vor allem dasjenige Gebiet berücksichtigt, das einerseits bei der Nachbehandlung der oben besprochenen Reaktionsprodukte in Betracht kam, andererseits auch für die Erkenntnis der Vorgänge im normalen Kesselbetriebe von Bedeutung ist.

Daß beim Erhitzen von Eisen mit konzentrierteren Laugen ein rascher Angriff unter Bildung reichlicher Mengen von Wasserstoff erfolgt, ist nach den Beobachtungen an den verschmolzenen Röhren zweifellos, war übrigens auch nach den Angaben der Literatur zu erwarten, wenn auch vielleicht nicht mit der beobachteten großen Reaktionsgeschwindigkeit. Diese Reaktion, der eine Komplexbildung der Ionen des Eisens zugrunde liegt, ist augenscheinlich auch die Ursache für das Eintrocknen der Lauge über dem Eisen; das Wasser der Lauge wird durch die Reaktion mit dem Metall verbraucht (auch das dabei auftretende Schäumen dürfte zu Laugenverlusten führen).

I. Versuche im Einschmelzrohr. Je 25 g Eisenpulver, dessen Sauerstoffgehalt durch Glühen im Wasserstoffstrom und Wägung des gebildeten Wassers zu 0,11% ermittelt worden war, wurde mit 5 ccm reinsten Wassers (Leitfähigkeitswasser) im Hochvakuum eingeschmolzen und unter Verwendung eines eisernen Schutzgefäßes verschieden lange im Autoklaven auf 200° erhitzt. Keines der Röhren platzte dabei; dagegen entwich beim Öffnen an der Flamme heftig Wasserstoff, während beim Abbrechen der Spitze Zertrümmerung erfolgte.

Der Zusammenhang zwischen Sauerstoffaufnahme (durch Reduktion mit Wasserstoff bestimmt) und Erhitzungsdauer ist aus folgender Zusammenstellung zu ersehen.

Wie man sieht, ist noch nach 4 Stunden die Einwirkung im Fortschreiten. Für Versuche von noch längerer Dauer wäre wegen des sich dann bildenden sehr starken Druckes eine Änderung der Apparatur (wesentliche Komplikation) erforderlich; diese Versuche wurden daher vorläufig zurückgestellt. Über die Dicke der erzeugten Oxydschicht gibt eine einfache Überschlagsrechnung Auskunft.

Erhitzungs- dauer Stunden	Sauerstoffgehalt	
	%	
1	0,24	
2	0,35	0,37
4	0,91	0,94

25 g oder 3,3 ccm des Eisenpulvers haben nach einer früher (siehe Darmstädter Tagung) mitgeteilten angenäherten Bestimmung etwa eine Oberfläche von 0,2 qm oder 2000 qcm. Nehmen wir als Oxydationsprodukt vorläufig FeO an (siehe weiter unten), so entsprechen 1% Sauerstoff rund 4,5% Oxyd.

Bei einer Dichte des FeO von rund 5 würden 1% von 25 g oder 0,25 g FeO ein Volum von 0,05 ccm und bei einer bedeckten Oberfläche von 2000 qcm eine Dicke von $0,05 : 2000 = 2,5 \cdot 10^{-5}$ cm = 0,25 μ haben. 1% O entsprechend 4,5% FeO würde also auf eine Schicht von 1,13 μ schließen lassen. In den oben angegebenen Fällen gelangt man zu mittleren Schichtdicken von 0,24 bzw. 0,40 bzw. 1,05 μ .

II. Versuche mit offenen Gefäßen im evakuierten Autoklaven. Als Vorarbeiten zu Dauer- versuchen, aus denen sich die Grenze der Einwirkung bei 200° ergeben sollte, wurden dann Untersuchungen mit offenen Glasgefäßen durchgeführt. Je 2,5 g Eisen, das durch Waschen mit Äther und sorgfältige Trocknung im Vakuum gereinigt worden war, wurden in kleinen Rundkolben mit engem Hals unter Hochvakuum mit der Versuchsflüssigkeit überdeckt (je 50 ccm). Der Kolben wurde dann offen in den Autoklaven gestellt, nachdem der Hals kapillar ausgezogen worden war, um das Hineinspritzen von Wasser zu verhüten. Der Autoklav wurde eine halbe Stunde lang (nach besonderer Abdichtung) mit einer gut wirkenden rotierenden Ölpumpe hoch evakuiert, worauf ohne Zutritt von Luft auf über 100° erhitzt und dann erst die Abdichtung aufgehoben wurde. Ein Eindringen von Luft ist unter diesen Umständen ausgeschlossen; das Vakuum wurde manometrisch kontrolliert.

Der Angriff des Eisens, dessen ursprünglicher Sauerstoffgehalt zu 0,14% ermittelt worden war, wurde durch Reduktion des Produktes mit Sauerstoff und Wägung des gebildeten Wassers bestimmt. Die Dauer der Einwirkung betrug überall 2 Stunden. Es wurden nebenstehende Ergebnisse erhalten.

Hierdurch ist der einwandfreie Beweis geliefert, daß auch unter den Bedingungen des Kesselbetriebes Wasser stärker angreift als verdünnte Lauge. Das Angriffsminimum liegt zwischen 0,1 n und 0,5 n Lauge.

Einwirkende Flüssigkeit	Sauerstoffgehalt (%)		
	Einzelwerte		Mittel
Wasser (reinstes)	0,16	0,16	0,16
NaOH 0,01 n	0,10	0,13	0,12
NaOH 0,1 n	0,05	0,05	0,05
NaOH 0,5 n	0,30	0,35	0,33

Die für Wasser beobachtete Differenz gegenüber den Versuchen der ersten Versuchsreihe kann zum Teil auf Verschiedenheiten im Eisenmaterial beruhen; vielleicht aber trägt da-

zu auch der Umstand bei, daß bei jenen Wasserstoff unter hohem Druck zugegen war, was einer dauernden Aktivierungswirkung gleichkommen dürfte.

III. Versuche bei 100°. Um auch die Entwicklung von Wasserstoff bei der Einwirkung von Wasser und von Laugen auf Eisen zu verfolgen (neben einer Untersuchung der Sauerstoffaufnahme), wurden Versuche bei 100° unternommen, die das Arbeiten in Kochkolben mit Rückflußkühler gestatteten. Solche Versuche sind notwendig als Grundlage für die Bewertung der Ergebnisse analoger Messungen an den Produkten der Einwirkung konzentrierter Laugen auf Eisen.

A. Wasserstoffbestimmungen. Je 50 g Eisenpulver wurden in einem Rundkolben am Rückflußkühler mit 250 ccm Flüssigkeit gekocht. Dabei wurde ein CO₂-freier langsamer Luftstrom über die Flüssigkeit geleitet. Die Luft nahm also den entwickelten Wasserstoff mit und verbrannte ihn, nachdem die Gase sorgfältig getrocknet worden waren, in einem Palladiumasbestrohre zu Wasser, das in einem Trockenrohre mit P₂O₅ aufgefangen und durch

Gewogenes Wasser		Wasserstoffmenge
a ₁)	0,0220 g	0,0025 g = 27 ccm (0°, 760 mm)
a ₂)	0,0243 g	0,0027 g = 30 ccm (0°, 760 mm)
Wasser		Wasserstoff
a ₃)	0,0019 g	0,00021 g = 2,4 ccm (0°, 760 mm)

Wägung bestimmt wurde. Durch Blindversuche wurde festgestellt, daß bei Abwesenheit von Eisen keine Spur von Wasser entstand.

a) Kochen mit Wasser. Kochdauer 2 Stunden.

Nachdem (in einem neuen Versuche) das Kochen (ohne Auffangen des Wasserstoffs) 30 Stunden lang durchgeführt war,

wurde weitere 2 Stunden lang gekocht und der in dieser Zeit entwickelte Wasserstoff bestimmt.

Die Bildung einer Schutzschicht (noch unvollkommen) ist unverkennbar.

Sauerstoff gefunden		dem entwickelten H ₂ äquivalente Menge Sauerstoff
%	Gesamtmenge g	
a ₁)	0,13	0,090
a ₂)	0,195	0,098
a ₃)	0,51	0,253

Das Produkt der obigen Versuche wurde nach dem Trocknen auf Sauerstoffgehalt geprüft, wobei durch Glühen im Stickstoffstromen zunächst festgestellt wurde, daß kein Hydroxyd, sondern nur Oxyd vorlag. Bei der Reduktion mit Wasserstoff ergaben sich folgende Sauerstoffgehalte (Wägung als Wasser).

b) Kochen mit 0,01 n NaOH. Ausführung wie bei a).

Wasserstoffbestimmung			äquivalenter Sauerstoff, berechnet
H ₂ O g	H ₂ g	H ₂ ccm	
b ₁)	0,0130	0,0015	17
b ₂)	0,0116	0,0013	14

c) Kochen mit 0,1 n NaOH. Ausführung wie bei a).

Wasserstoffbestimmung			äquivalenter Sauerstoff, berechnet
H ₂ O g	H ₂ g	H ₂ ccm	
c ₁)	0,0054	0,00060	6,7
c ₂)	0,0047	0,00053	5,9

d) Kochen mit 0,5 n NaOH; sonst wie vorher.

Wasserstoffbestimmung			äquivalenter Sauerstoff, berechnet
H ₂ O g	H ₂ g	H ₂ ccm	
d ₁)	0,0063	0,00071	7,8
d ₂)	0,0062	0,00069	7,7

Auch bei 100° liegt also das Minimum des Angriffs zwischen 0,1 n und 0,5 n NaOH; jedoch ist der Wiederanstieg nicht so stark, was wohl auf geringerer Komplexbildung als bei 200° beruht.

Wie die Versuchsreihe a) zeigt, wird mehr Sauerstoff vom Eisen aufgenommen, als dem entwickelten Wasserstoff äquivalent ist. Diese Erscheinung wird vermutlich durch die Gegenwart von Luft über der kochenden Flüssigkeit verursacht. Um diesen Einfluß auszuschließen, wurden noch Versuche in einer von Sauerstoff völlig befreiten Stickstoffatmosphäre

ausgeführt. Hierbei war allerdings in der bisherigen Versuchsanordnung nicht auch gleichzeitig die Wasserstoffbestimmung möglich. Die Parallelbestimmung beider Elemente erfordert die sorgfältige Ausarbeitung einer einwandfreien Analysenmethode, die noch nicht durchgeführt werden konnte¹⁾. Es wurde daher zunächst eine Versuchsreihe angestellt, die zur Ermittlung nur der Sauerstoffaufnahme diene. Die Versuchsbedingungen waren die gleichen, wie bei der Hauptreihe A, nur wurde statt Luft reiner Stickstoff über die Flüssigkeit geleitet, auf die Wasserstoffbestimmung wurde hierbei verzichtet.

B. Sauerstoffbestimmungen. Die Versuche wurden in derselben Apparatur ausgeführt wie bei A. Als Fremdgas diene von Sauerstoff befreiter Stickstoff.

a) Kochdauer 72 Stunden.

b) Kochdauer weitere 24 Stunden (Präparat von a) weiterbehandelt).

Flüssigkeit	% Sauerstoff	äquival. Menge H ₂
Wasser	0,71	494 cem (1026)
NaOH 0,01 n	0,42	290 „ (558)
NaOH 0,1 n	0,20	142 „ (227)

Flüssigkeit	% Sauerstoff
Wasser	0,89 (0,95)
NaOH 0,01 n	0,54 (0,56)
NaOH 0,1 n	0,30 (0,27)

Die Reihenfolge der Einwirkungen ist also auch unter den Bedingungen der Versuchsreihe B dieselbe wie bei den vorhergehenden Versuchsreihen, d. h. der Angriff sinkt in dem hier benutzten Konzentrationsbereiche mit steigendem Gehalte an Base. Die eingeklammerten Wasserstoffwerte geben an, wieviel Wasserstoff entstehen müßte, wenn die Reaktion mit der in den Versuchen der Reihe A (a—c) beobachteten Geschwindigkeit weiterginge (nach den Mittelwerten berechnet). Das Nachlassen der Reaktion ist unverkennbar, zumal in Ansehung des Umstandes, daß bei A wegen der Anwesenheit von Luft an sich wohl schon relativ geringe Reaktionsgeschwindigkeiten (der H₂-Bildung) auftreten dürften.

Die eingeklammerten Sauerstoffwerte unter b) entsprechen dem Fortgang der Reaktion auch im letzten Zeitabschnitte (24 Stunden) mit der in dem vorhergehenden Zeitabschnitte (72 Stunden) gefundenen mittleren Geschwindigkeit.

Versuche zur Darstellung reinen Oxydationsproduktes.

Für die Untersuchung der Adsorption von Alkali am Eisenoxydul, sei es nun, daß dabei eine chemische Reaktion (Komplexbildung) erfolgt oder nicht, ist die Verwendung reinen Oxydationsproduktes ohne überschüssiges Metall wünschenswert. Es wurde daher versucht, das Oxyd vom Metall mechanisch zu trennen. Zu diesem Zwecke wurde Eisen mit 2 n NaOH in der üblichen Weise im Autoklaven auf 200° erhitzt. 75 g Eisenpulver wurden in einem Eisenzylinder mit loser Schraubkappe mit etwa 70 cem Lauge bedeckt. Nach dem Versuche war die Lauge fast ganz eingetrocknet; der Autoklav zeigte erheblichen Wasserstoffdruck.

Bei einer nochmaligen Behandlung (des Produktes der ersten Behandlung) in gleicher Weise blieb das Laugenvolum praktisch unverändert, ebenso bei einer dritten Behandlung (diesmal mit gesättigter Natronlösung).

Der Sauerstoffgehalt des gewaschenen und getrockneten Produktes betrug 8,3%. Das Pulver wurde in der Kugelmühle gemahlen, um das spröde Oxyd vom Eisen abzulösen, und dann der spezifisch leichteste Anteil durch Schlämmen (mit Wasser) abgetrennt. Das dabei erhaltene schwarze Pulver ähnelte im Aussehen dem käuflichen Eisenoxydul (Kahlbaum). Sein Sauerstoffgehalt betrug 21,8%. Die Formel FeO verlangt 22,3% Sauerstoff. Da sich jedoch beim Auflösen der Säure noch ein gewisser, bei der Geringfügigkeit der erhaltenen Menge Substanz vorläufig nicht bestimmter Gehalt an Metall (durch Gasentwicklung) verriet, ist es wahrscheinlich, daß das Oxyd selbst ein höheres Oxyd ist oder doch enthält als FeO. Die genaue Untersuchung der Natur des Oxydationsproduktes erfordert die Ausarbeitung einer besonderen Analysenmethode und deren eingehende Prüfung.

Endlich wurde noch das Verhalten aktivierten Eisens gegen verdünnte Lauge untersucht, weil dieses eine wichtige Grundlage für die Beurteilung des Verhaltens der Reaktionsprodukte aus Eisen und Lauge bildet, wie sie beim Erhitzen im Autoklaven gewonnen wurden. Zu diesem Zwecke wurden 25 g Eisenpulver 24 Stunden lang mit verdünnter Essigsäure angeätzt, mit verdünnter Salzsäure azetatfrei, mit Wasser säurefrei gewaschen und sofort mit 0,01 n NaOH befeuchtet. Das Präparat wurde dann rasch in eine zum Auffangen des entstehenden Gases eingerichtete Apparatur gebracht und auf Wasserstoffentwicklung geprüft. Es trat sofort Gasentwicklung ein, deren Verlauf aus der folgenden Zahlentafel ersichtlich ist. Der Versuch wurde bei Zimmertemperatur vorgenommen.

¹⁾ Ist im 2. Teil bereits angewandt (siehe S. 150).

Einwirkungs- dauer Stunden	ccm Gas im ganzen	ccm/Std.
1	0,6	0,6
6,5	2,0	0,3
22	3,2	0,07
25	3,3	0,03
29,5	3,75	0,1
45,5	4,5	0,05
82	5,7	0,03
95	6,15	0,03
120	6,6	0,02
144	7,35	0,03

Der Versuch (der noch fort dauert¹⁾) zeigt also, daß aktiviertes Eisen — im Gegensatz zu dem, was aus der Literatur zu entnehmen ist — aus verdünnter Lauge dauernd Wasserstoff entwickelt. Die Schwankungen in der beobachteten Reaktionsgeschwindigkeit erklären sich zwanglos aus der noch zu primitiven Methodik. Das Gas wurde durch gelegentliches Klopfen zum Aufsteigen aus dem Pulver veranlaßt. Eine exakte Versuchsdurchführung verlangt natürlich fortlaufende Ablösung des Gases durch Rühren oder Klopfen auf mechanischem Wege.

Die mittlere Entwicklungsgeschwindigkeit beträgt hier 0,05 ccm/Std.

Gleichartige Versuche wurden mit rohem Eisenpulver, mit solchem, das mit Wasser und solchem, das (in relativ kleiner Menge) mit 2 n NaOH, 2 n KOH und 2 n LiOH 2 Stunden lang auf 200° erhitzt worden war, ausgeführt. In keinem dieser Fälle bildete sich Gas. Alle Präparate waren also (verglichen mit dem durch Säure angeätzten Eisen) inaktiv.

Die vorstehenden Beobachtungen am aktivierten Eisen sind für den hier zu behandelnden Fragenkomplex von besonderer Bedeutung.

2. Beiträge zur Beantwortung der Frage nach Wesen und Bildungsweise von Schutzschichten.

Entsprechend der im ersten Abschnitt angewandten Gepflogenheit, das Ergebnis der Forschung dem eigentlichen Versuchsgang voranzustellen, mögen auch diesmal die Folgerungen der Forschung vorweggenommen werden.

a) Versuchsergebnisse.

1. Bei der Einwirkung von Wasser und von Laugen auf Eisen bildet sich Wasserstoff, während eine allmählich dicker werdende Oxyd(ul)-Haut auf dem Metall entsteht.

2. Diese Haut verhindert schließlich eine weitere Reaktion: sie wirkt als Schutzhaut für das Metall und bedingt eine bestimmte Grenze der Einwirkung auf das Metall.

3. Die Dicke der Schutzhaut scheint bei 100° und bei 200° ungefähr die gleiche zu sein; die Bildungsgeschwindigkeit ist aber bei 200° bedeutend größer.

4. Die Dicke der Schutzhaut ist abhängig von der Art der Flüssigkeit. Sie ist unter verdünnter Lauge nach den bisher vorliegenden Erfahrungen geringer als unter reinem Wasser. Es genügt also für den gleichen Schutzeffekt unter Lauge eine geringere Schichtdicke als unter Wasser, oder man kann die Haltbarkeit bzw. Dichtigkeit der Schutzhaut unter Lauge für größer halten als unter Wasser. Es ist zu vermuten, daß auch sonstige Lösungsbestandteile (Sulfat?) einen individuellen Einfluß auf die Eigenschaften der Schutzhaut ausüben werden.

5. Die Wirkung der Haut ist wohl so zu denken, daß die Reaktion zunächst auf mechanischem Wege verlangsamt wird, dann aber durch Absinken der Aktivität des Eisens und seinen schließlichen Übergang in den passiven Zustand infolge dieser Verlangsamung gänzlich einschläft.

b) Versuchsdurchführung.

Die nachstehenden Versuche dienen der Erforschung der Schutzschichten, wie sie in Punkt 10 der Zusammenfassung von Teil 1 gekennzeichnet ist. Sie stellen einen ersten Vorstoß in dieses noch wenig bekannte Gebiet dar.

Überall wurde unter möglichst vollkommenem Ausschlusse von Sauerstoff gearbeitet, um die bei der Einwirkung von Eisen auf wäßrige Lösungen in der Hitze von selbst eintretende Aktivierung des Metalls nicht zu stören. Das nächste Ziel war die Ermittlung einer etwaigen Einwirkungsgrenze bei der Reaktion zwischen Eisen und Wasser oder wäßrigen Laugen.

Als Versuchsmaterial dienten Feilspäne von Kesselblech, die vom Ammoniakwerk Merseburg zur Verfügung gestellt wurden und nach dessen Mitteilung folgende Zusammensetzung hatten:

C ges.	0,16 %
P	0,058 „
S	0,056 „
Mn	0,46 „
Si	0,02 „
O	0,142 „
Fe (Diff.)	99,10 „
	<hr/>
	100,00 %

¹⁾ Im Verlauf von 2256 Stunden sind im ganzen 32,6 ccm Gas entwickelt worden, also im Mittel 0,014 ccm/Std. Das Gas ist reiner Wasserstoff, frei von Kohlenwasserstoffen.

Diese Analyse bezieht sich auf ein bereits durch Waschen mit Benzin und Petroläther gereinigtes und durch Sieben auf annähernd gleiche Teilchengröße gebrachtes Material.

Die Auszählung einer gewogenen Menge unter dem Mikroskop ergab 146 Teilchen auf 11,4 mg. Demnach enthält 1 g rund 12800 Teilchen. Nimmt man an, daß diese Würfelform besitzen, so findet man durch Berechnung die Gesamtoberfläche zu rund 40 qcm pro Gramm. Diese Zahl dürfte einen Mindestwert darstellen; man geht wohl nicht sehr fehl, wenn man mit 50—100 qcm Oberfläche pro Gramm rechnet. Ein Verfahren zur genaueren Messung dieser Größe, die man ja als Grundlage für die Bestimmung der Dicke von Oberflächenschichten gegebenen Gewichts braucht, ist in Ausarbeitung. Der Fortgang der Einwirkung von Flüssigkeiten auf das Eisenpulver wurde durch folgende Untersuchungsmethode festgestellt. Einmal wurde die Menge von Sauerstoff bestimmt, die das Eisen nach gewisser Einwirkungsdauer der luftfreien Flüssigkeiten aufgenommen hatte. Zu diesem Zwecke wurde das ganze Präparat oder ein Teil davon nach dem Waschen mit Wasser, Alkohol und Äther im Hochvakuum über Phosphorperoxyd sorgfältig getrocknet und bei 700° mit elektrolytisch entwickeltem und sorgsam gereinigtem Wasserstoff reduziert. Hierbei verlor das Ausgangspräparat von seinem Gesamtsauerstoffgehalte (0,142%) nur einen Teil (0,124%). Dieser Betrag ist bei allen Angaben über Sauerstoffgehalte im folgenden bereits abgezogen. Das gebildete Wasser wurde in Absorptionsröhrchen mit Phosphorperoxyd aufgefangen und durch deren Gewichtszunahme bestimmt. Die Versuchsfehler betragen 0,1 mg.

Bei den Versuchen bei 200°, die im Autoklaven vorgenommen werden mußten, war die Zunahme des Sauerstoffgehaltes das einzige Kennzeichen des Fortschreitens der Reaktion, weil in dieser Anordnung das Auffangen und Bestimmen des entwickelten Wasserstoffs außerordentliche technische Schwierigkeiten bereitet hätte. Dagegen ließ sich bei den Versuchen, die bei 100° ausgeführt wurden, zur Kontrolle auch die Menge des entweichenden Wasserstoffs messen und so der Nachweis erbringen, daß die Reaktion tatsächlich in einer Verdrängung des Wasserstoffs aus dem Wasser durch das Eisen besteht. Denn da die Äquivalenz des gebildeten Wasserstoffs und des von Eisen aufgenommenen Sauerstoffs nachgewiesen werden konnte, ist eine nebenher erfolgende oxydative Veränderung des Eisens in merklichem Umfange ausgeschlossen und somit auch bewiesen, daß bei der gewählten Versuchsanordnung erhebliche Störungen durch Sauerstoff nicht vorkommen (siehe auch S. 146).

Versuche bei 200°. Das Eisenpulver wurde in eiserne, mit einem lose sitzenden Deckel versehene Zylinder gebracht und in diesen unter dem Vakuum einer gut wirkenden Ölpumpe mit der Flüssigkeit überschichtet, schließlich noch etwa 5 Minuten lang durch energisches Evakuieren entgast. Nach dem Einbringen der Zylinder in den Autoklaven wurde auch letzterer samt den Zylindern mit Hilfe der Ölpumpe sorgfältig ausgepumpt und in evakuiertem Zustande angeheizt. Wenn die Temperatur 100° überschritten hatte, ließ man die Autoklaven noch einige Zeit lang abblasen, um endlich zur eigentlichen Versuchstemperatur überzugehen. Diese für längere Zeit konstant zu erhalten, bereitete zunächst erhebliche Schwierigkeiten, weil die aus Messing bestehenden Teile der Sicherheitsventile unter den gewählten Versuchsbedingungen (200°, 16—17 at Druck) regelmäßig nach kurzem Gebrauche undicht wurden. Nach langwierigen Vorversuchen bewährte sich die Verwendung von Ventiltteilen aus Reinnickel mit einer letzten Abdichtung durch Einschmieren mit einem Oleosol von Graphit. Durch Einbauen eines Thermoregulators (verbunden mit einem Thermometer) in den Thermometerstützen des Autoklaven gelang ein Konstanthalten der Temperatur bis auf $\pm 3^\circ$. Die Ergebnisse der Versuche mit destilliertem Wasser (Leitfähigkeitswasser) und mit Natronlauge (0,1 n) finden sich in den Zahlentafeln 1 und 2 verzeichnet.

Zahlentafel 1.				Zahlentafel 2.			
Erhitzen mit Wasser.				Erhitzen mit 0,1 n Natronlauge.			
Eisenmenge g	Wassermenge ccm	Versuchsdauer ¹⁾ Stunden	Sauerstoffaufnahme ¹⁾ %	Eisenmenge g	Laugemenge ccm	Versuchsdauer ¹⁾ Stunden	Sauerstoffaufnahme %
2	25	2	0,170	2	25	2	0,064
2	25	6	0,170	2	25	2	0,062
20	25	2	0,163	20	25	2	0,47
20	25	6	0,181	20	25	2	0,44

Wie die vorstehenden Zahlenwerte zeigen, ist beim Erhitzen mit reinem Wasser auf 200° schon nach 2 Stunden ein Grenzwert der Sauerstoffaufnahme erreicht, der für die kleinere und die größere Menge von Eisen praktisch identisch ist. Ob die geringe Zunahme des Sauer-

¹⁾ Im ganzen.

stoffgehaltes der größeren Eisenmenge beim Weitererhitzen um 4 Stunden noch eine bestimmte Bedeutung besitzt, ist fraglich. Diese Versuchsreihen sind vorderhand zurückgestellt worden wegen des unerwarteten Verhaltens des Eisens beim Erhitzen mit Natronlauge (Zahlentafel 2), das noch der Aufklärung durch besondere Versuche bedarf. Hier zeigt sich nämlich, daß sich einerseits die kleinen und andererseits die großen Eisenmengen zwar unter sich durchaus gleichartig verhalten, daß aber zwischen den beiden Gruppen ganz auffällig große Unterschiede in den binnen 2 Stunden aufgenommenen Sauerstoffmengen bestehen. Die größeren Eisenmengen verhalten sich so, als ob sie sich längere Zeit reaktiv erhielten, während die kleinen Mengen schon nach kürzerer Zeit ein Verschwinden oder doch Erlahmen ihrer Reaktionsfähigkeit erfahren.

Diese merkwürdige, vorläufig nicht erklärte Verschiedenheit bedeutet eine wesentliche Erschwerung für die Verfolgung der Reaktion, bei der man doch zweckmäßig immer einen gewissen Bruchteil des Reaktionsgutes nach bestimmten Zeiten zur Analyse entnimmt, und verlangt eine gesonderte Untersuchung ihrer Ursachen.

Möglicherweise liegt hier ein Zusammenhang vor mit den im 1. Teile (S. 142—143) besprochenen Verschiedenheiten kleiner und großer Eisenmengen bei ihrer Reaktion mit konzentrierter Natronlauge. Die vorstehend geschilderten Beobachtungen ließen es geboten erscheinen, die Bildung der Schutzschichten zunächst bei 100° zu studieren, d. h. unter Bedingungen, bei denen sich der Fortgang der Reaktion ohne Veränderung der Eisenmenge in einfacher Weise durch die Messung des entwickelten Wasserstoffs verfolgen läßt.

Versuche bei 100°. Die Untersuchungsmethode war folgende:

Das Eisenpulver wurde in Glaskolben am Rückflußkühler in einem Strome von sauerstofffreiem Stickstoff mit der Versuchsflüssigkeit erhitzt. Die Kolben befanden sich in einem lebhaft siedenden Wasserbade; ihr Inhalt wurde dabei nicht durch Kochen aufgerührt. Die Flüssigkeit wurde erst nach dem Verdrängen der Luft durch den Stickstoff aus einem Tropftrichter zugegeben.

Der Stickstoff, der den vom Eisen entwickelten Wasserstoff mitführte, passierte nach intensiver Trocknung (mit Phosphorpentoxyd) ein mit Kupferoxyd gefülltes, auf 600° erhitztes Rohr, in dem der Wasserstoff zu Wasser verbrannte, und gab den nunmehrigen Gehalt an Wasserdampf an ein mit Phosphorpentoxyd gefülltes Absorptionsrohr ab, dessen Gewichtszunahme durch Wägung bestimmt wurde.

Diese Methode wurde zuvor auf ihre Zuverlässigkeit geprüft und als durchaus brauchbar befunden, wie die folgenden Versuche zeigen, bei denen Zink in Schwefelsäure aufgelöst und der vom Stickstoff mitgeführte Wasserstoff in der gleichen Anordnung bestimmt wurde:

Zink, angewandt	Wasser, gefunden	Wasser, berechnet
0,3154 g	0,0869 g	0,0871 g
0,3940 g	0,1086 g	0,1083 g

Zahlentafel 3.
Eisen und Wasser
bei 100°.

Gesamte Erhitzungsdauer Stunden	Wasser, gefunden g
3	0,0044
6	0,0098
11	0,0141
20,5	0,0218
25	0,0243
32	0,0278
45	0,0331
51	0,0342
55	0,0353
70	0,0378
78	0,0390
94,5	0,0402
nach dem Erkalten	0,0407

Zahlentafel 4.
Eisen und 0,01 n
Natronlauge bei 100°

Gesamte Erhitzungsdauer Stunden	Wasser, gefunden g
6,5	0,0057
18,5	0,0134
28,5	0,0168
44	0,0195
50,5	0,0202
68,5	0,0215
80,5	0,0220
90	0,0220

Die Versuchsergebnisse bei der Erhitzung von Eisen mit reinem Wasser und mit 0,01 n Natronlauge sind in den Zahlentafeln 3 und 4 verzeichnet.

Die Einwirkung der verdünnten Natronlauge auf Eisen ist also nach 90ständiger Versuchsdauer zu Ende gelangt,

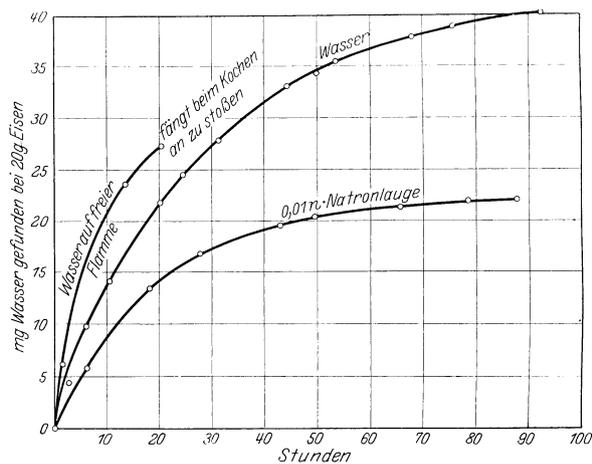


Abb. 1. Zeitlicher Verlauf der Entwicklung von Wasserstoff aus wäßrigen Flüssigkeiten durch Eisenpulver bei 100°.

die des Wassers neigt sich nach rund 95 Stunden merklich ihrem Ende zu. Bemerkenswert ist vor allem, daß die Menge (also auch die Dicke) der sich schließlich ausbildenden Schutzschicht unter der Lauge nur etwa halb so groß ist, wie unter dem reinen Wasser. Am besten lassen sich diese Verhältnisse bei graphischer Darstellung übersehen (Abb. 1). Man erkennt deut-

lich, daß auch beim Wasser der schließlich erreichte Zustand nicht weit vom Reaktionsende entfernt sein kann.

Zum Schlusse wurde das feste Reaktionsprodukt als Ganzes der Sauerstoffbestimmung durch Reduktion mit Wasserstoff unterworfen. Der hierbei festgestellte Prozentgehalt an Sauerstoff stimmt mit dem aus der gefundenen Wassermenge (Endwerte der Zahlentafeln 3 und 4) als Äquivalent des entwickelten Wasserstoffs berechneten recht nahe überein, wie die folgende Zusammenstellung zeigt (Zahlentafel 5):

Die vorhandene geringe Differenz kann zwanglos auf eine geringe Sauerstoffaufnahme des Eisens bei den Vorbereitungen zur Analyse zurückgeführt werden, wenn man nicht einen kleinen Restgehalt des Stickstoffs an Sauerstoff (absolute Sauerstofffreiheit ist bekanntlich nur schwierig zu erzielen) als Ursache der Differenz ansehen will. Jedenfalls ist nicht daran zu zweifeln, daß man den Fortgang der Reaktion zwischen Eisen und wäßrigen Lösungen an sich auch durch das Fortschreiten der Sauerstoffaufnahme verfolgen kann, wenn man den Luftsauerstoff in genügender Weise ausschließt.

Eine Vergleichung der bei 100° unter Wasser ermittelten Einwirkungsgrenzen von 0,181 bzw. 0,187% Sauerstoff im Eisen (Zahlentafel 5) mit den bei 200° ermittelten Endwerten von rund 0,170% (Mittelwert aus Zahlentafel 1) zeigt, daß hier eine recht weitgehende Übereinstimmung bei diesen beiden Versuchstemperaturen vorliegt. Der Vollständigkeit halber wurde eine weitere Prüfung in der Weise angestellt, daß das Produkt vom Versuche der Zahlentafel 3 weitere 6 Stunden unter Luftabschluß mit Wasser bei 200° behandelt wurde. Es enthielt danach 0,197% Sauerstoff, war also praktisch unverändert geblieben.

Ähnliches ergab sich unter 0,01 n Natronlauge. 2 g Eisen, mit dieser Lauge 2 Stunden lang unter Luftabschluß auf 200° erhitzt, enthielten 0,091% Sauerstoff, während das Produkt der Zahlentafel 4 (siehe Zahlentafel 5) einen Sauerstoffgehalt von 0,098% bzw. 0,106% zeigte.

Von Interesse ist auch eine Beobachtung, welche zur Beurteilung der mechanischen Widerstandsfähigkeit von Schutzschichten dienen kann. Nimmt man das Erhitzen des Eisens mit der Reaktionsflüssigkeit auf 100° nicht im Wasserbade vor, sondern erhitzt man auf freier Flamme zum Sieden, so färbt sich die Flüssigkeit schon nach kurzer Zeit dunkel (grünlich); schließlich bildet sich ein Niederschlag. Der Grund dafür kann nur die Ablösung von Reaktionsprodukt von der Oberfläche des Metalls infolge der Reibung der Körner aneinander sein. Hiermit steht in Übereinstimmung, daß die Reaktion zwischen Metall und Flüssigkeit nicht in der gleichen Zeit (wenn überhaupt) zum Stillstande kommt wie beim Erhitzen ohne Wirbelung. Man findet daher in gleichen Zeiten größere Mengen entwickelten Wasserstoffs. Die anfängliche Verfärbung der Lösung beruht wahrscheinlich auf der Bildung eines Sols, das weiterhin ausflockt. Das Produkt ist eine Sauerstoffverbindung, die beim Erhitzen im Stickstoffstrom kein Wasser abgibt, also kein Hydroxyd(ul). Die Bildung des Niederschlages fällt zeitlich mit dem Beginn heftigen Stoßens der Flüssigkeit beim Kochen zusammen.

Die Zahlentafel 6 gibt einige Zahlenwerte für die beim Siedenlassen von Wasser über Eisen bei 100° gefundenen Wassermengen. Zum Vergleiche sind auch die beim Erhitzen im Wasserbade beobachteten Werte (aus der entsprechenden Kurve der Abb. 1 interpoliert) angegeben.

Die graphische Darstellung findet sich ebenfalls in der Abb. 1.

Endlich sei noch erwähnt, daß zur Vergleichung der zu den vorstehend mitgeteilten Versuchen (2. Teil) benutzten Eisensorte mit dem früher (Versuche von Teil 1) gebrauchten Präparat die Sauerstoffaufnahme bestimmt wurde, welche das neue Präparat bei zweistündigem Erhitzen mit Wasser, 0,01 n und 0,1 n NaOH auf 200° erfuhr. Diese Zahlen sind zum Teil schon in den früheren Zahlentafeln enthalten, mögen hier aber noch einmal zusammengestellt werden. Die für das alte Eisenpulver geltenden Werte entstammen der Zahlentafel auf S. 145.

Für ihre Hilfe bei den vorstehenden Untersuchungen habe ich den Herren Dr.-Ing. E. Thamerus, Dr. F. Schnell und Dr. H. Luckmann wärmstens zu danken.

Zahlentafel 5. Sauerstoffgehalt des Eisens.

Versuchsflüssigkeit	Sauerstoffgehalt des Eisens	
	direkt bestimmt	aus dem entwickelten Wasserstoff berechnet
Wasser	0,187%	0,181%
0,01 n Lauge .	0,106%	0,098%

Zahlentafel 6. 20 g Eisen mit Wasser gekocht (100°).

Erhitzungsdauer (im ganzen) Stdn.	Wasser, gefunden g	Wasser, gefunden ohne Sieden g
3	0,0062	0,0044
14	0,0236	0,0170
23	0,0274	0,0233

Zahlentafel 7. Zweistündiges Erhitzen mit Flüssigkeiten auf 200°.

	Wasser	NaOH 0,01 n	NaOH 0,1 n
Neues Eisen (2 g mit 25 ccm) .	0,17	0,09	0,06
Altes Eisen (2,5 g mit 50 ccm) .	0,16	0,12	0,05

Vor- und Nachteile der Erzeugung und Verwendung von Destillat zur Kesselspeisung.

Von Dr.-Ing. W. Otte, Essen, Ruhr.

1. Vorbemerkung.

Im Gegensatz zu der Praxis in den Vereinigten Staaten von Amerika¹⁾ wird in deutschen Kraftwerken das Speisezusatzwasser bisher nur in seltenen Fällen durch Verdampfung erzeugt. Die Erkenntnis der mit der Verwendung destillierten Zusatzwassers zu erzielenden Vorteile ist aber bereits heute auch in Deutschland so sehr Allgemeingut geworden, daß beim Entwurf eines neuen Kraftwerks die Frage der Gewinnung des Zusatzwassers durch Verdampferanlagen stets mit erwogen wird, wobei allerdings nicht vergessen werden darf, daß man in sehr vielen, wenn nicht gar in den meisten Fällen die vielfach beliebte chemische Vorbehandlung des in den Verdampferanlagen zu erzeugenden destillierten Wassers kaum umgehen kann.

Als Vorteile der Verwendung destillierten Zusatzwassers werden im wesentlichen folgende angegeben:

1. Möglichkeit der Leistungssteigerung, da das salzarme Kesselwasser nicht schäumt,
2. Verbesserung des Wirkungsgrades und Vereinfachung der Betriebsführung, da das Abschlämmen der Kessel während des Betriebes wegfällt,
3. Schonung der Kessel und Armaturen durch Vermeidung der Wirkungen von Alkali-konzentrationen,
4. Schonung der Überhitzer, Rohrleitungen und Turbinen durch Vermeidung von Wasser-schlägen und Salzablagerungen,
5. Möglichkeit der wirtschaftlichen Verwertung von Anzapf- oder Abdampf der Haupt-turbinen sowie der Antriebsturbinen der Speisepumpen usw.,
6. Zuverlässige Speisung der Kessel bei Verwendung automatischer Wasserstandsregler.

Bei einer in der Entwicklung begriffenen Sache, als welche das Verdampfungsverfahren heute noch angesprochen werden muß, ist es erklärlich, daß diejenigen Betriebe, welche es bei sich eingeführt haben, zum Teil unerwarteten Schwierigkeiten begegnet sind und daß die betrieblichen Erfolge hier und da nicht den gehegten Erwartungen entsprochen haben.

Auf Grund der von mir auf einer Studienreise gesammelten Eindrücke kann ich jedoch bekunden, daß alle von mir besuchten oder befragten, mit Verdampferanlagen arbeitenden deutschen Werke das thermische Verfahren der Zusatzwassergewinnung der chemischen Aufbereitung vorziehen, und zwar auch in solchen Fällen, wo das Rohwasser vor der Verdampfung einer chemischen Behandlung unterzogen werden muß.

2. Allgemeines über Verdampferanlagen.

Wenngleich die gegenwärtig auf dem Markt befindlichen Verdampferbauarten in ihren konstruktiven Einzelheiten noch mehr oder weniger voneinander abweichen, so ist doch eine Annäherung der neuesten deutschen Ausführungsformen untereinander und an amerikanische Bauarten unverkennbar. Der Verdampfungsvorgang als solcher kann unabhängig von der besonderen Bauart allgemein unter folgendem einheitlichen Gesichtspunkt besprochen werden:

- a) Vorbehandlung des Rohwassers,
- b) Verdampfung,
- c) Bindung der Brühdampfwärme,
- d) Gasschutz.

Zu a) Vorbehandlung des Rohwassers. Verdampferanlagen sind ihrem Wesen nach als Dampfkessel anzusehen und demgemäß nach den gesetzlichen Vorschriften auch genehmigungs- und überwachungspflichtig. Eine große Zahl von Betriebsfragen, welche im Dampfkesselwesen von Bedeutung sind, treten auch im Betriebe von Verdampferanlagen auf. Hierzu gehört vor allem die Frage der Beschaffenheit und Pflege des Speisewassers, welche für Verdampfer eine ebenso wichtige Rolle spielt wie für feuerbeheizte Kessel, jedoch mit dem Unterschiede, daß die steinbildenden Bestandteile des Speisewassers zwar nicht die Sicherheit, dafür aber in höherem Maße die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen, da das an der Verdampferheizfläche zur Verfügung stehende Wärmegefälle ungleich geringer ist als beim Dampfkessel. Enthärtung des Verdampferspeisewassers ist daher in der Regel eine ebenso wichtige Forderung wie die des Kesselspeisewassers, eine Tatsache, der sich manche

¹⁾ Nach einer Feststellung des Prime Mover Committee der amerikanischen Electric Light Association sollen in den Vereinigten Staaten schon 1924 nicht weniger als 64% der untersuchten Werke (gerechnet nach der installierten Maschinenleistung) mit Verdampferanlagen ausgerüstet gewesen sein.

Werke bei der Beschaffung einer Verdampferanlage verschließen. Es empfiehlt sich in allen Fällen, wo die Absicht besteht, an Stelle der bisher verwendeten chemischen Zusatzwasserenthärtungseinrichtung eine Verdampferanlage aufzustellen, den alten Wasserreiniger nicht kurzerhand zu beseitigen, sondern ihn für die Aufbereitung des Verdampferspeisewassers bestehen zu lassen.

Praktisch kann die Enthärtung nach irgendeiner der zur Aufbereitung von Kesselspeisewasser in Benutzung befindlichen Methoden erfolgen. In Anbetracht der hohen Löslichkeit der Nichtkarbonatbildner wird bei vielen Rohwässern, insbesondere solchen mit vorwiegender Karbonathärte, die Beseitigung der letzteren allein einen hinreichenden Schutz gegen die Versteinung der Heizkörper des Verdampfers gewähren. Zu diesem Zwecke wird das Rohwasser mit Ätzkalk oder mit Salzsäure (Impfverfahren) behandelt. Am einfachsten müßte die Karbonathärte durch Auskochen des Rohwassers vertrieben werden können; leider bleibt aber bei vielen Wässern auch nach mehrstündigem Kochen ein erheblicher Teil der Karbonathärte zurück, weshalb z. B. die Firma Balcke das Auskochen nicht mehr wie früher als Mittel zur Enthärtung des Rohwassers verwendet.

Von Wichtigkeit ist der Umstand, daß durch das Aufkochen des Rohwassers alle hierin gelösten Gase restlos ausgetrieben werden, wodurch Anrostungen in den Verdampfern verhütet werden; daneben findet hierdurch eine Verbesserung der Wärmeübertragung an den Heizflächen statt, da schon geringe Gasbeimengungen die Wärmeabgabe des sich kondensierenden Dampfes merklich beeinträchtigen. Die Vorwärmung des Rohwassers bezweckt weiterhin, daß die Heizfläche desjenigen Verdampfers, dem das Wasser zunächst zugeführt wird, nach Möglichkeit ausschließlich Verdampferarbeit verrichten kann, was restlos erreicht wird, wenn die Temperatur des vorgewärmten Wassers gleich der Sättigungstemperatur des Brühdampfes im ersten Verdampfer ist.

Man verwendet Misch- und Oberflächenvorwärmer. Einen Apparat der ersteren Art, verbunden mit einem Filter zur Abscheidung des Karbonatschlammes zeigt Abb. 1.

Oberflächenvorwärmer bieten gegenüber Mischvorwärmern den Vorteil, daß der verwendete Heizdampf unmittelbar in Form von Destillat abgeführt werden kann, während er bei Mischvorwärmern mit dem angewärmten Rohwasser überflüssigerweise in den Verdampfer gelangt, wo er zum zweitenmal verdampft wird. Die Reinigung von Oberflächenvorwärmern bereitet aber einige Schwierigkeiten, besonders wenn keine chemische Vorreinigung vorhanden ist, da die sich abscheidenden Karbonate einen festen, steinartigen Charakter besitzen und durch Abschlämmen allein nicht beseitigt werden können. Allerdings gelingt es bis zum gewissen Grade durch schnelles An- und Abstellen des Heizdampfes den Stein in Schalen abzusprengen oder ihn doch wenigstens zu lockern. Von diesem Mittel wird auch bei den Heizschlangen der Verdampfer mit einigem Erfolg Gebrauch gemacht.

Der theoretische Dampfverbrauch D_0 für die Erwärmung von Q_0 kg Rohwasser von einer Anfangstemperatur t_0 auf 100° ergibt sich bei einem Wärmeinhalt des Heizdampfes i_{d_0} zu

$$D_0 = Q_0 \frac{100 - t_0}{i_{d_0} - 100} \text{ kg.}$$

Beispiel. Bei einem Heizdampfdruck $p_0 = 3 \text{ ata}$ ($i_{d_0} = 651,2 \text{ kcal/kg}$) einer Anfangstemperatur des Rohwassers $t_0 = 30^\circ$ und $Q_0 = 1000 \text{ kg}$ ergibt sich $D_0 = 127 \text{ kg}$. Mit Rücksicht auf die Oberflächenverluste des Vorwärmers ist der tatsächliche Dampfverbrauch um einige Prozent höher.

Da die chemische Vorbehandlung des Rohwassers eine erhebliche Verteuerung der Gesamtanlage darstellt und die Betriebsführung in unerwünschter Weise erschwert, hat man, ähnlich wie beim Kesselspeisewasser, vorgeschlagen, sie durch Mittel, welche im Inneren des Verdampfers rein physikalisch wirken sollen, zu ersetzen. Hierzu gehört beispielsweise die Verwendung von kolloidalem Graphit (Kohydrol), jedoch liegen Erfahrungen hierüber bislang noch nicht vor.

Zu b) Der Verdampfungsvorgang. Die Verdampfung kann entweder in einer oder in mehreren Druckstufen durchgeführt werden; in letzterem Falle liefert jede Druckstufe den Heizdampf für die ihr folgende. Zur rechnerischen Verfolgung der sich hierbei abspielenden Vorgänge mögen folgende Bezeichnungen gewählt werden:

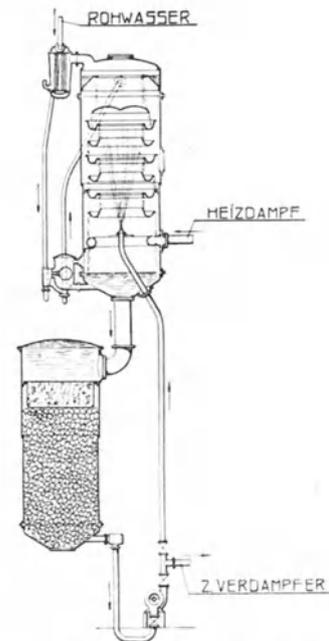


Abb. 1. Rohwasservorwärmer mit Filter (Atlas-Werke).

- Q_0 die dem Verdampfer stündlich zugeführte Speisewassermenge kg,
 Q_a die stündliche Ablaugenmenge kg,
 $Q_d = Q_0 - Q_a$ die stündliche Destillatmenge kg,
 s der Salzgehalt des Speisewassers mg/l,
 S der Salzgehalt der Ablauge oder der maximal zulässige Salzgehalt der Flüssigkeit im Verdampfer mg/l,
 p_0 Druck des Heizdampfes ata,
 p_1 Brüdendruck im ersten Verdampfer ata,
 p_2 desgleichen im zweiten Verdampfer usw.,
 i_{a_0} Wärmeinhalt des Heizdampfes kcal/kg,
 i_{a_1} Wärmeinhalt des ersten Brüdendampfes kcal/kg,
 i_{a_2} Wärmeinhalt des zweiten Brüdendampfes kcal/kg, usw.
 i_{f_0} Flüssigkeitswärme entsprechend p_0 , kcal/kg,
 i_{f_1} Flüssigkeitswärme entsprechend p_1 , „ „
 i_{f_2} Flüssigkeitswärme entsprechend p_2 , usw.,
 i_{s_0} Wärmeinhalt des Speisewassers bei Eintritt in den Vorwärmer kcal/kg,
 i_{s_1} desgl. bei Eintritt in die erste Verdampferstufe kcal/kg,
 i_{s_2} desgl. bei Eintritt in die zweite Verdampferstufe kcal/kg usw.
 x_1 die aus 1 kg Heizdampf in der ersten Verdampferstufe erzeugte Destillatmenge kg,
 x_2 die aus 1 kg erstem Brüdendampf in der zweiten Verdampferstufe erzeugte Destillatmenge kg,
 x_3 die aus 1 kg zweitem Brüdendampf in der dritten Stufe erzeugte Destillatmenge kg usw.,
 D_1 die für die Erzeugung von Q_d kg Destillat bei einstufiger Verdampfung erforderliche Heizdampfmenge kg,
 D_2 die für die Erzeugung von Q_d kg Destillat bei zweistufiger Verdampfung erforderliche Heizdampfmenge kg,
 D_3 die für die Erzeugung von Q_d kg Destillat bei dreistufiger Verdampfung erforderliche Heizdampfmenge kg usw.
 Es ergibt sich alsdann:

$$Q_a = \frac{s}{S} \cdot Q_0,$$

worin das Verhältnis $\frac{s}{S}$ auch durch dasjenige der zugehörigen M- oder Cl-Werte angegeben werden kann.

Ferner:

$$x_1 = \frac{i_{a_0} - i_{f_0}}{i_{a_1} - i_{s_1}} \text{ kg}$$

und

$$D_1 = \frac{Q_d}{x_1} = Q_d \frac{i_{a_1} - i_{s_1}}{i_{a_0} - i_{f_0}} \text{ kg},$$

ferner

$$x_2 = x_1 \frac{i_{a_1} - i_{f_1}}{i_{a_2} - i_{s_2}} \text{ kg}$$

und

$$D_2 = \frac{Q_d}{x_1 + x_2} \text{ kg}.$$

Die Werte x und D für größere Stufenzahlen werden analog berechnet. Der ermittelte Dampfverbrauch erhöht sich um denjenigen für die Vorwärmung des Speisewassers D_0 , welcher weiter oben (S. 153) abgeleitet wurde.

Vorstehende Überlegungen zeigen, daß der Heizdampfverbrauch für die Erzeugung der Gewichtseinheit des Destillates durch Vermehrung der Stufen weitgehend verringert werden kann. Zum Vergleich einer einstufigen mit einer zweistufigen Anlage diene folgendes

Beispiel.

1. Einstufige Anlage

$$\begin{array}{ll}
 Q_d = 1000 \text{ kg} & i_{a_1} = 639,4 \text{ kcal/kg} \\
 p_0 = 3 \text{ ata} & i_{f_0} = 133,5 \text{ „} \\
 p_1 = 1 \text{ ata} & i_{s_1} = 99,2 \text{ „} \quad (\text{entsprechend } 1 \text{ ata}) \\
 i_{a_0} = 651,2 \text{ kcal/kg} &
 \end{array}$$

Hieraus berechnet sich

$$x_1 = \frac{651,2 - 133,5}{639,4 - 99,2} = 0,9583,$$

$$D_1 = \frac{1000}{0,9583} = 1043 \text{ kg}.$$

2. Zweistufige Anlage:

$$\begin{array}{ll}
 Q_d = 1000 \text{ kg} & i_{d_2} = 639,4 \text{ kcal/kg} \\
 p_0 = 3 \text{ ata} & i_{f_0} = 133,5 \quad ,, \\
 p_1 = 2 \text{ ata} & i_{f_1} = 120,0 \quad ,, \\
 p_2 = 1 \text{ ata} & i_{s_1} = 99,2 \quad ,, \\
 i_{d_0} = 651,2 \text{ kcal/kg} & i_{s_2} = 99,2 \quad ,, \\
 i_{d_1} = 646,9 \quad ,, &
 \end{array}$$

Hieraus berechnet sich

$$x_1 = \frac{651,2 - 133,5}{646,9 - 99,2} = 0,9452 \text{ kg},$$

$$x_2 = 0,9452 \frac{646,9 - 120,0}{639,4 - 99,2} = 0,9219 \text{ kg},$$

$$D_2 = \frac{1000}{0,9452 + 0,9219} = 535 \text{ kg}.$$

Durch die Anwendung der zweiten Stufe verringert sich der Heizdampfverbrauch für die Gewichtseinheit des erzeugten Nettodestillates also annähernd auf die Hälfte, bei drei Stufen auf rund ein Drittel der einstufigen Anlage usw. Somit ließe sich theoretisch durch Vermehrung der Druckstufenzahl der spezifische Dampfverbrauch fast beliebig reduzieren. Anlagen mit mehr als vier Stufen dürften jedoch wegen der erhöhten Beschaffungskosten im allgemeinen keine wirtschaftlichen Vorteile bieten, es sei denn, daß nur sehr geringe Heizdampfmengen in Form von hochgespanntem Dampf zur Verfügung stehen. Man wählt demnach

einstufige Apparate, wenn

a) reichliche Heizdampfmengen, insbesondere aus Gegendruckturbinen oder dergleichen vorhanden sind und

b) eine hohe Vorwärmung des Speisewassers zulässig oder erwünscht ist,

mehrstufige Apparate, wenn

a) wenig Heizdampf zur Verfügung steht und

b) das Speisewasser mit Rücksicht auf vorhandene Economiser möglichst weniger erwärmt werden soll.

Es muß jedoch hierbei, da in dieser Hinsicht vielfach irrige Anschauungen bestehen, betont werden, daß der geringere Dampfverbrauch einer Anlage an sich nicht etwa einen Maßstab für den Grad ihrer Wirtschaftlichkeit bildet, da ja, was überhaupt die wirtschaftliche Voraussetzung für die Anwendung des Verdampfungsverfahrens ist, der gesamte Wärmeinhalt des Heizdampfes dem Speisewasser der Kesselanlage wieder zugeführt wird, bis auf die Verluste, welche durch Wärmeabgabe an den Außenflächen der Verdampfer infolge von Strahlung und Leitung sowie durch abfließende erwärmte Ablauge entstehen. Die Mantelverluste vergrößern sich annähernd proportional der Gesamtoberfläche und hängen im übrigen von der Güte des Wärmeschutzes ab. Für überschlägige Berechnungen wird man diesen Verlust mit etwa 150—180 kcal/qm/std, bezogen auf die Außenfläche der isolierten Verdampferkörper und Rohrleitungen, einsetzen können.

Die Ablaugenwärmeverluste betragen stündlich

$$Q_a \cdot (t_a - t_0) = \frac{s}{S} \cdot Q_0 \cdot (t_a - t_0),$$

worin t_0 die Temperatur des Speisewassers, t_a die der Ablauge bezeichnen, die als identisch mit den betreffenden Wärmegehalten angenommen werden. Diese Verluste werden somit einerseits von der chemischen Beschaffenheit des Speisewassers, andererseits von der Temperatur der Ablauge bestimmt. Die durch den Salzgehalt S bezeichnete Konzentrationsgrenze ist dadurch gegeben, daß bei zunehmender Anreicherung in gleicher Weise wie beim Dampfkesselbetrieb Schäumen und Spucken eintritt, wodurch der Dampf und damit das Destillat verunreinigt wird. Der Wärmeinhalt der Ablauge kann durch Wärmeaustauschapparate an das Turbinenkondensat abgegeben und dadurch dieser Verlust beträchtlich verringert werden.

Beispiel. Die Alkalinität des Speisewassers betrage $M_0 = 6^\circ$ dtsch., die höchstzulässige Alkalinität der Verdampferflüssigkeit 90° dtsch. Die Abwassermenge bezogen auf Q_0 Speisewasser beträgt dann $Q_a = 0,067 Q_0$ oder, bezogen auf Q_d kg Destillat $\frac{0,067}{0,933} Q_d$ kg. Bei einer Ablaugentemperatur von 80° , einer Speisewassereintrittstemperatur (Vorwärmereintritt!) t_0

von 30° und $Q_d = 1000$ kg ist der Abschlämmverlust

$$1000 \cdot \frac{0,067}{0,933} \cdot 50 = \text{rd. } 3600 \text{ kcal.}$$

Mit Rücksicht auf die stets verschiedene chemische Beschaffenheit des Speisewassers ist es nicht möglich, von vornherein allgemeingültige Angaben über die Wärmeverluste einer Verdampferanlage zu machen. Die Mantelverluste sind, absolut genommen, bei einer im Betrieb befindlichen Anlage, welche sich im Beharrungszustand befindet, annähernd konstant; auf die Gewichtseinheit des erzeugten Nettorestillates bezogen sind sie daher um so höher, je geringer die Verdampfungsleistung ist. Der Wirkungsgrad bei absichtlich schwach belasteten oder infolge Verschmutzung weniger leistungsfähigen Anlagen ist also niedriger als bei solchen mit hohem Wärmedurchsatz. Die Frima Balcke gibt die gesamte Verlustwärme unter Voraussetzung eines Heizdampfes von 3 at (auf 160° überhitzt) für mittlere Verhältnisse bezogen auf 1000 kg Destillat wie folgt an:

einstufig: 15 000 kcal zweistufig: 20 000 kcal dreistufig: 25 000 kcal

Diese Werte sind jedoch nur als rohe Schätzungen anzusehen und dürften in der Praxis oft erheblich überschritten werden; andererseits erscheint es nicht unmöglich, den Wärmeverlust bei günstigen Rohwasserverhältnissen und sorgfältiger Isolierung beträchtlich einzuschränken. Zur Erlangung zuverlässiger Werte ist in jedem Einzelfall der Rechnungsweg zu beschreiten. Der so ermittelte Wärmeverlust wird in einem Kraftwerke zweckmäßig durch diejenige Arbeitsmenge ausgedrückt, welche der dem Verlust entsprechende Dampf betrag im Falle seiner Verwertung im Niederdruckteil einer Kraftmaschine hätte leisten können. Eine solche Rechnung setzt jedoch voraus, daß im einzelnen Falle die Eventualität einer energetischen Verwertung des Abdampfes tatsächlich besteht. Wo dies nicht der Fall ist, dürfen lediglich die Erzeugungskosten des Dampfes in Anrechnung gebracht werden, was naturgemäß niedrigere Beträge ergibt.

Beispiel. Die Verlustwärmemenge für 1000 kg Destillat betrage 20 000 kcal, was bei einer verfügbaren Wärme des Dampfes von 3 ata (Gesamtwärme minus Wärmehalt des Kondensats) von 620 kcal bei einer Dampfmenge von 32,2 kg entspricht. Beträgt die Endspannung am Abdampfstutzen der Turbine 0,1 ata und der adiabatische Wirkungsgrad bezogen auf die Klemmenleistung 0,5, so ist die der genannten Dampfmenge entsprechende elektrische Leistung $= \frac{0,5 \cdot 120 \cdot 32,2}{860} = \text{ca } 2,2$ Kilowattstunden. Würde der Gestehungspreis von 1 Kilowattstunde beispielsweise 3 Pfg. betragen, so wäre der Dampfanteil der Erzeugungskosten von 1000 kg Destillat rund 6,6 Pfg.

Bei Verwendung von Frischdampf empfiehlt es sich, diesen unmittelbar den Kesseln als Satttdampf zu entnehmen, da der überhitzte Dampf eine wesentlich schlechtere Wärmeübergangsziffer hat als der gesättigte Dampf, so daß die Verdampferheizfläche für die gleiche Leistung größer bemessen werden muß. Durch Einspritzen von Wasser kann man den Heizdampf auf Sättigungstemperatur kühlen, ein Verfahren, von dem anscheinend in Amerika häufiger Gebrauch gemacht wird.

Ausführungsformen.

Die Verdampfer bestehen aus dem kesselartigen, meist mit einem domartigen Dampfsammler ausgerüsteten Mantel, in welchen das Heizröhrensystem eingebaut ist. Die Anordnung kann, wie bei Kesseln, stehend oder liegend sein, jedoch wird letztere Anordnung neuerdings mit Recht bevorzugt, da sie eine größere Wasseroberfläche ergibt, was von günstigem Einfluß auf die Trockenheit und Reinheit des erzeugten Brühdampfes ist. Als Maßstab für die Beanspruchung der Wasseroberfläche wird das Verhältnis des stündlich erzeugten Dampfolumens in Kubikmeter zur Wasseroberfläche in Quadratmeter verwendet, ein Maß, welches sich auch für die Bewertung von Steilrohrkesseln als zweckmäßig erweist. Bei niedriger Dampfspannung ist wegen des großen spezifischen Volumens auf die Gewichtseinheit des erzeugten Dampfes bezogen, die Oberflächenbeanspruchung höher als bei hochgespanntem Dampf.

Die liegende Bauweise besitzt gegenüber der stehenden den weiteren hoch einzuschätzenden Vorteil, daß das Heizschlangensystem, ähnlich wie bei Lokomobilekesseln, bequem herausgehoben und gereinigt werden kann. Hierbei brauchen außer den Befestigungsschrauben des Heizsystemes im wesentlichen nur noch die Flanschen der Heizdampf- und Destillatleitungen gelöst zu werden.

Die einzelnen Heizrohre sind entweder haarnadelförmig gebogen, wobei die Neigung der unteren Rohrschenkel die schnelle Abführung des Destillates begünstigt, Abb. 2, oder als gerade Rohrbündel mit Sammelkammern an den Enden ausgebildet. Zur Erleichterung der Reinigung

empfiehlt sich die Unterteilung des Heizröhrensystemes in vertikale Register mit Einzelkammern entsprechend nachstehenden Abbildungen. (Abb. 3 u. 4.)

Die Griscom-Russell-Co. baut übrigens auch Verdampfer mit schraubenförmig gewundenen Heizrohren, bei denen angeblich der Kesselstein im Betriebe selbsttätig von den Heizflächen abspringt (Abb. 5). Kleinere Verdampfer, insbesondere für den Bordbetrieb, bauen die Atlas-Werke mit spiralförmigen Heizschlangen, welche um ein Scharnier herauschwenkbar sind (Abb. 6). Um die Betriebsunterbrechung durch das Reinigen auf ein Mindestmaß zu beschränken, empfiehlt es sich, Heizrohrreservesysteme in Bereitschaft zu halten, welche unmittelbar nach dem Ausbau eines verschmutzten Heizkörpers in den Verdampfer eingebaut werden können. Bei mehrstufigen Anlagen empfiehlt es sich, die einzelnen Verdampferkörper und Heizschlangen vollkommen übereinstimmend auszubilden, um mit einem Reservesystem auszukommen. Nach Angabe des Elektrizitäts-Werks Bremen nimmt das Auswechseln verschmutzter Schlangen gegen saubere für eine aus zwei Einheiten bestehende Anlage von $2 \times 11,2$ qm Heizfläche (50 t Destillat in 24 Stunden) 3—4 Stunden in Anspruch. Die verschmutzten Schlangen werden in 15 Arbeitsstunden mittels Sandstrahlgebläse gereinigt. Andere Reinigungsmethoden sind das Abbrennen mittels Lötlampe und (bei kupfernen Heizschlangen) das Auflösen des Steines durch Salzsäure.

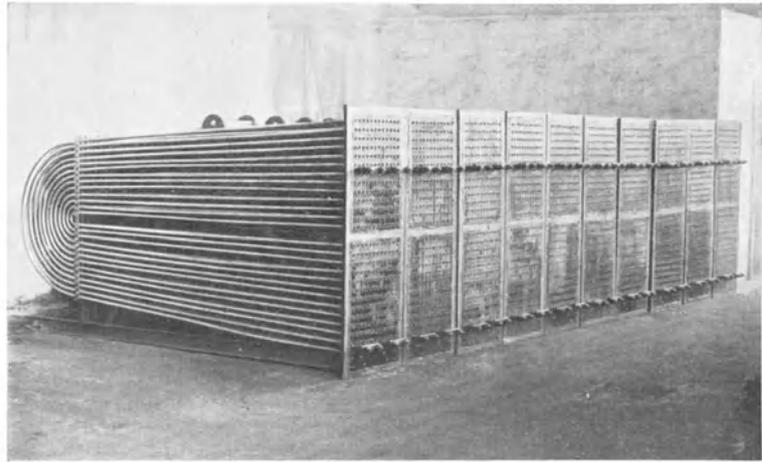


Abb. 2. Heizschlangensystem (Baleke).

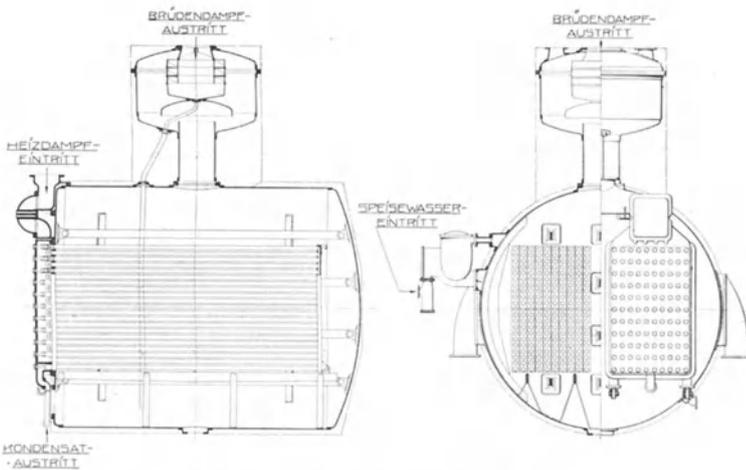


Abb. 3. Verdampfer (Atlas-Werke).

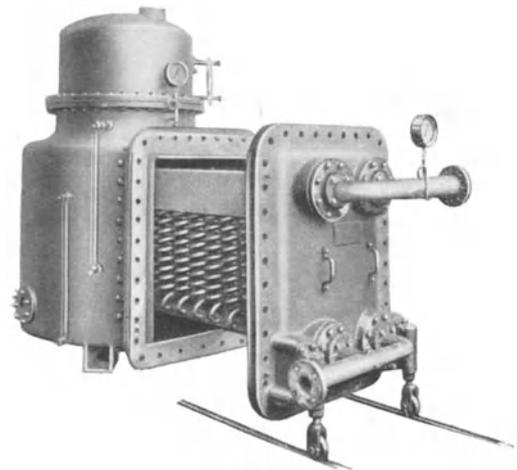


Abb. 4. Verdampfer (Griscom-Russell-Co.).

Als Baustoff für die Verdampfermäntel und Böden wird Guß- oder Flußeisen, für die Heizschlangen Kupfer, Messing oder ebenfalls Flußeisen verwendet. Dem Vorteil der besseren Leitfähigkeit des Kupfers und seiner Legierungen, der übrigens in Anbetracht der dünnen Rohrwandungen nicht stark ins Gewicht fällt, steht als Nachteil deren Empfindlichkeit gegen hohe Dampftemperaturen, alkalische Wässer (bei Messing) und mechanische Beanspruchung beim Reinigen gegenüber; auch besteht die Gefahr, daß die Verbindung der aus Kupfer oder Messing hergestellten Heizschlangen mit dem eisernen Mantel bei salzreichen Wässern elektrolytische Anfrassungen des letzteren hervorruft.

Die Speisung der Verdampfer geschieht in der Regel durch automatische schwimmerbetätigte Wasserstandsregler, welche außerhalb der Verdampferkessel angebracht werden. Auf diese Weise wird erreicht, daß die im Innern der Verdampfer oft vorhandenen lebhaften Wallungen, welche die Stetigkeit der Speisung beeinträchtigen würden, gedämpft werden.

Bei mehrstufigen Anlagen findet die Verteilung des Wassers auf die einzelnen Körper entweder in der Weise statt, daß nur die erste Stufe vom Vorwärmer aus unmittelbar gespeist wird; die zweite Stufe wird hierbei aus der ersten, die dritte aus der zweiten usw. gespeist (Serienspeisung), oder aber jeder Verdampfer erhält sein Wasser vom Vorwärmer aus gesondert zugeführt (Parallelspeisung). Die Serienspeisung bietet den Vorteil, daß die nach der chemischen und thermischen Aufbereitung im Speisewasser verbliebene Härte sich ausschließlich im ersten Verdampfer niederschlägt, während den übrigen Stufen nur Wasser mit leicht löslichen Salzen zugeführt wird. Die mechanische Reinigung kann sich daher in diesem Falle im wesentlichen auf die Heizfläche der ersten Stufe beschränken. Diesem Vorteile stehen jedoch folgende Nachteile gegenüber:

a) in der ersten Stufe muß das gesamte zu verdampfende Rohwasser auf die dem Druck im Wasserraum entsprechende Sättigungstemperatur erwärmt werden. Hierdurch wird ihre Verdampfungsleistung verringert, während in den folgenden Stufen eine unerwünschte Mehrverdampfung eintritt, da das in diese gespeiste Wasser eine höhere Temperatur besitzt, als wie sie dem Druck im Speiseraum des betreffenden Verdampfers entspricht. Die hierbei eintretende spontane Verdampfung erhöht die Gefahr des Überreißens von Wasser mit dem Dampf. Wesentlich ist aber,

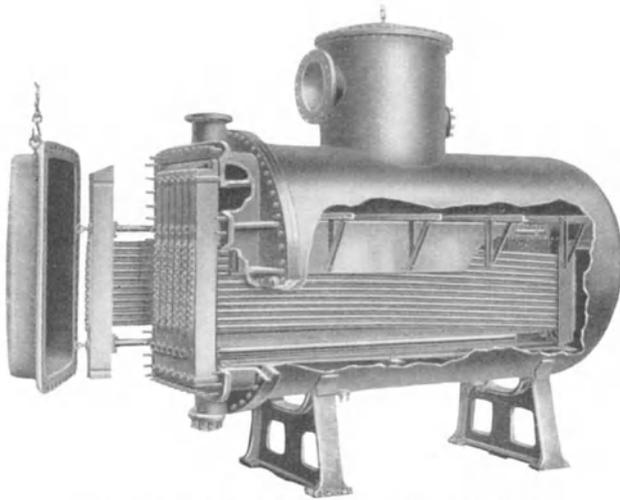


Abb. 5. Verdampfer (Griscom-Russell-Co.).

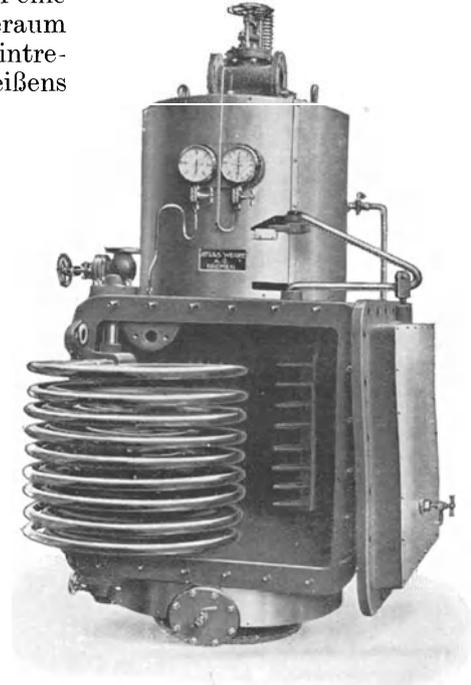


Abb. 6. Verdampfer mit herauschwenkbarem Heizschlangensystem (Atlas-Werke).

b) daß die Anreicherung der im zugeführten Wasser gelösten Salze am stärksten in der letzten Stufe stattfindet, wo sie besonders schädlich wirkt, da das große spezifische Volumen des entspannten Dampfes das Mitreißen von Flüssigkeit ohnehin begünstigt.

Zu c) Die Bindung der Brühdampfwärme. Während ein geringer Teil der mit dem Heizdampf zugeführten Wärme in Form von Destillat anfällt, ist die Hauptwärmemenge im freien Brühdampf enthalten, der in besonderen Apparaten, Misch- oder Oberflächenkondensatoren, an das Turbinenkondensat abgegeben wird. Es wurde bereits erwähnt, daß die Möglichkeit, den ganzen Wärmeinhalt des Heizdampfes zur Aufwärmung des Speisewassers zu benutzen, unbedingte Voraussetzung für die wirtschaftliche Anwendung des Verdampfungsverfahrens ist. Die Bauart der Mischkondensatoren hat große Ähnlichkeit mit derjenigen von Mischvorwärmern, wie sie in Abb. 1 gezeigt wurde. Die Oberflächenkondensatoren zum Niederschlagen des Brühdampfes haben den gleichen Aufbau wie Turbinenkondensatoren, so daß eine nähere Beschreibung sich hier erübrigt. Zur Absaugung der Luft wird in der Regel eine Dampfstrahlpumpe verwendet. Der Vorteil des Betriebes mit Oberflächenkondensatoren liegt darin, daß bei zeitweisem Ausbleiben des als Kühlwasser dienenden Turbinenkondensates, z. B. bei Inbetriebsetzung der Anlage, vorübergehend, allerdings unter Preisgabe der Brüdwärme, mit Rohwasser als Kühlmittel gearbeitet werden kann, ohne daß das Destillat verlorengeht. Die Verbindung eines Mischkondensators mit einem Oberflächenkondensator, bei welcher im Bedarfsfalle ebenfalls mit dem Kühlwasser der Hauptturbine gearbeitet werden kann, zeigt Abb. 7.

Interessant ist der von Balcke nach dem Vorgehen der französischen Firma Prache & Bouillon verwendete Brühdampfkompresseur, eine Dampfstrahlpumpe, durch welche der

Abdampf der letzten Stufe mittels hochgespanntem Frischdampf ständig von neuem auf Heizdampfspannung verdichtet wird. Dieses Verfahren ist allerdings nur bei Brühdampfspannungen von wenigstens 0,8 ata und Frischdampfdrücken von 6—20 ata anwendbar, wobei der Kompressionsdruck etwa 1 at höher liegt als der Brühdampfdruck. Würde also der letztere 0,8 ata betragen, so hätte der Heizdampf, welcher gleichzeitig auch zur Vorwärmung des Rohwassers benutzt wird, eine Spannung von 1,8 ata. Aus diesen geringen Druckunterschieden ergibt sich, daß das Brühdampfkompensationsverfahren zweckmäßig nur ein- oder zweistufig ausgeführt wird. An Stelle der Dampfstrahlpumpe kann die Wiederverdichtung des Brühdampfes auch durch rein mechanische Mittel erfolgen (Wärmepumpe), doch dürften sich hierdurch besondere Vorteile wärmewirtschaftlicher oder betriebstechnischer Art nicht erzielen lassen. Die Anwendung von Brühdampfkompensatoren gestattet eine nicht unwesentliche Vereinfachung der Gesamtanlage durch den Wegfall des Kondensators nebst den zugehörigen Rohrleitungen: die Gesamtmenge des destillierten Wassers wird unmittelbar in flüssiger Form gewonnen. Sehr eingeschränkt wird der Wert dieses Verfahrens allerdings dadurch, daß es zu seinem Betriebe hoch-

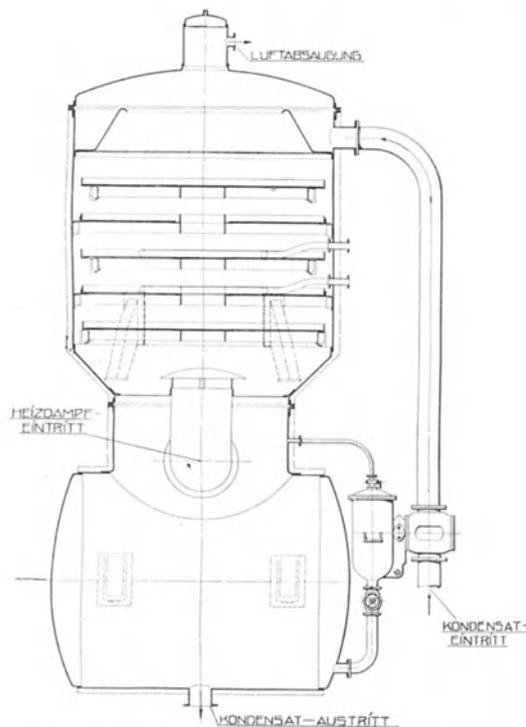


Abb. 7. Mischkondensator mit Oberflächenhilfskondensation (Atlas-Werke).

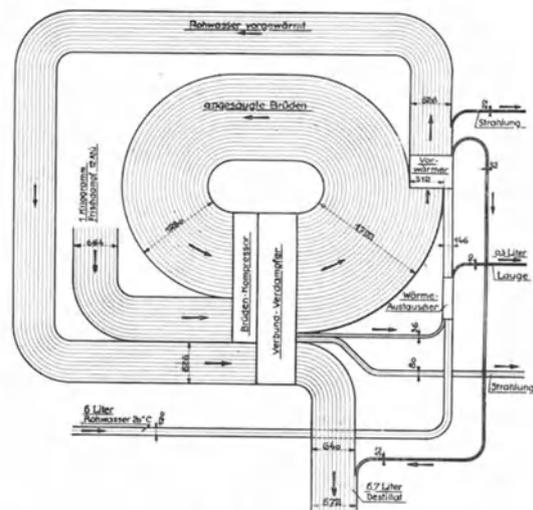


Abb. 8. Wärmeflußbild eines mit Brühdampfkompensation arbeitenden Verdampfers (Balcke).

gespannten Frischdampf benötigt, wodurch das wichtigste Verwendungsgebiet des Verdampfungsverfahrens, nämlich die Verwertung niedrig gespannter energetisch ausgenutzter Abdämpfe ausscheidet. Die Wärmeverteilung in einer mit Brühdampfkompensation arbeitenden Anlage, bezogen auf 1 kg zugeführten Frischdampf, zeigt Abb. 8.

Zu d) Gasschutz. Maßnahmen zum Schutze des Speisewassers gegen das Eindringen korrosiver Gase sind, ganz unabhängig von der Art der Zusatzwasseraufbereitung, in allen Fällen erforderlich, wenn dasselbe zum größten Teil aus reinem Kondensat besteht und eine Temperatur von weniger als 100° hat. Die Vorwärmung des Speisewassers auf diese oder höhere Temperaturen bietet in Verbindung mit Verdampferanlagen keine grundsätzlichen Schwierigkeiten und wird bei neu zu errichtenden Kraftwerken schon aus wärmewirtschaftlichen Gründen voraussichtlich die Regel bilden (Regenerativverfahren oder Gegendruckvorwärmerturbinen). Die Mehrzahl der bestehenden Kraftwerke ist jedoch genötigt, einerseits wegen der vorhandenen Rauchgasspeisewasservorwärmer, andererseits wegen der sonst erforderlichen kostspieligen Umänderungen der Turbinen, die Wassertemperatur etwa zwischen 30 und 50° zu halten. Die Gefahr der Sauerstoffaufnahme ist hierbei beträchtlich, und es sind bekanntlich in den letzten Jahrzehnten sehr viele Vorschläge zum Schutze des Speisewassers hiergegen gemacht worden. Eine Aufzählung der einzelnen hierhin gehörigen Einrichtungen liegt außerhalb des Rahmens meiner Ausführungen, und ich verweise dieserhalb auf den Vortrag, den Herr Dr. Haak auf der letztjährigen Tagung der Vereinigung der Großkesselbesitzer über diesen Gegenstand gehalten hat¹⁾. Die bekannteste und meiner Ansicht nach

¹⁾ Vgl. „Speisewasserpflge“ S. 54 (herausgegeben im Selbstverlag der Vereinigung der Großkesselbesitzer, Charlottenburg, Lomeyerstr. 25.

auch einfachste Einrichtung zum Schutze des Speisewassers gegen eindringende Gase ist die von Balcke, deren Wirkungsweise ohne weitere Erläuterung der schematischen Darstellung, Abb. 9). entnommen werden kann. Der Aufbau der Anlage ist in der nachfolgenden Abb. 10 dargestellt.

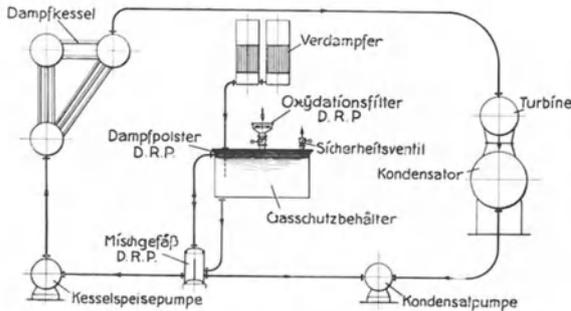


Abb. 9. Schema des Wasserkreislaufs unter Gasschutz (Balcke).

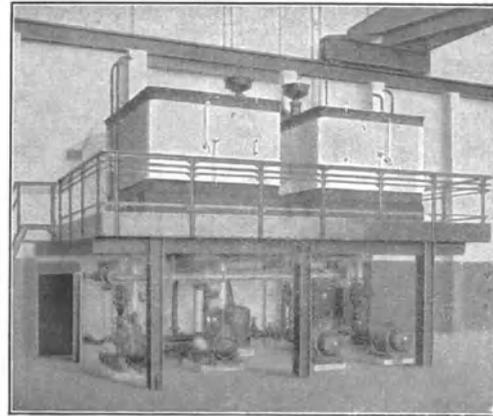


Abb. 10. Gasschutzanlage (Balcke).

3. Betriebserfahrungen in einer ausgeführten Anlage.

Ein Kraftwerk N., das mit Rückkühlung arbeitet, enthärtet das Zusatzwasser der Rückkühlanlage nach dem Permutitverfahren.

Die chemische Zusammensetzung des Rohwassers ist:

Gesamtrückstand	300 mg/l	Cl	16,8 mg/l
Glühverlust	30 „	H ₂ SO ₄	22,3 „
Glührückstand	270 „	Gesamthärte	11,78° dtsh.
CaO	97,5 „	Nichtkarbonathärte	1,42° „
MgO	23,5 „	Karbonathärte	10,36° „

Zur Erzeugung des Kesselspeisewassers dienen zwei Verdampferanlagen von je 13000 kg Stundenleistung, wovon die erste, eine zweistufige Anlage in stehender Anordnung, seit Januar 1923, die zweite, eine Vierkörperanlage, seit Herbst 1924 in Betrieb ist. Die Heizdampfspannung beträgt bei der Verbundanlage 14 atü; bei der Vierkörperanlage wird Frischdampf verwendet, welcher auf 4,5 atü reduziert wird. Das zu verdampfende Wasser wird aus der Kühleitung der Turbinenkondensation hinter den Kondensatoren entnommen und stellt demgemäß eine ziemlich eingedickte Lösung dar von folgender Durchschnittsbeschaffenheit:

Cl	113 mg/l	Alkalität P	5,04° dtsh.
Alkalität M	28,8° dtsh.	Resthärte H	0,8° „

Eine schematische Darstellung der Verbundanlage gibt Abb. 11.

In der Ansicht stellt sich die Anlage gemäß Abb. 12 dar.

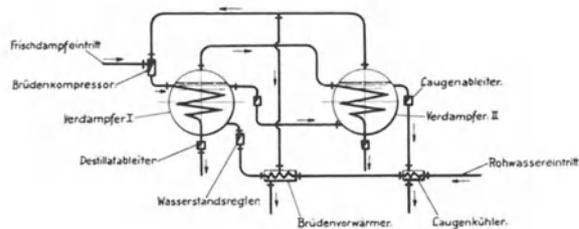


Abb. 11. Schema einer Verdampferanlage mit Brüdenkompression (Balcke).

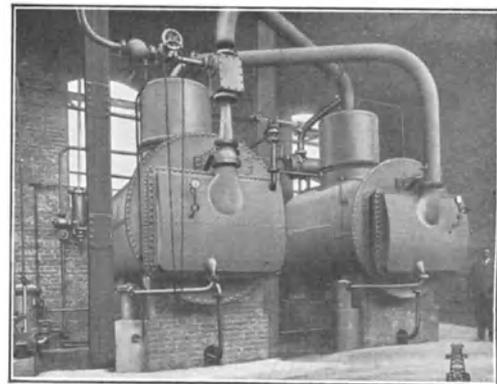


Abb. 12. Verdampferanlage mit Brüdenkompression (Balcke).

Eine Schemaskizze sowie eine Ansicht der Vierkörperanlage wird durch die folgenden Abbildungen 13 und 14 gegeben.

Betriebsergebnisse.

1. Die Nennleistung der Verdampfer wurde bei den Abnahmeversuchen um 5% überschritten. Eine merkbare Leistungsverringerung durch Verschmutzung konnte bisher nicht festgestellt werden. Steinbildung findet an den Verdampferheizflächen nicht statt, dagegen sammeln sich im Oberflächenwärmer erhebliche Schlammengen, die offenbar nicht allein aus dem ursprünglichen Rohwasser stammen, sondern teilweise von dem Kühlwasser auf dessen Weg durch die Rückkühlanlage als Staub aus der Luft aufgenommen worden sind.

2. Das erzeugte Bruttodestillat (Nettodestillat plus Heizdampf) hat eine Alkalinität von $M = 0,0 - 0,8^{\circ}$ dtsh. Der Chlorgehalt schwankt etwa zwischen 0 und 4 mg/l.

3. Die Alkalinität des Schlammwassers zeigt beträchtliche Schwankungen. Beobachtet wurde zeitweise $M = 150^{\circ}$ dtsh. Gelegentlich treten jedoch auch höhere und niedrigere Werte auf. Vergleicht man diese mit der Alkalinität des Rohwassers ($28,8^{\circ}$), so geht schon hieraus hervor, daß der Wassermengenverlust durch das Abschlämmen sehr beträchtlich sein muß. Er wird im Durchschnitt zu 20–30% des zugeführten Rohwassers ermittelt. Der vorhandene Wärmeaustauschapparat zur Rückgewinnung der Ablaugenwärme ist für diese Wassermengen zu klein; die Wassertemperatur hinter dem Austauscher beträgt ca. 75° ; auch die Wärmeverluste sind also recht beträchtlich. Das Ablassen des Schlammwassers erfolgt nicht nach der chemischen Analyse, sondern wird von dem Bedienungspersonal vorgenommen, wenn der Wasserstand im Verdampfer unruhig zu werden beginnt. Die Verwendung von Rückkühlwasser zur Speisung der Verdampfer, welche im vorliegenden Falle

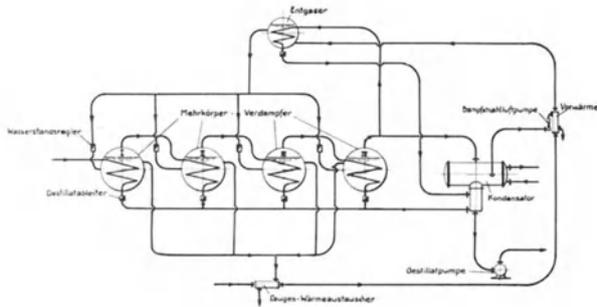


Abb. 13. Schema einer Vierkörper-Verdampferanlage (Balcke).

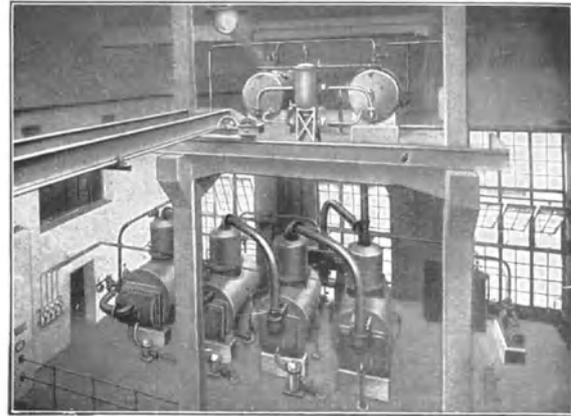


Abb. 14. Vierkörper-Verdampferanlage (Balcke).

mit der ausgesprochenen Absicht geschieht, den Wärmeinhalt des Kühlwassers auszunutzen, kann in Anbetracht der sich hieraus ergebenden hohen Abschlämmlverluste nicht als besonders glücklich bezeichnet werden. Günstigere Verhältnisse würden sich ergeben, wenn statt dessen chemisch gereinigtes Rohwasser verwendet würde.

4. Steinbildung an den Heizflächen der Kessel wird vollkommen vermieden, auch sind Anfressungen bisher nicht beobachtet worden. Auffallend ist allerdings der sich in den Kesseln absetzende rote Schlamm, dessen Ursprung bisher nicht ermittelt werden konnte.

5. Der Salzgehalt des Kesselwassers ist überraschend hoch, so daß ein gelegentliches Abschlämmen während des Betriebes notwendig ist. Die obere Grenze der Alkalinität liegt etwa bei $M = 130^{\circ}$ dtsh. Ob der hohe Salzgehalt des Kesselwassers vorzugsweise aus dem destillierten Zusatzwasser oder aus Verunreinigungen des Turbinenkondensats stammt, steht nicht fest, jedoch ist das letztere wahrscheinlich. Die Frage der Abdichtung der Kondensatorrohre in den Böden, ob Einwalzung oder Stopfbuchsenverschraubung, ist bei Anwendung von Verdampferanlagen von besonderer Bedeutung, da auch schon geringe Undichtigkeiten die Beschaffenheit des Kesselwassers so verschlechtern, daß die wesentlichen Vorteile der Betriebsweise mit destilliertem Zusatzwasser verlorengehen. Die zuverlässigste Art der Rohrbefestigung dürfte die beiderseitige Einwalzung sein. Es ist aber darauf zu achten, daß nur in den Rohrböden selbst gewalzt wird und die inneren Kanten der Böden gut abgerundet sind, damit der scharfe Bohrgrat die Rohre nicht beim Einwalzen durchdrückt. Sorgfältige Unterstützung der Rohre zur Vermeidung von Schwingungen ist unerlässlich.

6. Die Bedienung der Verdampferanlage stellt keine höheren Anforderungen an das Personal, als diejenige einer chemischen Enthärtungsanlage; in der Regel wird sie, wie im vorliegenden Falle, vom Speisepumpenwärter mitbesorgt werden können. Bei der Wartung der Anlage muß darauf geachtet werden, daß die erzeugte Destillatmenge möglichst im Ein-

klang mit der Menge des in jedem Zeitpunkt anfallenden Turbinenkondensates steht. Ein Kennzeichen hierfür ist die Temperatur des Kondensates bei Austritt aus dem Brühdampf-kondensator; steigt diese über das als zulässig angesehene Maß, so muß die Leistung des Verdampfers eingeschränkt, d. h. die Heizdampfzufuhr verringert werden. Die Regelung kann auch selbsttätig durch Thermostaten bewirkt werden.

7. Über die Wirkung der Gasschutzanlage können endgültige Mitteilungen zur Zeit noch nicht gemacht werden. Nach Angabe des Werkehemikers beträgt der Sauerstoffgehalt im Speisewasser durchschnittlich etwa 1 ccm/l, und es muß abgewartet werden, ob hierbei im Laufe der Zeit Anfressungen in den Rohrleitungen, Vorwärmern und Kesseln auftreten werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß bei den geschilderten Verdampferanlagen die mit dem Destillierverfahren an sich erzielbaren Vorteile nur teilweise verwirklicht werden. Dies gilt sowohl in bezug auf die nicht völlig befriedigende Beschaffenheit des Kesselspeisewassers, für welche allerdings die Verdampferanlage als solche nicht verantwortlich zu machen ist, als auch insbesondere in wärmewirtschaftlicher Hinsicht, da die Destillation bislang ausschließlich mit Frischdampf stattfindet. Für die Vierkörperanlage ist dieser Zustand jedoch als Provisorium anzusehen, da diese später mit dem Abdampf der Antriebsturbinen einer noch aufzustellenden Speisepumpe beheizt werden soll.

Gefahren der Anwesenheit von Kieselsäure im Rohwasser und im Kesselinhalt.

Von Dr. A. Splittgerber, I. G. Farbenindustrie A.-G., Wolfen.

Kieselsäure ist nach übereinstimmenden Angaben von Goldberg¹), Stadlinger², Eitner³, Splittgerber⁴ ein ganz regelmäßig in natürlichen Grund- und Oberflächengewässern vorkommender Bestandteil; ihre Menge wechselt von einigen wenigen Milligramm im Liter bei härteren Wässern bis zu 40 mg oder gar noch mehr bei vielen weicheren Wässern. Wenn auch in den meisten Wässern das Verhältnis der Kieselsäure zur Gesamtmenge der mineralischen Bestandteile (Glührückstand) unter 1 : 10 liegt, so sind doch auch schon Fälle beobachtet worden mit einem Verhältnis von 5,5 : 10.

Während nun älteren Mitteilungen von Thörner⁵, Goldberg¹, Stadlinger² und Basch⁶ über eine gewisse Gefährlichkeit der Kieselsäure für den Dampfkesselbetrieb im allgemeinen keine große Bedeutung beigelegt worden ist, hat der auch in verschiedenen Zeitschriften veröffentlichte Vortrag von Pfadt⁷ auf der vorjährigen Hauptversammlung der Vereinigung der Großkesselbesitzer im Verein mit der sich daran anschließenden Kontroverse zwischen Morawe⁸, Braungard⁹ und wiederum Pfadt¹⁰ sehr beunruhigend gewirkt.

Es soll hier mein Bestreben sein, in die auch heute noch nicht völlig geklärte Kieselsäurefrage soviel Licht hineinzubringen, wie zur Zeit möglich ist, wobei ich mich außer auf die schon zitierte Literatur auch noch auf eine Literaturangabe von Otto Mitchel Smith¹¹, auf die Gutachtensammlung im 10. Heft der Mitteilungen der Vereinigung der Großkesselbesitzer vom 15. Mai 1926¹² und auf persönliche Mitteilungen von Dr. Moll-Hannover, Direktor Morawe-Berlin, Prof. Dr. Haupt-Bautzen und schließlich auf eigene Erfahrungen stützen kann.

Es herrscht Übereinstimmung darüber, daß Kieselsäure unter bestimmten Voraussetzungen bis zu erheblichen Mengen im Wasser gelöst bleiben kann. Bei der Gesteinsverwitterung, mit anderen Worten, bei dem natürlichen Zerfall der Feldspäte entsteht neben Ton (kiesel-saure Tonerde) auch noch freie Kieselsäure und kiesel-saures Alkali. Die freie Kieselsäure (SiO_2) vereinigt sich mit Wasser zu H_2SiO_3 ; in dieser Form ist die Kieselsäure wasserlöslich, wenn auch nur schwer löslich, und wird von dem die Erdrinde durchsickernden meteorischen Wasser gelöst. Findet dieses Wasser auf seinem Wege nur wenig Kalk- oder Magnesiumsalze vor, bleibt es also weich, so tritt entsprechend dem chemischen Massenwirkungsgesetz eine chemische Reaktion zwischen diesen Härtebildnern und der aufgenommenen Kieselsäure nur unvollständig ein; die Kieselsäure bleibt zum großen Teil gelöst und erscheint beim Pumpen des Wassers in verhältnismäßig großen Mengen als H_2SiO_3 (wie schon oben gesagt bis zu 40 bis 50 mg/l). Finden sich dagegen im Wasser viel Härtebildner oder Eisensalze gelöst, so entsteht

¹) Die Literaturangaben befinden sich am Schluß des Vortrages S. 164/165.

ein fast völlig wasserunlösliches Kalzium-, Magnesium- oder Eisensilikat; die Folge davon ist ein verhältnismäßig sehr geringer Rest an gelöster Kieselsäure im harten Wasser. Im Gegensatz zu der praktischen Unlöslichkeit der Kalzium- oder Magnesiumsilikate und der beschränkten Löslichkeit der Kieselsäure in Form der H_2SiO_3 kennen wir auch ein außerordentlich leicht wasserlösliches Silikat; nämlich das Natriumsilikat oder Wasserglas. Die Löslichkeit der Kieselsäure in Form von Wasserglas in alkalischen Wässern ist sehr bedeutend. Die von Pfadt⁷ in Darmstadt bekanntgegebene und vielfach angezweifelte Zahl von 500 mg/l SiO_2 erscheint nicht so unmöglich, da man bei Thörner⁵ eine Löslichkeit von 428 mg/l und im Gutachten 9 unserer Mitteilungen Nr. 10¹² eine solche von 190 mg/l angegeben findet. Nur eine das Löslichkeitsprodukt, das wiederum abhängig ist vom Alkalitätsgrad, überschreitende Menge von Kieselsäure scheidet sich als zunächst kolloidale gallertartige Trübung aus und wird durch starke Erwärmung immer mehr wasserunlöslich; dieser letztere Fall kommt nach meiner Ansicht in der Praxis des Kesselbetriebes kaum vor.

Von Basch⁶ und Braungard⁹ wird ferner die Möglichkeit erwogen, daß Kieselsäure als solche sich in unlöslicher Form dann ausscheiden kann, wenn im Wasser sehr viel sonstige Salze vorhanden sind, die dann auf das Wasserglas bzw. auf die Kieselsäure regelrecht ausfällend wirken. Völlig eindeutige Angaben hierüber fehlen aber noch.

Eine Ausscheidung der Kieselsäure im Kesselbetrieb ist aber leicht möglich, sobald die alkalische Lösung der Kieselsäure Gelegenheit hat, mit Kalzium-, Magnesium- oder Eisensalzen zusammen zu kommen. Dann bildet sich wasserunlösliches weißes Kalzium- oder Magnesiumsilikat bzw. wasserunlösliches rotgelbes Eisensilikat. Auch bei Gegenwart von Aluminiumsalzen (Tonerdosalzen) würde sich wasserunlösliches weißes Aluminiumsilikat (Tonerdasilikat) bilden.

Aus diesen Eigenschaften der Silikate folgt, daß man die in einem natürlichen Wasser vorhandenen Silikate bei der chemischen Speisewasseraufbereitung durch Ätznatron, Soda oder durch Permutit nicht entfernen kann, sondern nur durch Kalk-Soda-Enthärtung oder durch Zugabe von Eisen- oder Aluminiumsalzen. Der zur Ausscheidung günstigste Alkaligehalt liegt nach amerikanischen Mitteilungen bei einer Wasserstoffionenkonzentration nach Soerensen von mindestens 9 entsprechend einem Gehalt von mindestens 0,3 mg/l Ätznatron ($NaOH$) bei 20° oder 6 mg/l Ätznatron bei 70° C (Reinigertemperatur). Da man eine so stark alkalische Reaktion im Speisewasseraufbereiter (Reiniger) vielfach nicht erzielt, vielmehr erst im Kessel selbst durch Verdampfung erreicht, so ist dadurch erklärt, daß auch bei der Kalk-Soda-Reinigung eine völlige Ausscheidung der Kieselsäure im Reiniger und infolgedessen ihre Fernhaltung aus dem Kessel nicht erreicht wird. Kommen nun im Kessel selbst Kalk- oder Magnesia-Verbindungen (Resthärte) oder gelöstes Eisen, etwa aus der Kesselwandung, mit den sich konzentrierenden Kieselsäuremengen zusammen, so tritt eine Nachreaktion im Kessel selbst ein. Dabei werden ganz naturgemäß ursprünglich weiche Wässer mit hohen Kieselsäuregehalten einen kieselsäurereichen Kesselschlamm geben, als ursprünglich harte Wässer mit verhältnismäßig geringerem Kieselsäuregehalt.

Es ist eine vielfach bestätigte Erfahrung, daß der Kesselschlamm, auch der erst durch Nachreaktion im Kessel entstehende Schlamm, um so fester, steinartiger wird, je mehr Gips oder Silikate er enthält. Bei einem kieselsäurereichen Schlamm liegt also stets die Gefahr vor, daß er zu Steinschalen zusammenbackt. Nun wird vielfach behauptet, daß ganz besonders der silikatreiche schalenartige Kesselstein selbst in allerdünnsten Schichten zu erheblichen Wärmestauungen und Verringerungen der Wasserbenetzbarkeit führt, als deren Folge wiederum Ausbeulungen an Flammrohren und Siederrohren eintreten. Eine Ursache für ein solches Verhalten gerade des Kieselsäurekesselsteins ist eigentlich nicht recht einzusehen; verständlicher wäre schon die Behauptung eines gleichen Verhaltens aller einmal entstandenen Kesselsteinschalen, mögen sie nun in der Hauptsache aus Silikaten oder Sulfaten (Gips) bestehen.

Hier kommt uns vielleicht eine amerikanische Mitteilung zu Hilfe. In der Zeitschrift „The Boiler Maker“¹³ heißt es in einer Arbeit „über eine neue Regel für Kennzeichnung des Wärmeverlustes durch Kesselstein“, daß nach Versuchen von Prof. Smith von der Universität Illinois an Lokomotivrohren, die mit Kesselstein verschiedener Dicke von den minimalsten Spuren bis zu 2,8 mm bedeckt waren, Wärmeverluste gefunden wurden, die von 0% bei kesselsteinfreien Rohren bis 16% bei 2,8 mm Kesselsteindicke schwankten. Aus einer graphischen Aufzeichnung der Einzelbefunde konnte folgende Regel abgeleitet werden: Die Quadratwurzel aus der Kesselsteinstärke ergibt nach Multiplikation mit 48 den Wärmeverlust in Prozenten ($48 \sqrt{St.} = \% Wv.$). Die dieser Formel entsprechende Kurve, eine regelrechte Parabel, zeigt an, daß bei einer ganz dünnen Kesselsteinschicht schon eine ganz minimale Änderung in der Kesselsteindicke eine sehr bedeutende Zunahme des Wärmeverlustes zur Folge hat; ist dagegen die Kesselsteinschicht schon zu einer ziemlichen Stärke angewachsen, so

bedeutet eine weitere Verdickung der Schicht keine nennenswerte Zunahme des Wärmeverlustes mehr.

Daß eine harte Steinschale das Verbeulen und Durchbrennen der Rohre bei starker Belastung des Kessels erleichtert, ist wahrscheinlich dadurch zu erklären, daß bei starker Belastung die Randschichten des Kesselsteins, sei er auch noch so dünn, völlig trocken werden können, wobei nach Smith die isolierende Wirkung des Kesselsteins bedeutend erhöht und die Wandung auf eine gefährlich hohe Temperatur erhitzt wird.

Nach Untersuchungen von Moll-Hannover beträgt die Wärmeleitfähigkeit von kiesel-saurem Kalk übereinstimmend mit anderen Forschungen $\lambda = 0,2$. Weitere Untersuchungsergebnisse sind noch nicht bekannt. Die Vereinigung der Großkesselbesitzer wird aber in nächster Zeit dem Studium der Wärmedurchlässigkeit silikatreicher Kesselsteine besondere Aufmerksamkeit widmen.

Die Umbildung von kieselsäurehaltigem bzw. sulfathaltigem Schlamm in harten Kesselstein wird nach vielen Beobachtungen durch gleichzeitige Anwesenheit von gelösten kolloidalorganischen Substanzen im Wasser verhindert oder mindestens verzögert. Daher kann ein gewisser, zur Verhütung von Nachteilen genau den jeweils herrschenden Verhältnissen angepaßter optimaler Zusatz von kolloidalorganischen Substanzen unter Umständen auch zur Verhütung der Steinbildung aus der sich ausscheidenden Resthärte dienen.

Unsere bisherige Kenntnis auf diesem Gebiet fasse ich folgendermaßen nochmals zusammen:

1. In natürlichen Wässern kommt Kieselsäure in Form von H_2SiO_3 als regelmäßiger Bestandteil vor; ihre Menge ist annähernd umgekehrt proportional der Härte; in weichen Wässern sind bis zu 40—50 mg/l SiO_2 beobachtet worden.

2. Die Löslichkeit der Kieselsäure in alkalischen Wässern, in denen sie sich als Natronsilikat (Wasserglas) vorfindet, ist sehr hoch und übersteigt sicherlich 200 mg/l SiO_2 . Literaturangaben über das Vorkommen von 400—500 mg/l gelöster Kieselsäure in dieser Form erscheinen nicht unwahrscheinlich.

3. Die verschiedentlich behauptete Aussalzung der Kieselsäure in sehr stark salzhaltigen Wässern ist denkbar, aber noch nicht sicher bewiesen.

4. Die Speisewasseraufbereitung durch Ätznatron, Soda oder Permutit scheidet niemals die Kieselsäure in unlöslicher Form aus; das vermag nur das Kalk-Soda-Verfahren oder eine prinzipiell ähnliche Behandlung des Wassers mit Aluminium- oder Eisensalzen. Vollständig ist die Umsetzung aber erst bei Gegenwart einer Mindestmenge Alkali, wie sie erst in konzentriertem Kesselinhalt in der Praxis erreicht wird.

5. Ausscheidungen von Kieselsäure bzw. Bildung von kiesel-säurereichem Kesselstein lassen sich in ziemlich weitgehendem Maße verringern,

a) wenn die Resthärte im Kesselwasser möglichst gering ist, d. h., wenn die Härtebildner soweit aus dem Wasser entfernt sind, daß die gelöste Kieselsäure mit ihnen keine wasserunlösliche Verbindung eingehen kann;

b) wenn das Löslichkeitsprodukt der Kieselsäure nicht überschritten wird, mit anderen Worten, wenn die Eindickung des Kesselinhalts nicht so weit getrieben wird, daß die Kieselsäure auch bei Abwesenheit von Härtebildnern allein ausfällt, d. h. also, wenn regelmäßig abgeblasen wird;

c) wenn stets genügend Alkali im Kessel vorhanden ist, so daß die Kieselsäure in der löslichen Form des Natronsilikats bestehen kann;

d) wenn eine optimale Menge an kolloid-organischer Substanz für die Erhöhung der Löslichkeit sorgt.

6. Die Beobachtung, daß kiesel-säurereicher Kesselstein schon in Form von ganz dünnen Steinschalen zu Wärmestauungen und Wärmeverlusten Veranlassung gibt, kann in ihren Ursachen vorläufig nur zum Teil erklärt werden.

7. Die Vereinigung der Großkesselbesitzer wird dem Studium der hier angeschnittenen Fragen in nächster Zeit besondere Aufmerksamkeit widmen.

Literaturangaben.

¹ Goldberg: Die Kieselsäure im natürlichen Wasser, in alkalisch ausgereinigten Kesselspeisewässern und im konzentrierten Kesselwasser. Zeitschr. f. Untersuch. d. Nahrungs- u. Genußmittel Bd. 27, S. 265—273. 1914; Wasser u. Abwasser Bd. 9, S. 227. 1915.

² Stadlinger: Korrosionen der Dampfkessel durch ungeeignetes Kesselspeisewasser. Seifenfabrikant 1914, Nr. 8—11, Sonderdruck. Berlin: Julius Springer.

³ Eitner: Die charakteristischen Eigenschaften deutscher Rohwässer für Kesselspeisung. Speisewasserpflge S. 10. Charlottenburg: Selbstverlag der Vereinigung der Großkesselbesitzer 1926.

- ⁴ Splittgerber: Die Aufbereitung des Kesselspeisewassers bei Berücksichtigung der Eigenschaften des Rohwassers und der Betriebsverhältnisse. Speisewasserpflege S. 15.
- ⁵ Thörner: Beitrag zur Untersuchung von Kesselspeisewässern. Chem.-Zeitg. Bd. 29, S. 802—803. 1905.
- ⁶ Basch: Vom Abblasen und von den Salzen des Kesselwassers. Chem.-Zeitg. Bd. 29, S. 878. 1905; Bd. 37, S. 296. 1923.
- ⁷ Pfadt: Permutiertes Speisewasser und siliziumhaltiger Kesselstein. a) Speisewasserpflege S. 41—44; b) Z. d. bayr. Rev.-V. Bd. 29, S. 240—242. 1925; c) Wärme Bd. 48, S. 557—559. 1925.
- ⁸ Morawe: Permutiertes Speisewasser und siliziumhaltiger Kesselstein. a) Speisewasserpflege S. 44—47; b) Z. bayr. Rev.-V. Bd. 30, S. 11—12. 1926; c) Wärme Bd. 49, S. 82—83 u. 84—85. 1926.
- ⁹ Braungard: Permutiertes Speisewasser und siliziumhaltiger Kesselstein. Z. bayr. Rev.-V. Bd. 29, S. 259 bis 261. 1925.
- ¹⁰ Pfadt: Permutiertes Speisewasser und siliziumhaltiger Kesselstein. a) Speisewasserpflege S. 47; b) Z. bayr. Rev.-V. Bd. 30, S. 23—25. 1926; c) Wärme Bd. 49, S. 83—85. 1926.
- ¹¹ Smith, Otto Mitchel: Kieselsäure, ihr Einfluß und ihre Beseitigung bei der Wasserreinigung. Illinois State Water Surveyor, Bull. Bd. 16, S. 140—181. 1919; Chem. Zentralblatt Bd. 4, S. 1307. 1921.
- ¹² „Auswertung der Darmstädter Verhandlungen über Speisewasserpflege in der Praxis des Kesselbetriebes.“ Vertrl. Mitt. d. Vereinigung d. Großkesselbesitzer Nr. 10 vom 15. Mai 1926, Gutachten Nr. 9 und 11.
- ¹³ The Boiler Maker vom Dezember 1925, S. 336.

V. Betriebssicherheit der Höchstdruckkesselanlagen.

Von Direktor **O. H. Hartmann**, Kassel-Wilhelmshöhe.

Dem Wunsche Ihres Herrn Vorsitzenden bin ich gern nachgekommen, über die bisherigen mit den Höchstdruckkesseln gemachten Erfahrungen und deren Betriebssicherheit zu sprechen. Ich habe meine Aufgabe so aufgefaßt, daß ich nur über solche Kessel berichte, deren Betriebsdruck höher als 50 at ist. Die Verwendung von Dampfdrücken von 30—40 at gehört ja heute schon zu den Alltäglichkeiten, wenn auch die meisten derartigen Anlagen zur Zeit noch im Bau begriffen sind. Ich habe nun versucht, soweit mir die zur Verfügung stehende kurze Zeit dazu ausreichte, nicht nur die Unterlagen, welche mir auf Grund der Erfahrungen meiner Firma zur Verfügung stehen, zu bringen, sondern ich habe auch die in der Literatur noch spärlich vorhandenen Angaben für den Vortrag verwertet. Ferner habe ich mich auch mit allen den Firmen in Verbindung gesetzt, die neue Höchstdruckkessel gebaut oder in Betrieb haben. Leider sind die mir für den Vortrag zugegangenen Mitteilungen verhältnismäßig dürftig ausgefallen, wie Sie ja später selbst werden feststellen können.

Bei uns in Deutschland ist es noch immer vielfach üblich, wenn gute oder auch schlechte Erfahrungen auf einem neuen Arbeitsgebiet gemacht sind, diese möglichst lange geheim zu halten, damit ja der liebe Konkurrent nichts davon erfährt. Dieses Verhalten ist schon oft gerügt worden. In den Vereinigten Staaten von Amerika ist man viel mehr für Gemeinschaftsarbeit und Erfahrungsaustausch. Der Erfolg dieser Handlungsweise ist daher auch ein schnellerer Fortschritt als bei uns.

Die bisher bekannt gewordenen Hochdruckkessel, die die Druckgrenze von 50 at überschreiten, sind in Zahlentafel 1 mit ihren Hauptabmessungen und Leistungen zusammengestellt.

Von diesen ist der unter 1 aufgeführte Schmidtsche Kessel nach Erfüllung seiner Aufgabe abgebrochen worden, um den Platz für den unter 7 genannten Kessel freizumachen. Teile

Zahlentafel 1. Bisher im Betrieb

		1	2	3	4
1	Kesselbauart	Steilrohrkessel	Atmoskessel	Steilrohrkessel	Löffler-Kessel
2	Erbauer	Ascherslebener-Maschinenbau A.G., Aschersleb.	Atmos-Gesellschaft, Stockholm	A. Borsig, Tegel	Floridsdorfer Lokomotivfabrik, Wien-Floridsdorf
3	Auftraggeber	Schmidtsche Heißdampf G.m.b.H., Cassel-Wilh.	Carnegie-Zucker-raffinerie, Göteborg	„	„
4	Inbetriebsetzung Jahr	1911	1920/24	1924	16. Dez. 1924
5	Dampfdruck atü	60	60 ₂ 100	60	100
6	Dampfleistung kgh	1360	3000/5000	10000	300
7	Feuerungsart	Handbeschickung Steinkohle	—	Wanderrost Steinkohle	Ölfeuerung
8	Rostgröße qm	1,5	7,4 für 100 at	10,2	—
9	Verdampfer-Heizfläche qm	26	—	280	—
10	Überhitzer- „ qm	24	—	136	—
11	Vorwärmer- „ qm	22	—	200	—
12	Gesamt- „ qm	72	—	616	—
13	Luftvorwärmer- „ qm	—	—	—	—
14	Bisherige Betriebsstundenzahl	20000	—	3500	—

dieses Kessels, sowie ein Modell im Maßstab 1 : 5 sind im Deutschen Museum in München zur Ausstellung gelangt.

Im Bau begriffen sind zur Zeit noch folgende Höchstdruckkessel:

Ein Steilrohrkessel für 60 at von etwa 300 qm Verdampfungs- und Überhitzerheizfläche, 7,5 qm Rostfläche und bei Staubkohlenzusatzfeuerung 8000 kg/h Dampfleistung für das Heiz- und Kraftwerk der Technischen Hochschule in Hannover, der von den Büttnerwerken geliefert, und bei dem Konstruktionen meiner Firma verwendet wurden, und ein Benson-Dampferzeuger für 30000 kg/h Dampferzeugung mit Staubkohlenfeuerung bei den Siemens-Schuckert-Werken in Berlin.

Da die Mehrzahl der Höchstdruckkessel als Wasserrohrkessel ausgebildet ist und diese auch die längsten Betriebszeiten hinter sich haben, sowie für die größten Leistungen gebaut sind, will ich diese zuerst behandeln.

Ich werde nun der Reihe nach die wichtigsten Konstruktionselemente durchgehen.

Ich erwähne zuerst die Kesseltrommeln. Diese haben schon bei niedrigen Betriebsdrücken in genieteter Ausführung durch Nietloch- und Krepfenrisse so viele Schwierigkeiten verursacht, von denen Sie gerade, meine Herren, ein trauriges Lied singen können, daß sie für Höchstdruckkessel nicht mehr in Betracht kommen sollten. Nur eine einzige Höchstdruckkesselanlage in den Centrales Electriques des Flandres, von den englischen Babcock & Wilcox Werken gebaut, besitzt genietete Trommeln. Die Bleche dieser Trommeln haben in der Nietnaht eine Stärke von 40 mm. Die Nietnähte sind Laschennietungen und die Nieten sind 100 mm lang. Nach Mitteilungen des Generaldirektors Herry dieser Werke sind die Nietnähte undicht gewesen, und würde man, wenn die Anlage heute neu auszuführen wäre, geschmiedete Trommeln verwenden. In Deutschland haben wir ja von vornherein zu solchen unsicheren Ausführungen nicht unsere Zuflucht genommen; schon der erste Schmidtsche Kessel besitzt bereits nietlose Trommeln. Inzwischen sind in der Herstellung solcher geschmiedeter oder geschweißter Kesseltrommeln, die von den Firmen Fried. Krupp A.G., Essen, Preß- und Walzwerk A.G., Reisholz bei Düsseldorf und den Vereinigen Stahlwerken A.G., Abtl. Thyssen, Mülheim/Ruhr, geliefert werden, erhebliche Fortschritte gemacht worden. Es wird Sie, meine Herren, vielleicht interessieren, wenn ich erwähne, daß seit zwei Jahren nahezu 600 solcher Trommeln bestellt bzw. geliefert sind. In Abb. 1 ist die Zahl der bestellten Trommeln in den einzelnen Monaten als Ordinate aufgetragen. Über die Baustoffe, die zu solchen Trommeln verwendet werden, und die zulässige Beanspruchung bei der in Frage kommenden höheren Temperatur ist schon so viel geschrieben und geredet worden, daß ich hier wohl nicht darauf einzugehen brauche.

befindliche Höchstdruckkessel.

5	6	7	8	9	10
Sektionalkessel	Sektionalkessel	S. H. G.-Sicherheitskessel mit mittelb. Beheizg.	Atmoskessel	Steilrohrkessel	Benson-Vorschaltkessel
Babcock und Wilcox-Werke, England	Babcock und Wilcox-Werke, V. St. v. Amerika	Schmidtsche Heißdampf G. m. b. H., Zweigniederlassung Wernigerode a. H.	Sudenburger Maschinenfabrik, Sudenburg	Gebr. Sulzer, Winterthur	Benson-Studiengesellschaft
Centrales Electriques d. Flandres, Langerbrugge	Weymouth-Kraftanlage, V. S. v. Amerika	„ Cassel-Wilhelmsh.	„	„	Siemens-Schuckert-Werke, Berlin
Ende 1925	Ende 1925	9. Februar 1926	Anfang 1926	April 1926	1925
56	84	60	110	110	225/110
12000	64500	1500	2715	3500	10000
Wanderrost Steinkohle	Stockerfeuerung Steinkohle	Handbeschickung Steinkohle	Ölfeuerung	—	Ölfeuerung
9,1	—	1,5	—	—	—
—	—	26,5	6,51	45	—
119	—	23,0	4,90	—	—
—	—	19,5	68,70	—	—
559	2680 ohne Überhitzer	69,0	80,11	—	—
445	—	—	—	—	—
2000	—	500	—	1000	—

Den Fortfall der Nietloch- und Krepfenrisse werden Sie selbst am besten zu schätzen wissen. Es wird vielleicht manchem von Ihnen, meine Herren, neu sein, zu hören, daß auch schon für Kessel von Betriebsdrücken von 15—20 at Kesseltrommeln mit angekämpelten Böden Verwendung gefunden haben. Die geschmiedeten Kesseltrommeln sind in jeder für die Praxis in Betracht kommenden Größe und Wandstärke, also auch für jeden Druck ausführbar, während die Verwendungsmöglichkeit der geschweißten Trommeln von der schweißbaren Blechstärke abhängig ist. Thyssen hat bereits eine Trommel mit einer Wandstärke von 88 mm hergestellt, bei welcher die Festigkeit in der Schweißnaht über 90% der Festigkeit des vollen Bleches betrug. Für 1300 mm l. W. ergibt das bei 60% tragendem Querschnitt in der Rohrreihe und doppelter Sicherheit bis zur Streckgrenze einen höchsten Betriebsdruck von 60 at.

Eine wichtige Forderung für die betriebssichere Ausgestaltung eines Höchstdruckkessels mit nietlosen Trommeln ist, daß diese der strahlenden Wärme der Feuerung und der Einwirkung der heißen Feuergase entzogen werden. Sonst treten in den dicken Wandungen infolge der einseitigen Beheizung Wärmespannungen auf, die bei den hohen Wasser- und Dampftemperaturen für den Kesselbaustoff gefährlich werden können. Auch hierauf ist schon wiederholt hingewiesen worden, so daß ich diese nur kurz anzudeuten

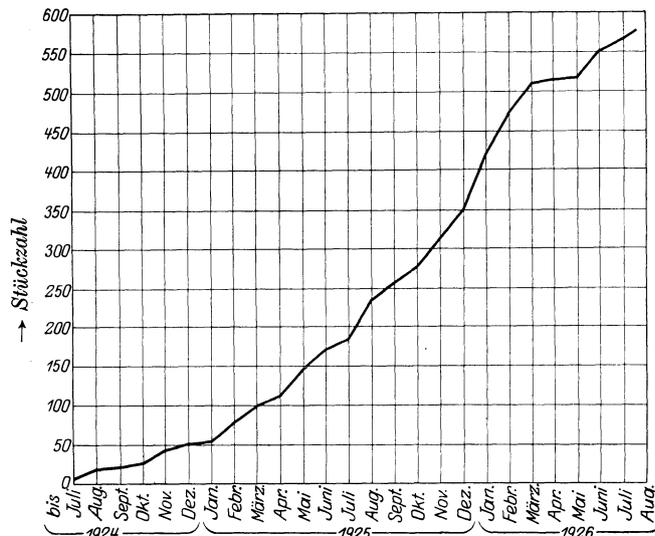


Abb. 1. Bisher bestellte nietlose Kesseltrommeln mit angekämpelten Böden.

brauche. Der erste Schmidtsche Versuchskessel sowie der Schmidt-Borsig-Kessel sind schon mit einem derartigen Wärmeschutz versehen. Anstände irgendwelcher Art haben sich daher mit den Trommeln dieser Kessel nicht ergeben.

Für einen Höchstdruck-Wasserrohrkessel ist eine weitere Frage die, welche Rohr-abmessungen zweckmäßig zu wählen und wie die Einwalzstellen auszuführen sind. Bei hohem Betriebsdruck von 50 at und darüber empfiehlt es sich, nicht mehr Wasserrohre von 80—90 mm l. W. zu benutzen, sondern hierbei sind nur solche von 50—60 mm mit etwa 4 mm Wandstärke zu verwenden. Die Wahl derartig kleiner Rohr-abmessungen ist in bezug auf die Dampferzeugung bei Höchstdruckdampf ohne weiteres zulässig, denn die im beheizten Wasserrohr entstehenden Dampfblasen haben viel kleinere Abmessungen als sonst und daher ist auch die Kühlwirkung des

Dampfwassergemisches auf die Rohrwandungen eine sehr gute.

Der erste Schmidtsche Versuchskessel hatte Kesselrohre von 28/36 mm Durchmesser bei 3 m beheizter Länge, während der Schmidt-Borsig-Kessel solche von 52/60 mm Durchmesser und 5,6 m beheizter Länge besitzt.

Der Kessel des Weymouth-Kraftwerkes für 84 at Betriebsdruck ist mit Rohren von 2'' Lichtweite und Wandstärken von $\frac{1}{4}$ '' ausgeführt. Die Kessel in Langerbrugge sind mit Wasserrohren von 76 mm l. W. und 4 m Länge versehen.

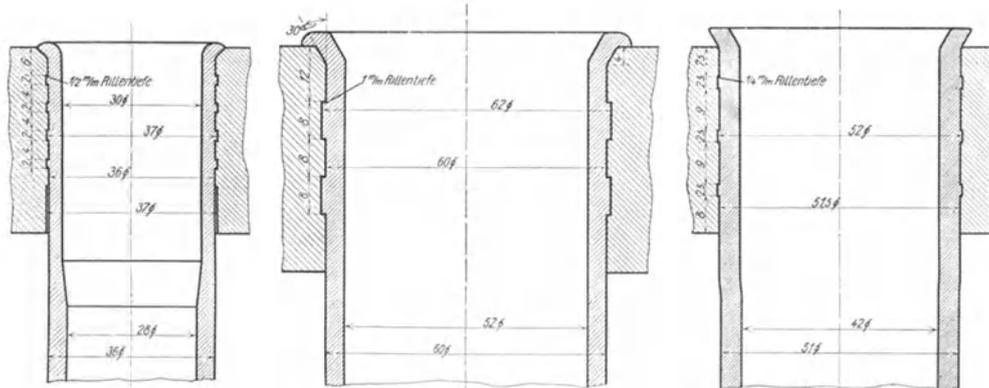
Rohre von 52—60 mm Durchmesser, wie sie beim Borsig-Kessel verwendet werden, werden im Betrieb mit 390 kg/qcm beansprucht. Die Zugfestigkeit des dafür zu verwendenden Baustoffes ist bei 290° etwa 3800 kg/qcm (S.M.-Fluß Eisen I mit 3400—4100 kg/qcm Festigkeit), also gerade so hoch wie im kalten Zustand, jedoch geht die Streckgrenze auf etwa 1300 kg/qcm zurück. Trotzdem ist bis zur Streckgrenze noch eine 3,3 fache Sicherheit vorhanden. Solche Beanspruchungen sind noch durchaus ungefährlich, im Gegenteil wird auf diese Weise der Baustoff der Rohre besser ausgenutzt wie bei niedrigem Druck, denn bei 20 at Betriebsdruck und einer Lichtweite der Rohre von 90 mm und gleichfalls 4 mm Wandstärke ist die Beanspruchung nur 225 kg/qcm.

Durch das Einwalzen werden die Rohre an der Walzstelle allerdings über die Streckgrenze beansprucht; aber bei unseren Versuchen mit verschiedenen Kesseln, die sich bis zu Betriebsdrücken von 180 at bewegten, hat sich hierdurch nichts Nachteiliges gezeigt. Die Walzstellen waren fast immer dicht. Die gleichen Erfahrungen sind auch bei anderen Höchstdruckkesseln gemacht worden.

Es ist empfehlenswert, bei dicken Trommelwandungen die Einwalzstellen nur in den Mittelteil der Wandung zu legen, weil auf diese Weise die Baustoffbeanspruchung nicht an der Außen-

haut erfolgt, so daß eine Rißbildung erschwert ist. Es empfiehlt sich ferner zur Sicherheit gegen Herausziehen noch den Rand der Rohre umzubördeln.

In dem Verdampferteil des Schmidtschen Versuchskessels ist bei der in Abb. 2 gezeigten Ausführung niemals eine Undichtheit aufgetreten, obgleich der Kessel viele hundert Male



Einwalzstellen.

Abb. 2. Schmidtscher Versuchskessel.

Abb. 3. Schmidt-Borsig-Kessel.

Abb. 4. Hochdruck-Lokomotive.

angeheizt wurde; nur im Vorwärmerteil haben die Einwalzstellen in der hinteren Obertrommel öfters geleck. Das kam von dem Temperaturunterschied her, der zwischen der auf der oberen Hälfte durch Dampf beheizten Trommel und der durch das kältere Speisewasser bespülten Wasserrohre bestand.

Die Abb. 3 u. 4 zeigen die Einwalzstellen des Schmidt-Borsig-Kessels und der Hochdrucklokomotive für 60 bzw. 90 at Betriebsdruck.

Wasserrohrbündel mit gebogenen Rohren halten in den Walzstellen besser als gerade Rohre, weil sich die verschiedenartigen Rohr-

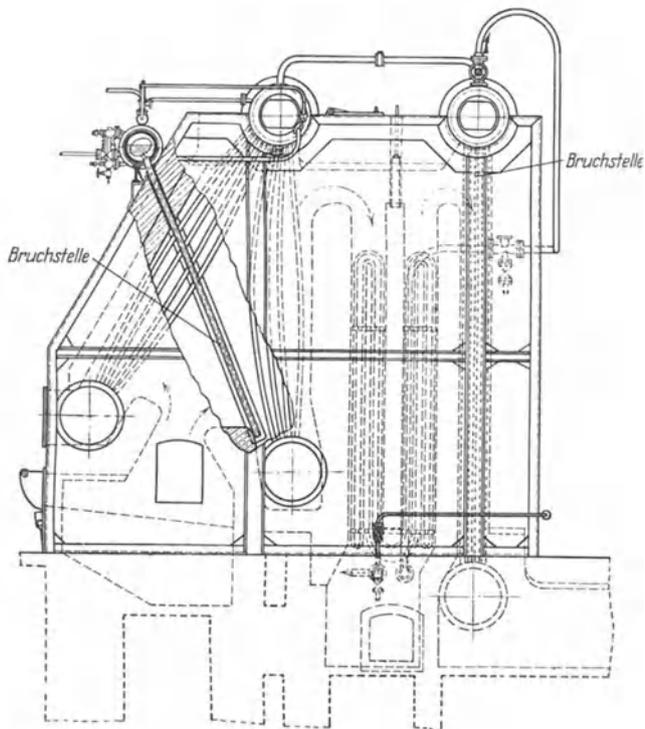


Abb. 5. Erster Schmidtscher Höchstdruckkessel mit eingebautem Feldrohrkessel.

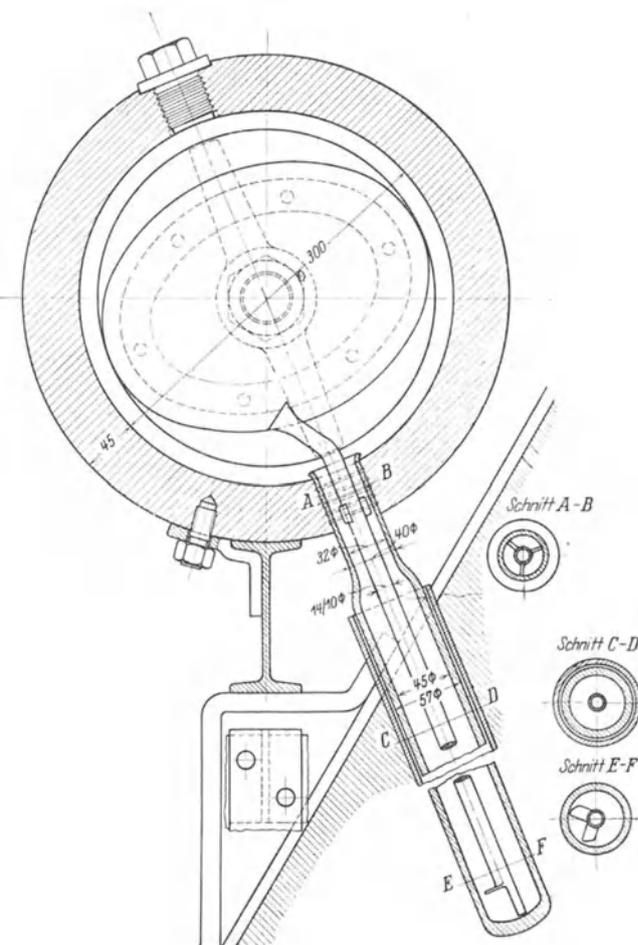


Abb. 6. Feldrohrkessel für 120 at

dehnungen leicht ausgleichen können. Für höchste Drücke ist das noch wichtiger als bei niedrigeren; deshalb dürfen auch die Fallrohre nicht steif sein, sondern sie müssen elastisch nachgeben können, um ungünstige Beanspruchungen an den Einwalzstellen zu verhindern.

Was nun die Gefahr des Aufreißen der Wasserrohre anbetrifft, so kann dieses, guter Baustoff vorausgesetzt, nur dann auftreten, wenn Störungen im Wasserumlauf eintreten, oder wenn kesselsteinhaltiges Speisewasser benutzt wird, durch welches die Rohre mit Kesselstein belegt werden. Unbedingt notwendig ist, daß der Wasserumlauf auch bei Belastungsschwankungen auf alle Fälle gesichert ist.

Es fragt sich nun, wenn wirklich einmal ein Wasserrohr aufreißt, welche Erscheinungen sich bei höchsten Drücken zeigen.

Bei unseren Versuchen sind uns einige Male Wasserrohre aufgerissen. Das erste Mal an einem Fieldrohrkessel für 120 at Betriebsdruck (Abb. 5 und 6), dessen Wasserrohre 45 bis 57 mm Durchmesser besaßen. Dieser Kessel sollte zur Lieferung des Heizdampfes für die Zwischenüberhitzer einer Kolbendampfmaschine dienen; er hatte allerdings nur einen Wasserinhalt von 60 kg. Der Baustoff war von guter Beschaffenheit. Dieser Fieldrohrkessel war zwischen die Wasserrohre des ersten Schmidtschen Versuchskessels eingebaut. Der Wasserumlauf war infolge zu enger Wasserzuführungsrohre schlecht, und da die Rohre an der Eintrittsstelle in den Feuerraum stichflammenartig beheizt wurden, kamen einige Rohre an dieser Stelle in Weißglut, warfen Blasen und zwei der Rohre platzten dann mit lautem Knall auf, aber ein Schaden wurde hierdurch nicht verursacht, da die geringe Wassermenge aus einem Querschnitt von etwa 30 qcm in wenigen Augenblicken ausgeströmt war.

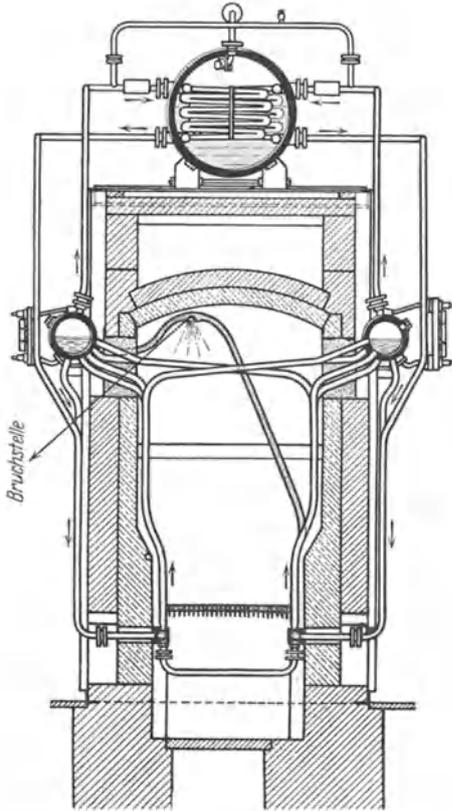


Abb. 7. Feuerbüchselement des mittelbar beheizten Versuchskessels in Wernigerode.

Der zweite Fall trat bei unserem wiederholt erwähnten ersten Versuchskessel (Abb. 5) ein, und zwar riß ein Vorwärmerrohr im letzten Kesselzug auf. Da der Kessel vielfach mit ungereinigtem und unentgastem Speisewasser gespeist wurde, traten an den Vorwärmerrohren, besonders an den Eintrittsstellen des Speisewassers, kurz oberhalb der unteren Trommel Korrosionen auf, so daß sich eine Neuberohrung dieses Kesselteiles empfahl. Diese Ersatzrohre wurden während der Zeit der Ruhrbesetzung beschafft. Der Baustoff war denkbar schlecht, er war sehr hart und ließ sich schwierig einwalzen. Weiter besaßen die Rohre auf der Innenseite Längsrisse, die sich erst nach kurzem Kesselbetrieb nachweisen ließen. Eines der Rohre riß eines Tages beim Anheizen ohne jeden Anlaß, etwa 300 mm unterhalb der oberen Trommel, auf. Ein Erglühen des Rohres kam nicht in Frage, denn die Heizgase hatten an dieser Stelle höchstens eine Temperatur von 400° , während die Wassertemperatur nur etwa 170° war. Der Wasserinhalt des Kessels betrug etwa 1500 kg. Das Rohraufreißen äußerte sich hier ebenfalls in einem lautem Knall. Die Verschlußdeckel im Kesselmauerwerk flogen heraus. Die Explosionswelle pflanzte sich hauptsächlich nach dem Fuchs und dem Schornstein fort. Außer einer starken Verqualmung des Kesselhauses traten aber sonst keine Beschädigungen weder am Kessel noch am Kesselhaus auf. In diesem Fall dauerte es allerdings einige Minuten, bis das Wasser entwichen und der Kessel wieder zugänglich war.

Der dritte Betriebsunfall ereignete sich bei unserem neuen Versuchskessel mit mittelbarer Beheizung nach etwa 200 Betriebsstunden, und zwar riß eines der Wasserrohre des Feuerbüchsenelementes auf, das in den Feuerraum eingebaut ist, aber nicht zu diesem Kesselsystem gehört, sondern ein Probeelement der Feuerbüchse der Hochdrucklokomotive ist (Abb. 7). Die Rohre hatten 42—50 mm Durchmesser und der Wasserinhalt des Heizelementes betrug 100 kg, der Betriebsdruck war etwa 80 at. Diese Störung ereignete sich, weil der Wasserumlauf auf der einen Seite aussetzte; es fehlte nämlich ein Druckausgleichsrohr zwischen der rechten und linken Feuerbüchshälfte. Dadurch kamen einige direkt bestrahlte, nur durch den Dampf gekühlte Rohre, die auf das ganze Heizelement bezogen, etwa 160 kg/qm h Dampf erzeugten, zum Erglühen und eines der glühenden Rohre platzte an einer schwachen Stelle auf. Der ausströmende Dampfstrahl blies direkt auf die Feuerung und dadurch wurde die ohne

Verschluß ausgeführte Feuertür aufgeworfen und der gerade davor stehende Heizer durch einige herausfliegende glühende Kohlenstückchen am Leib etwas verbrannt. Die Verletzung war aber nicht gefährlich, denn eine Verbrühung war nicht eingetreten, daher konnte der Heizer auch nach wenigen Tagen wieder seine Arbeit aufnehmen. Daß auch in diesem Falle sonst keinerlei Sach- noch Personenschaden entstanden ist, ist ebenfalls nur auf den geringen Wasserinhalt des Elementes zurückzuführen. Ähnliche Erfahrungen wie die vorher geschilderten sind ebenfalls bei den Versuchen mit dem Benson-Kessel gemacht worden. Darüber berichtet mir Oberingenieur H. Gleichmann von den Siemens-Schuckert-Werken wörtlich wie folgt:

„In Rugby ist nur einmal ein Überhitzerrohr geplatzt, als wir versuchsweise längere Zeit mit über 500° arbeiteten. Ein Unfall ist hierbei selbstverständlich nicht vorgekommen, trotzdem eine größere Anzahl Menschen direkt um den Kessel herum standen, darunter auch ich. Der Unfall wäre auch nicht passiert, wenn nicht das Material, welches von Opitz & Klotz, Leipzig, direkt nach dem Kriege geliefert wurde, unter den Mängeln der Nachkriegszeit gelitten hätte, wie mir später Herr Opitz erklärte, der auch bei seinen eigenen Anlagen mit diesem Material Schwierigkeiten gehabt hatte. Bei der hiesigen Anlage sind am Anfang mangels genügender Erfahrung zweimal Rohrdefekte in den wassergefüllten Rohren entstanden, und zwar lediglich dadurch, daß ein Parallelstrang von den dreien verschlammte, weil wir mit einem Speisewasser von 70% Kondensat und 30% permutiertem Wasser arbeiteten. Wir hatten seinerzeit noch keine Abschlammvorrichtungen eingebaut. Aus diesem Vorfall zogen wir die Lehre, daß Abschlammventile erforderlich sind, wenn nicht mit reinem Kondensat gearbeitet wird und seitdem haben sich keinerlei Unfälle mehr ereignet. Wir können durch Thermoelemente in den drei Parallelsträngen eine vollständige Kontrolle über den ganzen Kessel ausüben und der Beginn einer Verschlammung macht sich sofort durch langsame Zunahme der Temperatur in dem verschlammten Strang bemerkbar. Eine kleine Öffnung des Abschlammventils beseitigt sofort den Übelstand im Betrieb. Auch wenn ein Wasserrohr defekt wird, tritt kein Unfall ein, denn da keine erheblichen Wassermengen im ganzen System sind, sinkt sofort der Druck ab, das Wasser tritt in den Feuerraum, verdampft da und bildet, wie wir durch Materialversuche festgestellt haben, einen Schutz für die übrigen Rohre, bis das Feuer gelöscht und der Kessel ausgekühlt ist. Der Dampf zieht durch den Schornstein ab, ohne auch nur im geringsten in den Heizraum auszutreten. Es kann somit garantiert werden, daß der Kessel trotz seines hohen Druckes eine absolute Sicherheit gegen Explosionen gewährt.“

Alle diese unfreiwilligen Versuche über das Verhalten eines Höchstdruckkessels mit kleinem Wasserinhalt bei Aufreißen eines Wasserrohres haben den Beweis für die Gefahrlosigkeit solcher Kessel erbracht.

Um uns nun klar zu werden, ob ein Wasserstrahl eines Höchstdruckkessels überhaupt gefährlicher werden kann als der eines Kessels mit z. B. 20 at Betriebsdruck, habe ich einmal die theoretisch auftretenden Wassergeschwindigkeiten ausgerechnet. Diese betragen bei 20 at 74 m/s und bei 60 at 154 m/s. Die Wassergeschwindigkeit ist also bei 60 at mehr als doppelt so groß als bei 20 at. Das Volumen des ausströmenden Dampfes vergrößert sich bei plötzlicher Expansion von 20 auf 1 at von 103,5 l/kg auf 1980 l/kg, also auf das 19,2 fache, dagegen bei Expansion von 60 auf 1 at von 34,6 l/kg auf das 57 fache. Man muß auf Grund dieses Vergleichs zugeben, daß das Aufreißen eines Wasserrohres bei Höchstdruckdampfetrieb an sich gefährlicher ist als bei niedrigem Druck. Deshalb ist auf die Baustoffprüfung der Rohre besonderes Augenmerk zu richten, damit Rohrbrüche vermieden werden. Daher sollte auch jedes einzelne Wasserrohr vor seiner Verwendung im Kessel auf den mehrfachen Betriebsdruck abgepreßt werden. Ferner ist für einen gefahrlosen Betrieb ein möglichst kleiner Wasserinhalt des Kessels bzw. des ausblasenden Kesselteils bei einem Rohrbruch anzustreben, was bei Höchstdruckkesseln der Wasserrohrkesselbauart allerdings schwer zu erreichen ist.

Eine weitere Frage von Wichtigkeit für den Höchstdruckdampfetrieb sind die Überhitzer für höchste Dampftemperaturen. Die wirtschaftliche Ausnutzung des Höchstdruckdampfes erfordert bekanntlich über 400° liegende Frischdampftemperaturen. Es wird nun vielfach die Frage aufgeworfen, ob für solche Betriebstemperaturen noch gewöhnliches weiches Flußeisen benutzt werden kann oder ob dafür besondere, legierte Stähle verwendet werden müssen. Auf Grund der Erfahrungen an unserem ersten Versuchskessel, in dem die Dampftemperatur bis auf 490° gesteigert wurde, bin ich der Auffassung, daß weiches Flußeisen durchaus genügt. Abb. 8 zeigt eine Photographie eines Teiles der Überhitzerrohre und einen aufgeschnittenen Umkehrbogen an der am schärfsten beheizten Stelle. An sich ist die Kühlwirkung höchstgespannten Dampfes auf die Rohrwand des Überhitzers günstiger als bei niedrig gespanntem Dampf. Immerhin ist darauf zu sehen, daß nicht gerade die heißesten Feuergase mit dem Dampf höchster Temperatur zusammentreffen, sonst erfolgt zu leicht

ein Verbrennen der Überhitzer. Das von Wilhelm Schmidt zuerst eingeführte Gleich- und Gegenstromprinzip ist hier besonders am Platze.

Die gleichen günstigen Beobachtungen an den aus Flußeisen ausgeführten Überhitzern sind bei den Versuchen mit dem Benson-Kessel der Siemens-Schuckert-Werte und dem Löffler-Kessel der Floridsdorfer Lokomotivfabrik in Wien bei etwa 450° Überhitzungstemperatur gemacht worden, wie mir von diesen Stellen mitgeteilt wurde. Daher darf wohl diese Frage als geklärt gelten¹⁾.

An den Versuchskesseln meiner Firma sind die Überhitzersammelrohre aus gezogenen runden, flußeisernen Rohren hergestellt. Die Überhitzerrohre wurden eingewalzt, aber auch hier sind nur günstige Ergebnisse zu berichten.

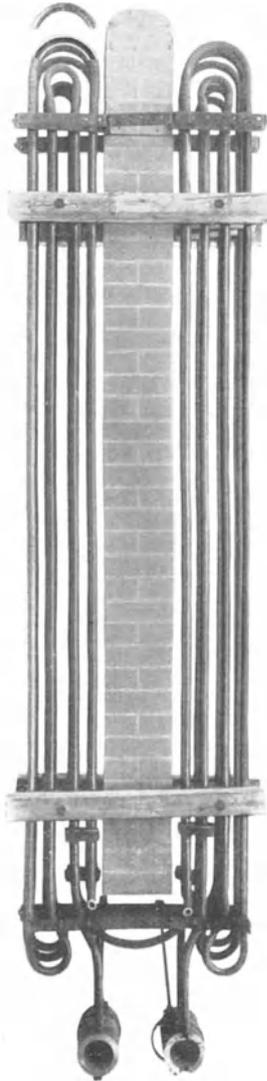


Abb. 8. Überhitzer des ersten Schmidtschen Versuchskessels.

Eine weitere zu beachtende Vorbedingung für einen betriebssicheren Höchstdruckdampfkessel ist ferner, daß die Überhitzerbeheizung geregelt werden kann, und zwar halte ich es für richtiger, die Regelung durch Klappen oder Schieber vorzunehmen, als den Dampf erst unnötig hoch zu überhitzen, um ihn dann wieder in einem Wärmeaustauscher abzukühlen. Ein solcher Weg ist für niedrigen Betriebsdruck noch zulässig, weil die Spanne bis zur Glühtemperatur noch verhältnismäßig groß ist. Bei höchstem Druck und höchster Überhitzung ist das nicht mehr statthaft, da die Überhitzerrohre zu leicht zum Erglühen kommen. Das ist besonders bei größeren Kesselanlagen zu befürchten, bei denen mitunter einzelne der Kessel überspeist werden, wodurch die Dampferzeugung plötzlich aussetzt und hochüberhitzter Dampf von den anderen Kesseln nach dem Überhitzer strömt.

Die Regelklappen der Überhitzer halten auch jahrelang, wenn sie nicht in eine zu heiße Feuerzone gelegt werden.

In Abb. 9 zeige ich Ihnen den Rauchgasschieber zur Überhitzterregelung des ersten Schmidtschen Versuchskessels.

Welche Überraschungen bei unregelmäßiger Überhitzerbeheizung eintreten können, geht aus einer Mitteilung hervor, die Ingenieur Noack von der Firma Brown, Boveri & Cie. über die Anlage in Langerbrugge in einem Vortrage im Berliner Bezirksverein des Vereins deutscher Ingenieure machte und die mir auch von der Centrales Electricques des Flandres unmittelbar bestätigt wurde. Danach ist in den von

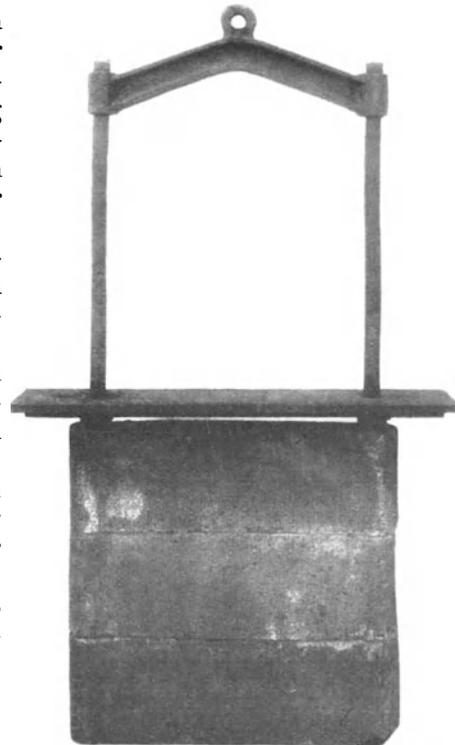


Abb. 9. Rauchschieber zur Überhitzterregelung des ersten Schmidtschen Versuchskessels.

den englischen Babcock-Wilcox Werken gelieferten Kesseln die Überhitzungstemperatur einige Male bis auf nahezu 600° angestiegen, ein Vorgang, der bei mehrfacher Wiederholung für die Lebensfähigkeit der Überhitzer dieser Anlage wie für die mit diesem Dampf betriebene Turbine nicht von besonderem Vorteil sein wird. Außer der Regelung der Beheizung ist für einen betriebssicheren Höchstdruckdampfüberhitzer noch zu beachten, daß die bisher üblichen weiten Überhitzerrohre nicht mehr verwendet werden dürfen, sondern es müssen kleinere Rohrdurchmesser von größerer Wandstärke gewählt werden. Die Wandstärke ist mit wenigstens 4 mm anzunehmen, damit selbst bei einem glühenden Überhitzer noch kein Aufreißen der Rohrschlangen eintreten kann. In unserem Versuchskessel hatten die Überhitzerrohre 20 mm lichte Weite und 5 mm Wandstärke, aber man kann mit dem

¹⁾ In Langerbrugge sind zweimal beim Anheizen Überhitzerrohre aufgerissen. Dies wird auf Luftsäcke oder auf eine zu rasche und zu intensive Beheizung zurückgeführt.

Rohrdurchmesser noch etwas höher gehen. Wählt man Rohre von 30 mm lichter Weite bei 4 mm Wandstärke, so ist die Beanspruchung in der Rohrwand bei 60 at Betriebsdruck 225 kg/qcm. Die Sicherheit gegen Bruch ist also bei einer Rohrwandtemperatur von 475° noch eine 7,8 fache, da die Festigkeit weichen Flußeisens bei dieser Temperatur noch 1750 kg/qcm ist; auch die Sicherheit bis zur Streckgrenze bleibt noch eine 2,9fache, was ohne weiteres zulässig ist. Die Überhitzer in den Kesseln in Langerbrugge haben solche Rohrabmessungen. Ein Konstruktionsvorteil für die Höchstdrucküberhitzer ist der wesentlich kleinere Dampfquerschnitt.

Bei dem ersten Schmidtschen Versuchskessel wie auch bei dem Schmidt-Borsig-Kessel ist der Überhitzer nach vorstehend angegebenen Gesichtspunkten entworfen worden. Beide Überhitzer haben sich deshalb auch im Betrieb ausgezeichnet bewährt.

Eine für den Entwurf der Überhitzer nicht zu vernachlässigende, aber schwer zu erfüllende Forderung ist, daß die Überhitzung bei allen Kesselbelastungen möglichst gleich bleibt. In den Vereinigten Staaten von Amerika ist zur Erreichung dieses Zieles zum ersten Male die Überhitzung des Dampfes in zwei in verschiedenen Feuergaszonen liegenden Überhitzern bewirkt und zwar werden dazu ein Strahlungsüberhitzer mit einem zwischen den Kesselbündeln liegenden, von den Feuergasen bestrichenen Überhitzer vereinigt. Die vom Strahlungsüberhitzer erzielte Überhitzung nimmt bei wachsender Dampfmenge ab, während die des anderen Überhitzers mit zunehmender Verdampfungsleistung des Kessels steigt. Auf diese Weise soll es möglich sein, eine fast genau gleich große Überhitzung für alle Kesselleistungen zu erzielen. Strahlungsüberhitzer besitzen nach den in Deutschland herrschenden Anschauungen nur eine kurze Lebensdauer. Die in Amerika vorliegenden Erfahrungen erstrecken sich auch erst noch auf sehr kurze Zeiträume, so daß gegenüber der Verwendung solcher Konstruktionen noch eine abwartende Stellung zu empfehlen ist. Ich würde für die Erreichung des gleichen Zieles zwar auch vorschlagen, den Überhitzer zu unterteilen, den Vorüberhitzer aber, gegen Strahlung geschützt, in die einzelnen Gassen der Kesselrohre des ersten Bündels zu legen und die Nachüberhitzung bis auf höchste Dampftemperatur in einem in einen besonderen Kesselzug eingebauten Überhitzer zu bewirken, dessen Beheizung sich regeln läßt. Die Anordnung des Überhitzers in den Rohrgassen, die seit etwa sieben Jahren von der Schwestergesellschaft meiner Firma, The Superheater Company, New York, ausgeführt wird, besitzt bereits den Vorteil, eine annähernd gleich hohe Überhitzung zu ergeben (Abb. 10). Solche Überhitzer lassen sich allerdings nicht mehr mit einfachen Rohrbogen ausführen, sondern dazu sind besondere Umkehrstellen notwendig, die ein enges Aneinanderliegen der einzelnen Überhitzerwindungen ermöglichen. Die Verwendung autogener Schweißung für solche durch höchsten Druck und höchste Temperaturen beanspruchten Teile ist nicht mehr angebracht; sie ist auch nicht notwendig, denn die Firmen Linke-Hofmann-Lauchhammer-Werke A.-G. in Riesa a. d. Elbe und Thyssen in Mülheim/Ruhr können derartige Umkehrstellen nach einem amerikanischen Verfahren der Superheater Co. aus den Rohren selbst schmieden.

Eine andere schwer wiegende Frage bei einer Höchstdruckkesselanlage ist die Ausbildung der Rauchgasvorwärmer für das Speisewasser. Hierfür sind eine ganze Reihe Vorschläge gemacht worden und es liegen auch bereits einige Ausführungen vor. Die einfachste Lösung ergibt sich, wenn man einen gewöhnlichen gußeisernen Economiser für 10—20 at Betriebsdruck hinter den Kessel schaltet. Der Vorwärmer wird in diesem Falle zweckmäßig durch eine Zentrifugalpumpe gespeist, die den Vorteil besitzt, daß der Vorwärmerdruck eine bestimmte Höhe nicht überschreiten kann. Zwischen Economiser und Kesselanlage ist allerdings noch eine zweite Pumpe einzuschalten, die das vorgewärmte Wasser nach

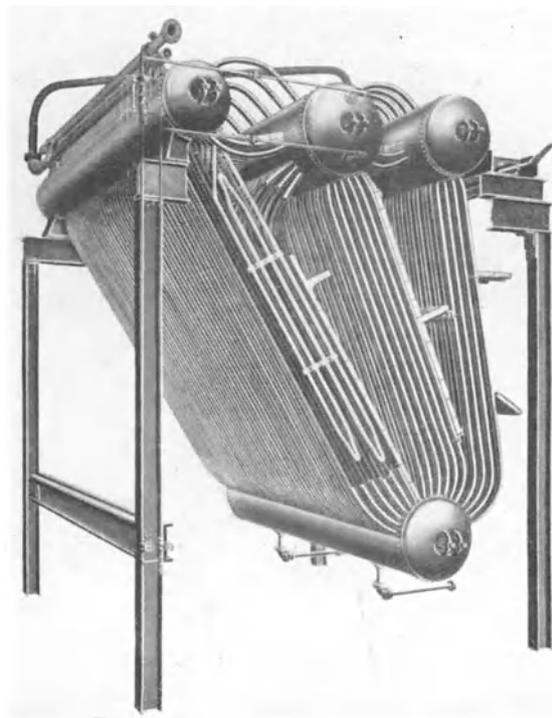


Abb. 10. Überhitzer, angeordnet in den Rohrgassen eines Steilrohrkessels.

dem Hochdruckkessel drückt. Natürlich lassen sich auch beide Pumpen als Zentrifugalpumpen in einem Gehäuse unterbringen, wie es von Klein, Schanzlin & Becker, Frankenthal, ausgeführt wird. Auch die Firma Weise Söhne, Halle a. d. Saale, liefert Speisepumpen für Vorwärmer, deren Druck niedriger als der Kesseldruck ist. Die Verwendung einer solchen Vorwärmerkonstruktion hat den Vorteil langjähriger Erfahrung für sich. Für Höchstdruckkessel ist eine derartige Anordnung allerdings noch nicht verwandt worden, sondern die in Betracht kommenden Kesseldrücke betragen bei den bisherigen Ausführungen bis zu etwa 35 at, z. B. von den Deutschen Babcock-Wilcox-Werken für das Elektrizitätswerk Frankfurt a. M. und für etwa achtzehn andere Anlagen der M. A. N. und anderer Firmen.

Bei dieser Gelegenheit möchte ich auch gleich erwähnen, daß die Kesselspeisepumpen für Höchstdruckdampfbetrieb keine größeren Schwierigkeiten machen als bei üblichem Druck. Für kleinere Leistungen muß man allerdings Kolbenpumpen verwenden, weil der Wirkungsgrad der Zentrifugalpumpen zu niedrig ist.

Weiter ist schon vorgeschlagen, gußeiserne Rippenrohr-Rauchgasvorwärmer aus Perlitguß für vollen Kesseldruck bis zu 100 at anzuwenden. Ob sich derartige Ausführungen im praktischen Betriebe bewähren werden, steht noch nicht fest, denn soweit mir bekannt, liegt eine solche Ausführung noch nicht vor.

Ein zweiter Weg, der eingeschlagen werden kann, ist bei einem Steilrohrkessel das letzte Kesselbündel als Vorwärmer auszubilden. Eine solche Lösung ist bereits bei dem ersten Schmidtschen Höchstdruckkessel angewendet worden. Die Vorwärmerrohre haben an der Einwalzstelle der Obertrommel, wie ich schon vorhin angab, öfters geleckt. Ferner zeigten sich auch infolge des unentgasten Speisewassers die bekannten Korrosionserscheinungen. Vorwärmer dieser Bauart sind infolge der notwendigen Wasservorlagen verhältnismäßig teuer. Auf alle Fälle muß die obere Vorwärmertrommel vollständig mit Wasser gefüllt gehalten werden, damit in ihr keine Temperaturunterschiede auftreten, die das Rohrlecken herbeiführen und ungünstige Wärmespannungen in der Trommel verursachen.

Eine billige und sichere schmiedeeiserne Vorwärmerkonstruktion läßt sich schaffen, wenn der Vorwärmer zwar auch im letzten Heizgaszug als besonderes Rohrbündel angeordnet wird, die geraden Vorwärmerrohre selbst aber an kleine Sammelkammern angeschlossen werden (Abb. 11). Bei dieser Anordnung sind Schwierigkeiten mit den Einwalzstellen nicht zu befürchten, denn sämtliche Rohrreihen können sich unabhängig voneinander ausdehnen. Die Wassergeschwindigkeit kann bei solchen Vorwärmern auch verhältnismäßig hoch gewählt werden, wenn das Speisewasser im Zickzack durch die einzelnen Vorwärmerreihen geschickt wird. Die einzige unangenehme Beigabe sind in diesem Falle die an jedem Rohr vorzusehenden Verschlüsse. Ferner ist bei unentgastem Speisewasser die Korrosionsgefahr nicht ausgeschlossen. Diese könnte dadurch beseitigt werden, daß die Rohre auf der inneren Seite eine dünne Kupferseele erhalten. Thyssen, Mülheim/Ruhr, ist in der Lage, derartige kupferplattierte Rohre zu liefern. Die Plattierung hält sich auch beim Walzprozeß sehr gut an den Einwalzstellen, wie durch einen Versuch festgestellt worden ist.

In den letzten Jahren sind in der Aufbereitung des Kesselspeisewassers gerade in Ihrem Kreise umfangreiche Erfahrungen gesammelt worden. Sie haben nicht nur auf chemische Weise das Speisewasser zu reinigen versucht, sondern auch schon die Verwendung destillierten Zusatzwassers eingeführt, wie das im Schiffsbetriebe schon seit Jahrzehnten üblich ist. Kesselstein tritt in solchen Fällen nur dann auf, wenn Kondensatorrohre undicht sind und das Kondensat durch Kühlwasser verunreinigt wird. Ganz vermeiden läßt sich meines Erachtens eine Kesselsteinbildung kaum, so daß bei jedem Rauchgasvorwärmer sowie bei jedem Kessel mit unmittelbarer Dampferzeugung die Möglichkeit der Reinigung bestehen sollte.

Manche Fachleute setzen sich über diese Forderung hinweg, so schlägt z. B. der Franzose Dieterle vor, Economiser für Höchstdruckkessel als schmiedeeiserne Rohrschlangen auszuführen, und zwar will dieser die Korrosionsgefahr dadurch beseitigen, daß er die Wassergeschwindigkeit über der kritischen hält und dadurch stets eine turbulente Strömung im Vorwärmerrohr erzielt, durch welche Anrostungen und Kesselsteinansatz vermieden werden sollen. Nach Untersuchungen von Dieterle, die in der Zeitschrift „Chaleur et Industrie“ des Jahres 1923 veröffentlicht sind, soll die Wassergeschwindigkeit bei 30 mm weiten Rohren mindestens 0,25—0,3 m/s betragen. Derartige Economiser sind, soviel mir bekannt ist, in Deutschland noch nicht in Verwendung. Jedoch sind in Paris im Gennevilliers Kraftwerk und auch in einigen Kraftanlagen in Südamerika eine Anzahl derartiger Economiser, wie es heißt, mit gutem Erfolg im Betrieb. Die Dampfdrücke in den bisherigen im Betrieb befindlichen Anlagen sind allerdings auch noch keine Höchstdrücke im Sinne meines Vortrages, sondern bewegen sich um etwa 30 at.

Die Anlage in dem Kraftwerk Gennevilliers ist von Humboldt in Köln ausgeführt. Humboldt scheint aber den Dieterleschen Behauptungen nicht ganz zu glauben, denn sie empfiehlt,

bei ihren schmiedeeisernen Economisern für die Speisung nur reines Kondensat zu verwenden, das auch nur einen Luftgehalt von 0,3—0,5 ccm³ im Liter Speisewasser besitzt. In Lichtbildern wurden eine Reihe von Rohrschlangen sowie ein zusammengebauter Economiser, sowie eine Photographie eines aufgeschnittenen Rohrstückes nach 10000 Betriebsstunden gezeigt. Einige kleinere Korrosionserscheinungen sind immerhin in den Rohren festzustellen.

Für gut aufbereitetes Speisewasser ist auch im Höchstdruckdampfbetrieb ein Wasserrohrkessel brauchbar. Seine Kosten sind nur in der üblichen Ausführung reichlich hoch, weil von den Kesselherstellern gewöhnlich ebensoviel Trommeln vorgesehen

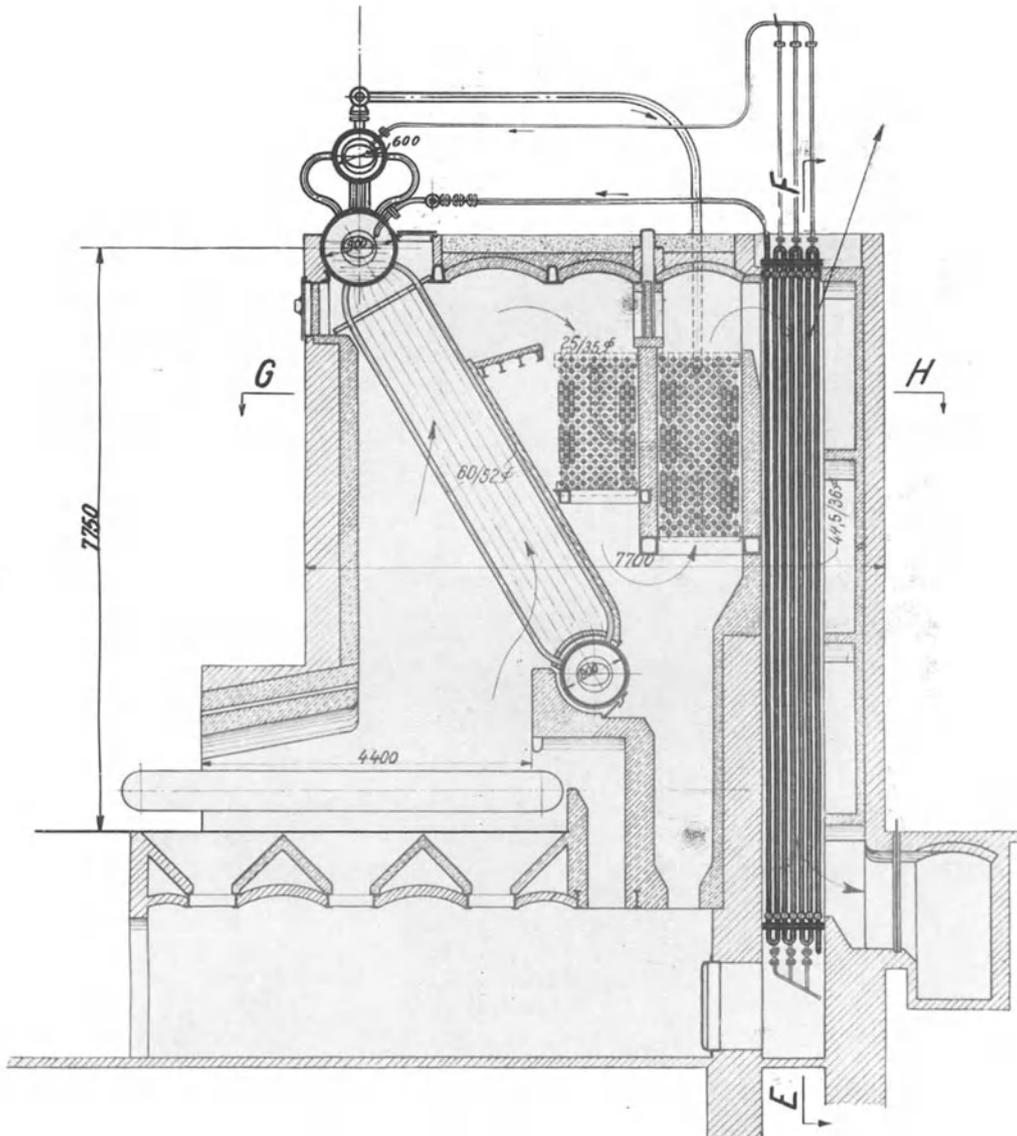


Abb. 11. Schmiedeeiserner Vorwärmer mit geraden Rohren, im letzten Heizgaszug eingebaut.

werden, wie für einen Kessel mit niedrigem Druck. Nun lassen sich die Wasserrohrkessel verbilligen, wenn nur ein Verdampfungsbündel ausgeführt wird, denn die Heizflächen der Höchstdruckkessel lassen sich erheblich verkleinern. Der größte Teil des Dampfes wird bekanntlich schon in den ersten stark bestrahlten Rohrreihen erzeugt, zumal die Verdampfungswärme bei Höchstdruck niedriger ist, als sonst. Gegen die Verkleinerung der Heizflächen spricht meist nur die Gewohnheit, denn bei Höchstdruckkesseln bleibt, wenn hohe Frischdampfüberhitzung verwendet wird, und wenn außerdem noch Wärme für Zwischenüberhitzung benötigt wird, für das zweite Verdampferbündel kaum noch Wärme übrig. Einen Beweis dafür bringt der Versuch, den Prof. Josse an dem Schmidt-Borsig-Kessel ausgeführt hat¹⁾. Danach nimmt das zweite Verdampfungsbündel nur 7,6% der gesamten Wärme auf. Die Abgasausnutzung

¹⁾ Z. V. d. I. 1926, S. 677.

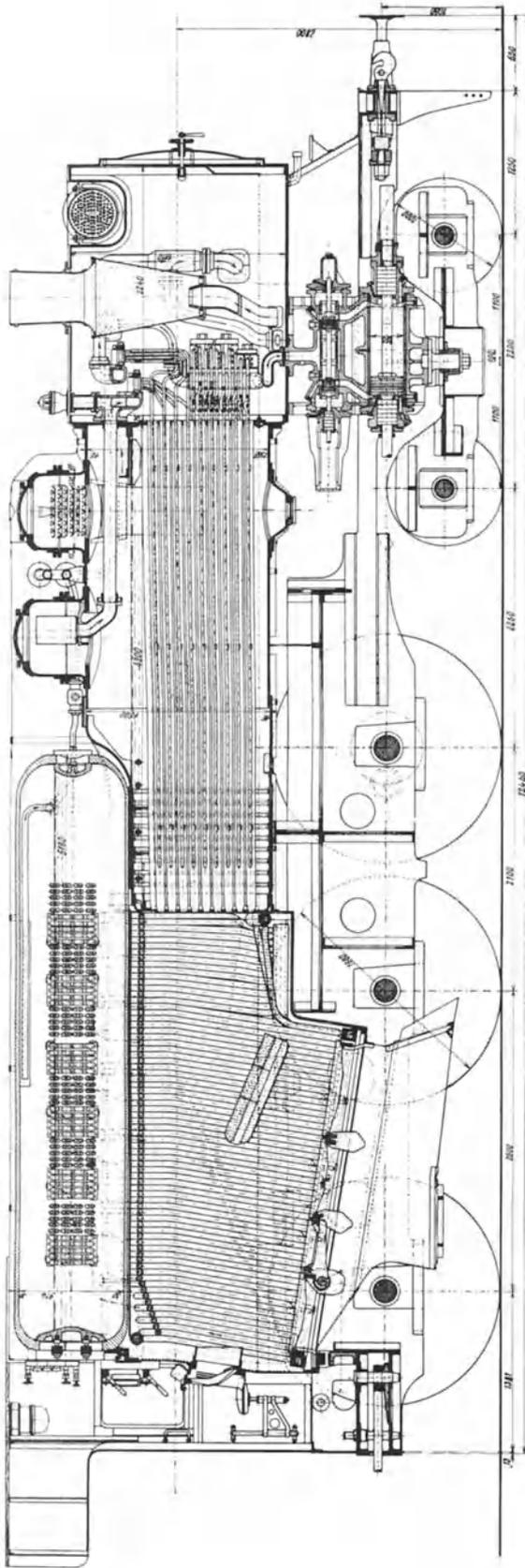


Abb. 12. Hochdrucklokomotive, Bauart Schmidtsche Heißdampf-Gesellschaft, Cassel.

erfolgt bei diesem Kessel in einem für 2 at genehmigten Niederdruckkessel. Ursprünglich wurde erwartet, daß noch etwas Dampf im Niederdruckkessel entstehen würde. Der Versuch hat aber gezeigt, daß bei einer Rostbelastung von 126 kg/qmh der Niederdruckkessel das Speisewasser für den Höchstdruckkessel nur knapp vorwärmen kann. Wenn der Niederdruckkessel für höheren Druck eingerichtet wäre, und das Speisewasser auf etwa 170° erwärmt werden könnte, hätte das zweite Verdampfungsbündel des Höchstdruckkessels ohne weiteres wegfallen können, ohne den Kesselwirkungsgrad nennenswert zu beeinflussen. Aus Furcht vor zu geringem Wasserinhalt des Höchstdruckkessels ist dieser Weg noch immer nicht im ortsfesten Kesselbau besprochen worden, während in der von Henschel & Sohn nach den Entwürfen meiner Firma gebauten Hochdrucklokomotive für die Reichsbahn-Gesellschaft (Abb. 12) im Hochdruckteil für 60 at Betriebsdruck diese Gedanken verwirklicht sind. So ist z. B. in der Feuerbüchse mit einer Dampferzeugung bis zu 300 kg/qmh gerechnet, ein Wert, der nach den bisherigen Verdampfungsversuchen zu urteilen, auch glatt erreicht werden wird.

An der Wahl zu großer Heizfläche und zu großem Wasserinhalt, die auf die Herstellungskosten von erheblichem Einfluß sind, sind schon sehr viele ernste Projekte gescheitert. Anfänglich wurde geglaubt, daß der Wasserinhalt eines Höchstdruckkessels das 1,5—2fache der Stundenleistung betragen müsse, um den praktisch vorkommenden Betriebsschwankungen genügen zu können. Das ist aber durchaus nicht notwendig, denn die im Kesselinhalt vorhandene Wärme ist bei Höchstdruckkesseln erheblich größer als bei solchen von niederem Druck; sie darf bei Feststellung der Speicherwirkung nicht vernachlässigt werden. Die Speicherfähigkeit liegt bei einem Höchstdruckkessel außerdem zum größten Teil im Speiseraum; daher empfiehlt es sich, diesen so groß als möglich auszuführen. Wenn die Kesseltrömmeln dem Einfluß der Heizgase entzogen sind, so kann auch schon bei kleinen Trömmeldurchmessern der Wasserspiegel erheblich abgesenkt werden. Werden diese Gesichtspunkte berücksichtigt, so zeigt sich, daß der Wasserinhalt eines Höchstdruckkessels für z. B. 60 at Betriebsdruck nahezu nur etwa halb so groß sein muß als der eines Kessels für 15 at. Damit ist aber eine recht erhebliche Verbilligung der Herstellungskosten verknüpft. Man muß sich allerdings darüber klar sein, daß bei einem solchen Kessel die Frage der Reinigung des Speisewassers und ein eindeutig

gesicherter Wasserumlauf bei den hochbelasteten Heizflächen noch eine größere Rolle spielt als bei Höchstdruckkesseln mit üblichem Wasserinhalt; sonst könnten sehr un-

angenehme Rohrschäden auftreten. In Abb. 13 zeige ich einen Einbündel-Höchstdruckkessel, der nach den vorstehend skizzierten Richtlinien entworfen ist.

Im vorstehenden habe ich die Betriebsbedingungen und die Vorbedingungen für den Bau eines betriebssicheren Höchstdruckkessels der Wasserrohrkesselbauart erörtert, und zwar habe ich mich nur auf den Steilrohrkessel beschränkt, denn ich halte andere Wasserrohrkessel infolge ihrer vielen Rohrverschlüsse und der geraden Wasserrohre für Höchstdruckdampfbetrieb nicht sehr geeignet, wenn auch schon die Kessel für Langerbrugge, sowie der Kessel der Weymouth-Kraftanlage in Boston in einer solchen Bauart ausgeführt sind. Nach Mitteilung eines amerikanischen Geschäftsfreundes soll der Kessel für 84 at Betriebsdruck in Boston gewisse Schwierigkeiten machen. Leider konnte ich Einzelheiten darüber nicht erfahren.

Von jeher waren die Bestrebungen darauf gerichtet, zur Erhöhung der Betriebssicherheit die Höchstdruckkessel mit möglichst geringem Wasserinhalt zu bauen. So haben alle Erfinder, die sich mit diesem Problem beschäftigten, angefangen. Auch mein hochverehrter, leider zu früh verstorbener Chef, Dr.-Ing. e. h. Wilhelm Schmidt, fing in seinen Jugendjahren so an, indem er einen Schlangenkessel bauen ließ, dem nur so viel Wasser zugeführt wurde, als verdampfte. Später als er im Jahre 1907 das Hochdruckproblem erneut aufgriff, kam er wieder auf seine ersten Ideen zurück. Näheres über den ersten Schmidtschen Höchst-Druck-Schlangenkessel aus den Jahren 1885/86 für 60 bis 100 at habe ich bereits auf der Hochdrucktagung des Vereins deutscher Ingenieure im Jahre 1924 berichtet und daher möchte ich nur auf das im V. d. I.-Verlag erschienene Sonderheft 1924 „Hochdruckdampf“ hinweisen, in welchem diese erste Anlage von mir beschrieben ist. In den Jahren 1907—1910

wurden zugleich mit dem ersten Kessel der Steilrohrbauart Entwürfe von Schlangenkesseln bearbeitet. Zum Studium der Verdampfungsvorgänge wurde zuerst ein in einem durch Gasflammen erhitzten Ölbad liegender Schlangenkessel nach Abb. 14 und 15 im Jahre 1913 gebaut, der aus zwei konzentrisch zueinander liegenden Rohrschlangen bestand, zwischen denen der Verbrennungsraum eingeschlossen war. Die Feuerung war eine Koksschüttfeuer. Die obere Rohrschlange bildete den Vorwärmer für das Speisewasser. Ich will auf die Einzelheiten dieses Kessels nicht weiter eingehen, sondern nur etwas über die Versuchsergebnisse berichten. Dampftemperatur und Dampfdruck dieses Kessels schwanken sehr stark. In Abb. 16 zeige ich eine Aufzeichnung über Druck und Temperatur des erzeugten Dampfes. Besonders schwierig war es, das Speisewasser auf die beiden parallel geschalteten Rohrschlangen zu verteilen. Der Kessel spuckte selbst bei höchster Überhitzung öfters Wasser. Die Erscheinung läßt sich vielleicht dadurch erklären, daß das in kleinen Mengen eingeführte Speisewasser nicht sofort verdampfte, sondern daß sich erst ein größerer Wassertropfen bildete, der mit der hoherhitzten, unter Umständen glühenden Rohrwand in Berührung kam und den Leidenfrostischen Zustand hervorbrachte, wodurch eine weitere Verzögerung der Verdampfung eintrat. Schließlich wurde die zusammen-

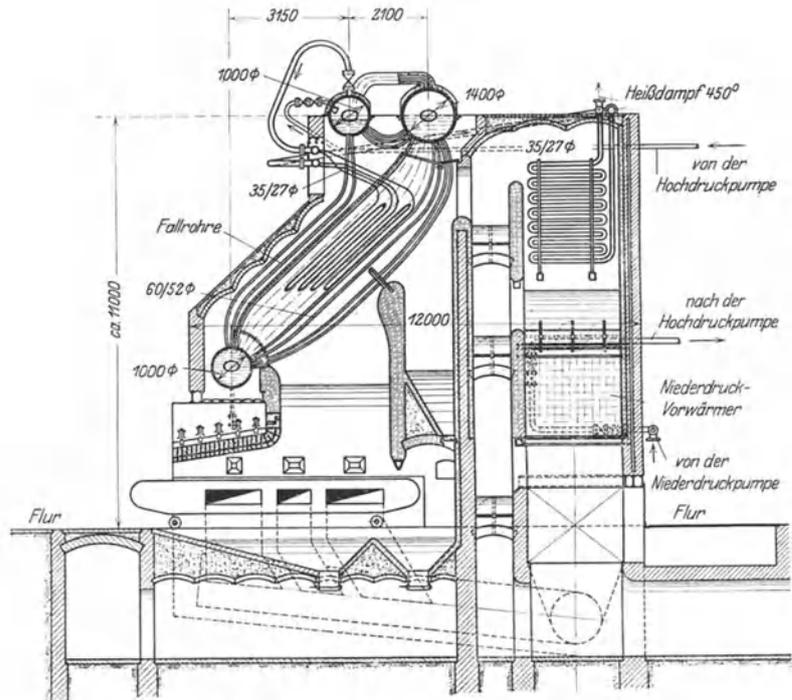


Abb. 13. Einbündel-Höchstdruckkessel.

Heizfläche des Kessels	720 qm
.. des Vor-Überhitzers	165 ..
.. des Nach-Überhitzers	570 ..
.. des Wasser-Vorwärmers	1140 ..
Rostfläche	40 ..
Druck	60 at
Dampfmenge, normal	42500 kg/Std.
.. maximal	48000 ..
Wasserinhalt des Kessels	30 cbm
Kesselgrundfläche 12 m × 10,3 m	123,6 qm

gebaltte Wassermasse aus den den Verdampfer bildenden Rohrschlangen nach dem Überhitzer-
teil übergerissen und fein zerstäubt, wo sie schnell an den verhältnismäßig großen, stark

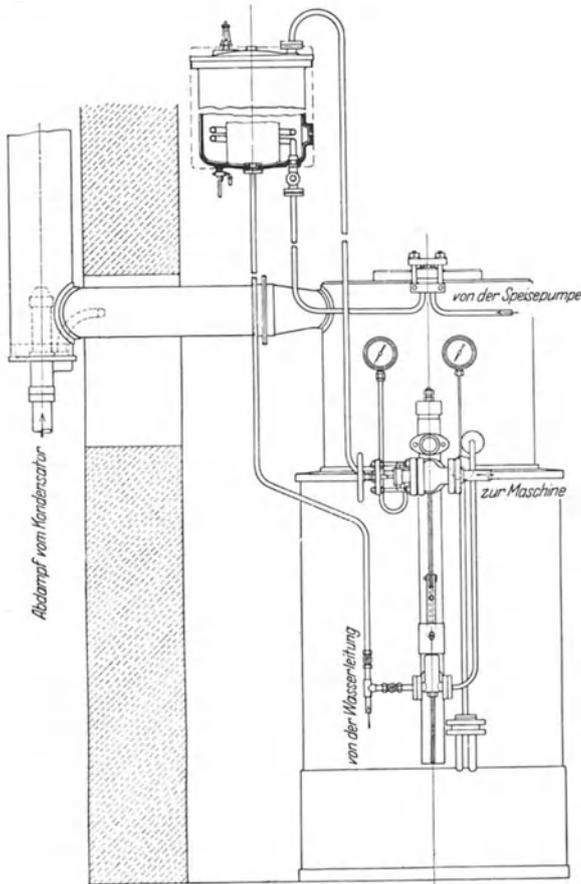


Abb. 14.

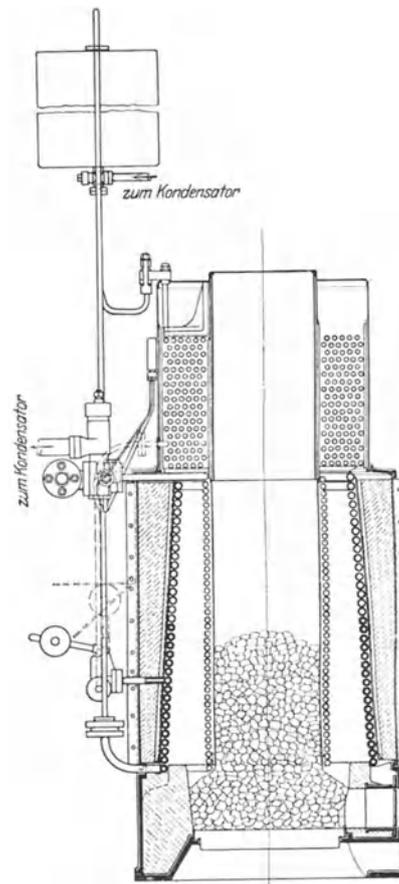


Abb. 15.

Schlangenkessel, Bauart W. Schmidt, aus dem Jahre 1913.

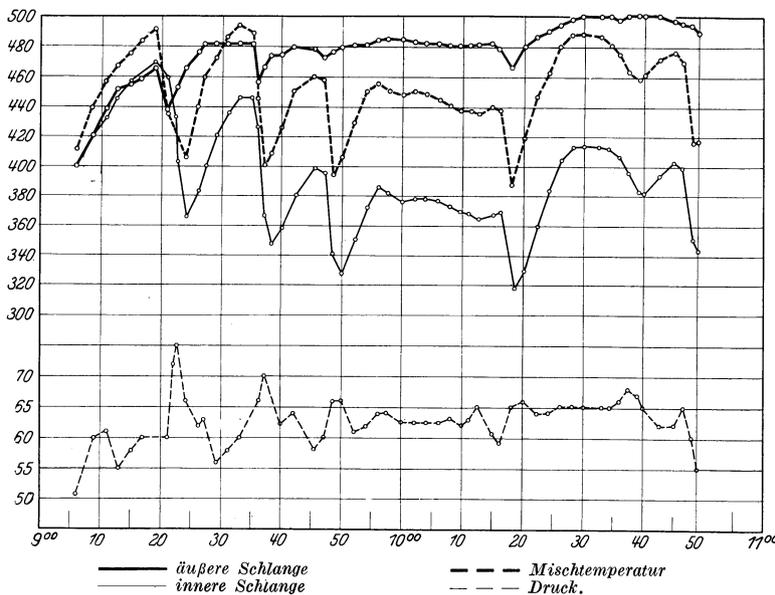


Abb. 16. Druck- und Temperaturschwankungen im Schmidtschen Schlangenkessel aus dem Jahre 1913.

Verdampfung 280 kg/Std.
20. 3. 1914 Drosselöffnung der äußeren Schlange 3 mm,
20. 3. 1914 Drosselöffnung der inneren Schlange 8 mm.

erhitzten Heizflächen verdampfte. Diese Arbeitsweise äußerte sich in einem plötzlichen Ansteigen des Druckes bei gleichzeitigem Abfall der Überhitzungstemperatur. Hiergegen half weder eine feine Zerstäubung des eingeführten Speisewassers, noch eine Erhöhung der Turbulenz durch Drahtspiralen oder Schraubengänge.

Die Versuche wurden bei Beginn des Krieges eingestellt, da man eingesehen hatte, daß auf diese Weise kaum ein größerer für den Betrieb geeigneter Kessel zu schaffen sei.

Der nächste Höchst-
druckkessel, der von den
üblichen Bauarten abwich und
der Öffentlichkeit bekannt ge-
geben wurde, ist der Atmos-
kessel. Die Wirkungsweise
dieses Kessels ist ja aus der
Literatur zur Genüge bekannt,

so daß ich nicht weiter darauf einzugehen brauche. In Deutschland hat die Sudenburger Maschinenfabrik das Alleinausführungsrecht für diesen Dampferzeuger erworben. Sie selbst hat eine Kesselanlage für Vorführungszwecke gebaut, die aus zwei umlaufenden Rohren von 305 mm Durchmesser und 3400 mm feuerberührter Länge mit einer Heizfläche von 6,51 qm besteht. Nach Angabe der Erbauerin sind alle Gerüchte über die Notwendigkeit, daß der Kessel sehr reines Speisewasser brauche, und daß die Dichtung der Stopfbüchsen Schwierigkeiten mache, unbegründet. Die Anlage der Sudenburger Maschinenfabrik ist vom Halberstädter Dampfkesselüberwachungsverein untersucht worden. Der Versuchsbericht liegt mir vor. Diesem entnahm ich folgendes: Der Kessel besteht aus den den Verdampfer bildenden Umlaufrohren und zwei hintereinander geschalteten schmiedeeisernen Vorwärmern, die mit aufgeschweißten Spiralrippen versehen sind und insgesamt 68,7 qm Heizfläche besitzen. Der Überhitzer hat eine Heizfläche von 4,9 qm. Der höchstzulässige Dampfdruck ist 110 atü. Das Wasser durchfließt erst den unteren Vorwärmer, alsdann den oberen Vorwärmer und mündet in einen kleinen Zwischenbehälter. Ein Teil des Wassers verdampft bereits in dem oberen Vorwärmer, so daß in den Zwischenbehälter ein Dampf-Wassergemisch einmündet. Der Dampf wird aus diesem Zwischenbehälter abgezogen und sofort dem Überhitzer zugeführt, während das restliche Wasser nach den Umlaufrohren fließt. Die Umlaufrohre besitzen zwei voneinander unabhängige Antriebsvorrichtungen, die eine ist ein Elektromotor, die andere eine kleine Dampfturbine; außerdem können die Motore beim Anheizen von Hand betrieben werden. Der Kessel ist mit Ölfeuerung ausgerüstet. Der Verdampfungsversuch ergab stündlich eine Verdampfung von 2715,5 kg mit einem Druck von 95,0 atü bei einer mittleren Dampftemperatur von 405°. Der Kesselwirkungsgrad betrug 75,87%. Während des siebenstündigen Versuchs arbeitete der Kessel und die Speisung völlig einwandfrei. Der Wärmeübergang in den Umlaufrohren betrug auf den Quadratmeter Heizfläche 111 200 k/cal-h. Bisher ist dieser Kessel infolge der schlechten wirtschaftlichen Verhältnisse noch nicht im Dauerbetrieb gewesen. Jedoch behauptet die Erbauerin, daß die Betriebssicherheit dieser Bauart an den für die Carnegie-Zuckerraffinerie erbauten Kesselanlagen erbracht sei. Wie sich der Atmoskessel bei Belastungsschwankungen verhält, ist bei dem Versuch leider nicht festgestellt worden. Seit mehreren Wochen soll jetzt ein Atmoskessel mit vier Rotoren in der Zellstoffabrik Forß mit bestem Erfolg im Dauerbetrieb sein.

Im Jahre 1923 wurde die eigenartige Arbeitsweise des Benson-Dampferzeugers veröffentlicht. Bekanntlich soll sich bei diesem die Verdampfung beim kritischen Druck ohne Aufkochen vollziehen, so daß keine Wassersammler bzw. Wasserabscheider erforderlich werden. Die ersten Versuche mit diesem Verfahren wurden in Rugby in England gemacht, die späteren jedoch bei den Siemens-Schuckert-Werken in Berlin fortgeführt. Beide im Versuchsbetriebe gewesenen Dampferzeuger, über deren Konstruktion noch nichts Näheres bekannt geworden ist, sollen bisher zusammen etwa 3500 Betriebsstunden aufweisen. Die Benson-Kesselanlage bei den Siemens-Schuckert-Werken ist ebenso wie die zugehörige 1000-KW-Turbine von der Firma Escher Wyss & Cie. in Zürich als Vorschaltanlage ausgeführt. Über die Betriebssicherheit und die Erfahrungen mit der Benson-Anlage ist auch noch sehr wenig in die Öffentlichkeit gedrungen. Die stündliche Dampfleistung beträgt etwa 10 000 kg. Aus den mir gemachten Mitteilungen geht hervor, daß der Kessel aus drei parallel geschalteten Rohrsystemen besteht. Zur Überwachung des Kesselbetriebes dienen an den Rohrschlangen angebrachte Thermoelemente sowie ein Drosselwassermesser. Wasserstandsanzeiger sind nicht vorhanden. Anfänglich sind Schwierigkeiten mit den Flanschdichtungen zu überwinden gewesen; jetzt sollen diese überwunden sein.

Der dritte in letzter Zeit bekannt gewordene Dampferzeuger für Höchstdruckdampf ist von Prof. Löffler konstruiert. Er steht in der Wiener Lokomotivfabrik in Wien-Floridsdorf. Seine Wirkungsweise darf ich wohl ebenfalls als bekannt voraussetzen. Daher will ich für Uneingeweihte nur ganz kurz folgendes erwähnen. Löffler saugt nassen Dampf mit einer Umlaufpumpe an, drückt ihn durch einen unmittelbar befeuerten Überhitzer, wo er sich hoch überhitzt und bläst dann den hochüberhitzten Dampf in das zu verdampfende Kesselwasser ein. Der erste Löffler-Kessel liefert stündlich 300 kg Dampf bei einem Dampfdruck von 100—120 at. Über die Bewährung dieses Kessels schreibt mir die Wiener Lokomotivfabrik, daß der Kessel alle Erwartungen erfüllt habe. Die Dampfumwälzpumpe hätte während der ganzen Betriebszeit kein einziges Mal Anlaß zu einem Betriebsstillstand gegeben. Auch der Überhitzer, welcher der stärksten Feuerbeheizung ausgesetzt sei, hätte sich vollkommen bewährt. Im Innern der Überhitzerrohre hätten sich keinerlei Verkrustungen gezeigt. Die Kühlwirkung des strömenden Hochdruckdampfes erreiche diejenige von Wasser. Das zum Betriebe des Kessels verwendete Wasser sei nur nach dem Kalk-Sodaverfahren gereinigt und der entstehende Kesselstein bleibe als Schlamm in der Kesseltrommel, von wo er leicht abgeschlämmt werden könne. Auf Grund dieser günstigen Erfahrungen habe die Wiener Lokomotivfabrik eine größere Kesselanlage für 7500 kg, 120 at und 480° Frisch-

dampf-temperatur in Arbeit genommen. Man hofft noch in diesem Jahre damit in Betrieb zu kommen.

Es hieß ferner schon vor längerer Zeit, daß die Witkowitz Bergbau- und Eisenhütten-Gewerkschaft eine Löffler-Kesselanlage für 18000 KW für 100 at und 450° Frischdampf-temperatur im Bau habe. Auf meine diesbezügliche Anfrage wurde mir von dieser Firma mitgeteilt, daß mit der Montage in den nächsten Tagen begonnen werden würde, und daß mit der Inbetriebnahme zu Beginn des nächsten Jahres gerechnet werde. Diese Hochdruckdampf-erzeuger erhalten Kohlenstaubfeuerung bei Verwendung hoher Luftvorwärmung und zur Her- absetzung der Feuerraumtemperatur werden den Verbrennungsprodukten Abgase beigemischt.

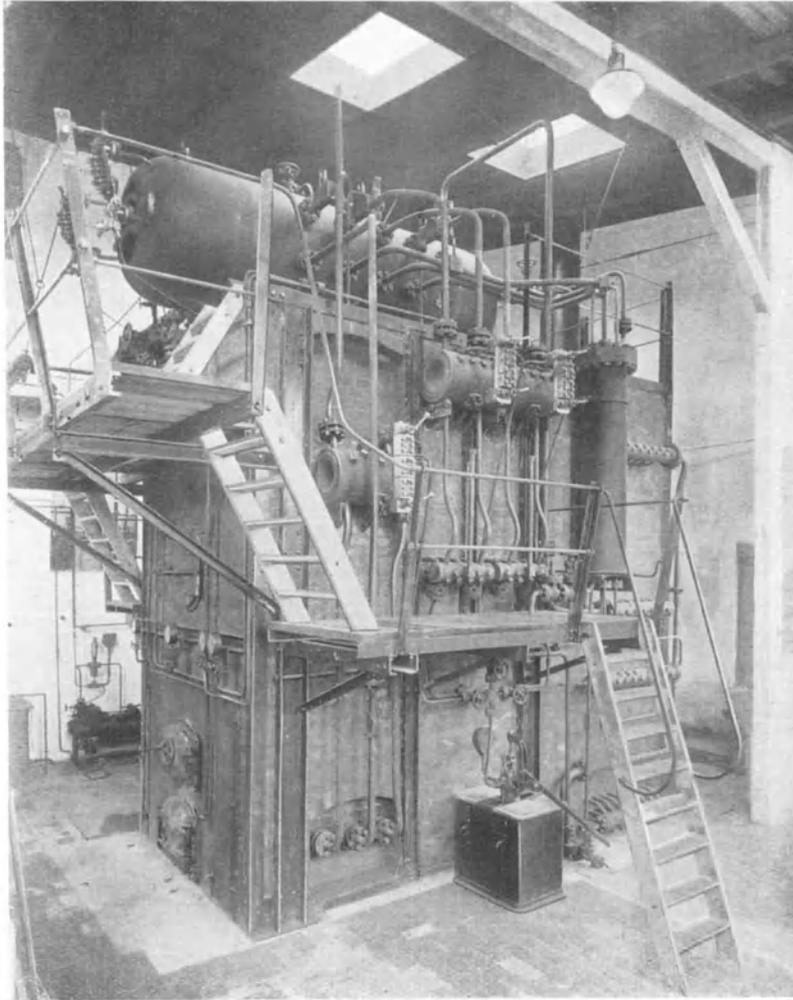


Abb. 17. S.H.G.-Höchstdrucksicherheitskessel der Schmidt'schen Heißdampfgesellschaft.

Das Speisewasser wird durch Turbinenanzapfdampf und in Rauchgasvorwärmern bis nahe auf Siedetemperatur vorgewärmt. Der geringe Platzbedarf dieser Anlage wurde hervorgehoben, leider wurden aber keine weiteren, eine Beurteilung zulassende Angaben gemacht.

Als vierten der zur Zeit in Betrieb befindlichen Höchstdruckdampf-erzeuger, die von einem Wasserrohr- kessel abweichen, nenne ich den mittelbar beheizten

S.H.G.-Höchstdruck- sicherheitskessel für 60 at Betriebsdruck in der Wernigeroder Versuchs- anstalt meiner Firma, der am 9. Februar dieses Jahres in Betrieb gesetzt wurde und, wie ich beson- ders betonen möchte, sofort, nachdem er in zwei Stunden auf 60 atü Dampfdruck aufgeheizt war, seine volle

Dampfmenge hergeben konnte. Abb. 17 zeigt eine Photographie, Abb. 18 und 19 Schnitte durch diesen Versuchskessel. Ich bitte, bei kritischer Betrachtung der Zeichnung zu berücksichtigen, daß diese Ausfüh- rung noch keine vollkom- mene Lösung dieses Kessel- systems zeigt. Mit diesem

Kessel sollen nämlich verschiedene Versuche durchgeführt werden, so sollen z. B. an dem nicht zu dieser Bauart gehörigen Rohrbündel I, das als Feuerbüchse ausgebildet ist, Wasser- umlaufs- und Verdampfungsstudien vorgenommen werden. Mit ähnlichen Rohrsystemen könnten z. B. auch die Feuerräume von Staubkohlenfeuerungen ausgekleidet oder Vorschalt- kessel gebaut werden. Der Versuchskessel besitzt eine Rostfläche von 1,5 qm; seine Verdamp- fungsleistung beträgt bis zu 1500 kg/h.

Die Wirkungsweise des neuen S. H. G.-Höchstdruck-Sicherheitskessels ist schon aus den V. d. I.-Nachrichten vom 17. März d. J. bekannt. Ich darf sie wohl aber nochmals kurz wiederholen. Ich bitte, die schematische Zeichnung (Abb. 20) zu betrachten.

Die Dampferzeugung erfolgt nicht unmittelbar, sondern mittelbar durch gesättigten Höchst- druckdampf, der bei seinem Umlauf seinen Aggregatzustand ändert. Die dem Feuer aus- gesetzten Teile sind enge Rohrschlangen, in welchen der als Heizmittel dienende Dampf aus destilliertem Wasser in zwei Stufen (Vorwärmung und Verdampfung) erzeugt wird. Dieser Heizdampf steigt zu Rohrgruppen h empor, die in der den Betriebsdampf abgebenden Kessel-

trommel *a* liegen, kondensiert dort, seine Verdampfungswärme an das Kesselwasser abgebend. Das Kondensat aus diesen Heizelementen kommt mit etwa 280° aus den Heizelementen, durchfließt die Rohrschlangen *i* des als Speisewasservorwärmer dienenden Wärmeaustausches *b* und kühlt sich dort am Speisewasser des Betriebskessels auf etwa $80\text{--}100^{\circ}$ ab. Durch eigenes Gewicht kommt es dann in die untere Sammelkammer des im zweiten Kesselzug liegenden Rauchgasvorwärmers *f*, in welchem es sich auf $200\text{--}230^{\circ}$ erhitzt, um dort nach dem Sammelbehälter *e* und der feuergasbeheizten Verdampferschlange *g* erneut aufzusteigen.

In der oberen Sammelkammer *d* trennen sich Wasser und Dampf. Das Wasser fällt wieder durch die Fallrohre *k* nach der unteren Sammelkammer *e* zurück. Es findet also in dem Rohrschlängensystem *g* nicht nur eine einfache Verdampfung, sondern ein lebhafter, selbsttätiger Umlauf statt, wodurch eine ausreichende Kühlung dieser Verdampfungsschlangen erzielt wird. Das Speisewasser wird unten in den Wärmeaustauscher *b* kalt eingepumpt und tritt oben aus dem Apparat auf 220° und mehr vorgewärmt in die den Betriebsdampf erzeugende Trommel.

Jede Rohrgruppe ist ein kleiner, in sich abgeschlossener Kessel. Die Zwischenbehälter *d* sind sehr wichtig; wären sie nicht vorhanden, so würde viel Wasser nach den Heizelementen *h* mitgerissen werden und dort den Wärmeübergang verschlechtern. Außerdem würde auch mehr heißes, mitgerissenes Wasser durch die Heizschlangen *i* des Wärmeaustauschers *b* fließen, das sich dann am Speisewasser nicht genügend abkühlen könnte und eine weitgehende Abkühlung der Feuergase verhindern würde.

Der gesättigte Betriebsdampf von 60 at wird der Trommel *a* entnommen und dann durch den Überhitzer *c* geschickt und dort hoch überhitzt. Die Höhe der Überhitzung läßt sich regeln, und zwar durch eine Klappe in Verbindung mit einem Leerzug. Beim Anheizen und im Betrieb kann ein Teil der Feuergase, wenn nötig, direkt zum Vorwärmerteil geschickt werden.

In den Heizelementen herrscht ein Druck, der je nach der Kesselbelastung $5\text{--}20$ at und mehr höher ist als der Betriebsdruck. Das Innere aller Rohrschlangen kommt, wie schon gesagt,

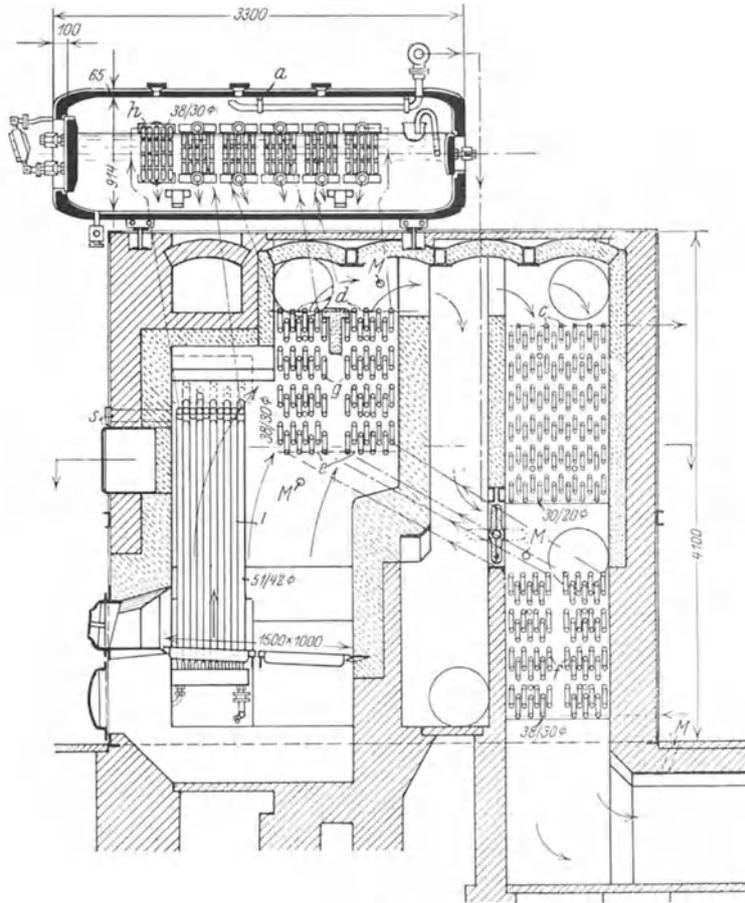


Abb. 18.

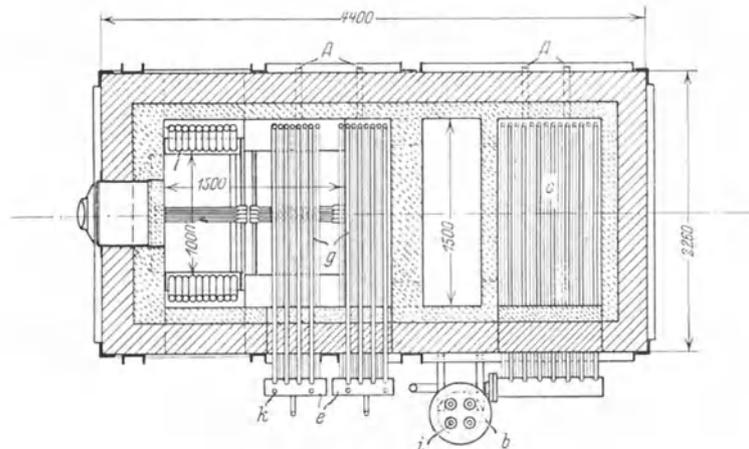


Abb. 19.

Abb. 18 u. 19. S.H.G.-Höchstdrucksicherheitskessel.

Beim Anheizen und im Betrieb kann ein Teil der Feuergase, wenn nötig, direkt zum Vorwärmerteil geschickt werden.

In den Heizelementen herrscht ein Druck, der je nach der Kesselbelastung $5\text{--}20$ at und mehr höher ist als der Betriebsdruck. Das Innere aller Rohrschlangen kommt, wie schon gesagt,

mit unreinem Speisewasser niemals in Berührung und kann daher nicht verschmutzen. Ferner ist der Kessel in einzelne, vollständig getrennte, parallele Heizsysteme unterteilt, die nur ver-

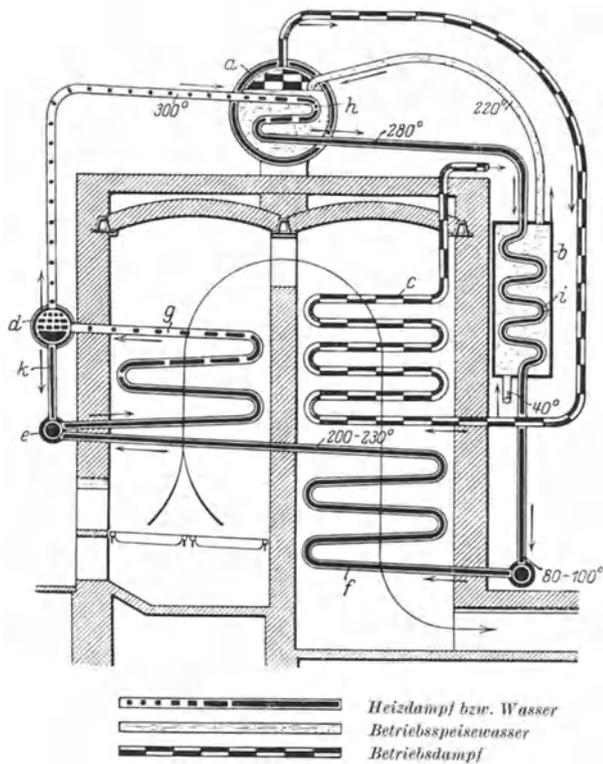


Abb. 20. Schema eines Höchstdrucksicherheitskessels, Bauart Schmidt'sche Heißdampfgesellschaft.

hältnismäßig wenig Wasser enthalten. Wenn also einmal eine beheizte Rohrschlange aufplatzt, so wird nur eine geringe Wassermenge frei, und verheerende Wirkungen können dadurch nicht entstehen.

Im Gegensatz zu anderen Kesseln liegen sämtliche Dichtstellen außerhalb des Feuers. Undichtheiten, die an irgendeiner Stelle auftreten, machen sich sofort bemerkbar. Weiter ist die den Dampf abgebende Trommel von großer Wandstärke vollständig dem Einfluß der Heizgase entzogen. Die vielfach befürchteten ungünstigen durch Wärmespannungen entstehenden Beanspruchungen sind auf diese Weise ganz vermieden. Überhaupt ist bei der Trommel darauf gesehen, daß keinerlei zusätzliche Beanspruchungen vorkommen, die durch Bearbeitungsvorgänge entstehen und Alterungserscheinungen hervorrufen können. Alle Anschlüsse sind daher verschraubt und nicht gewalzt. Kesselstein, der im Speisewasser enthalten ist, setzt sich nur auf der äußeren Fläche der Rohrschlangen *i* in dem als Speisewasservorwärmer dienenden Wärmeaustauscher *b* ab. Sowohl die Rohrschlangen im Wärmeaustauschapparat wie auch die Heizelemente in der Trommel können leicht ausgebaut und gereinigt werden. Die Schlangen im Austauschapparat sind verzinkt und mit einem Rostschutzanstrich versehen, so daß keinerlei

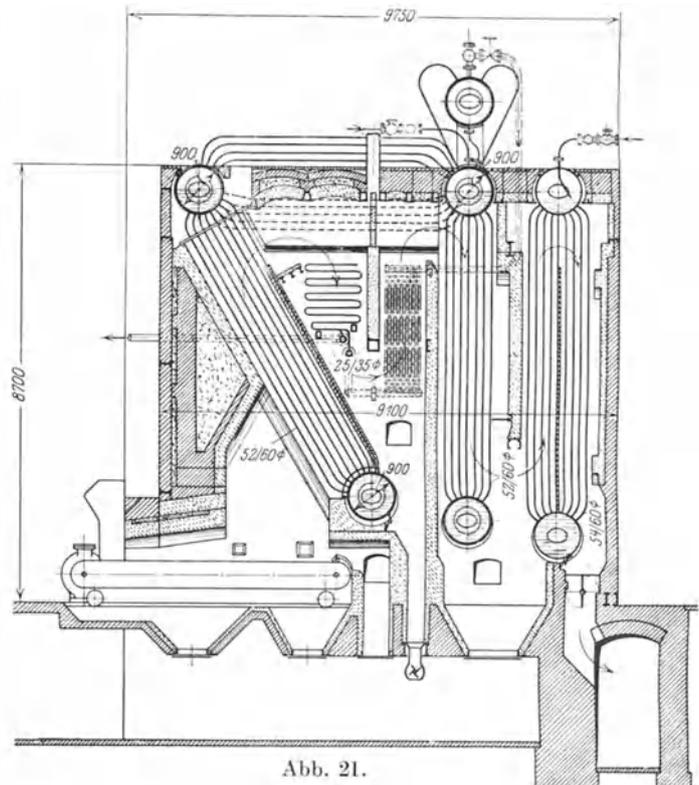


Abb. 21.

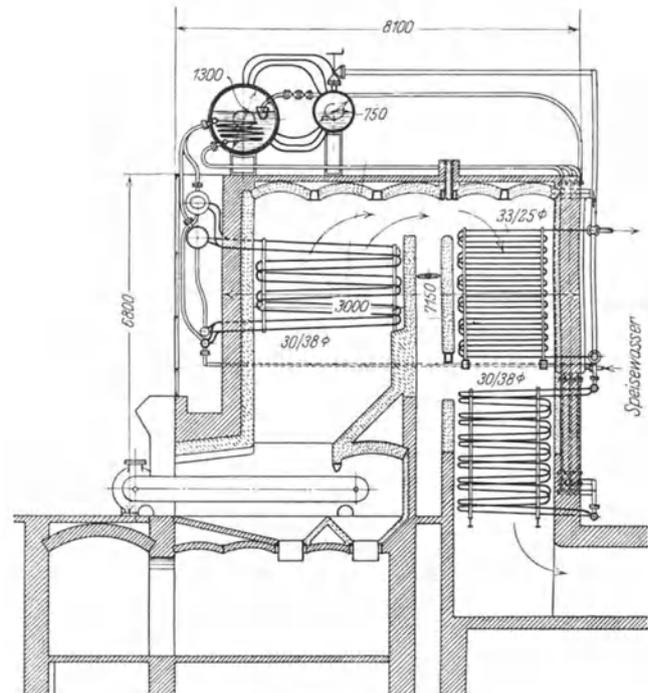


Abb. 22.

Abb. 21 u. 22. Vergleich des Schmidt-Borsigschen Steilrohrkessels mit einem S. H. G.-Höchstdrucksicherheitskessel.

Die Schlangen im Austauschapparat sind verzinkt und mit einem Rostschutzanstrich versehen, so daß keinerlei

Korrosionen an ihnen auftreten können. Der Kessel ist also ausgezeichnet für unaufbereitetes kesselsteinhaltiges Speisewasser geeignet. Die Heizfläche für die mittelbare Beheizung ist durchaus nicht groß. Der Wärmeübergang auf dieser Heizfläche ist für 1° Temperaturdifferenz 4000 kcal h/qm. Daher lassen sich mit zulässigen Druckdifferenzen mit 1 qm Heizfläche etwa 200 kg Dampf in der Stunde erzeugen.

Eine gute Eigenschaft des neuen Kessels gegenüber anderen Höchstdruckkesselbauarten ist, daß der größte Teil des Betriebswasservorrates im Speiseraum liegt, also für Spitzenleistungen nutzbar gemacht werden kann. Ferner wirkt der gesamte Heizwasserinhalt und die Materialwärme aller wasser- und dampfführenden Teile auf die Speicherkapazität des Kessels ganz selbsttätig ein. Wird die Speiseraumwirkung durch Abstellen der Speisung zur Überwindung einer Belastungsspitze nutzbar gemacht, so tritt auch der Wasserinhalt der gesamten Speisewasservorwärmereinrichtungen mit in Tätigkeit.

Um das neue Kesselsystem mit einem Höchstdruck-Steilrohrkessel vergleichen zu können, sind der Schmidt-Borsig-Kessel und ein S. H. G.-Höchstdruck-Sicherheitskessel gleicher Rostgröße und gleicher Leistung für 60 at Betriebsdruck nebeneinander gezeichnet (Abb. 21 und 22). Vergleichen wir zunächst die Heizfläche in Zahlentafel 2. Der Schmidt-Borsig-Kessel besitzt 480 qm, der neue S. H. G.-Kessel 416 qm Gesamtheizfläche. Die Gewichte der wasser- und dampfführenden Teile ohne Überhitzer sind beim Schmidt-Borsig-Kessel 55000 kg, beim S. H. G.-Höchstdruck-Sicherheitskessel 43000 kg = 78% des ersteren. Der Wasserinhalt des Schmidt-Borsig-Kessels beträgt im Hochdruckteil, der nur für die Speicherwirkung in Betracht kommt —

denn zwischen Hochdruckkessel und Abhitzekegel ist eine Speisepumpe eingeschaltet — 10500 kg, beim S. H. G.-Kessel 8100 kg. Das für die Speicherkapazität in Betracht kommende Materialgewicht ist bei beiden Kesseln nahezu gleich. Das Material des S. H. G.-Kessels besitzt eine etwas höhere Temperatur, ebenso ein großer Teil des Heizwassers. Die Speicherkapazität bei gleicher Druckabsenkung ohne Ausnutzung des Speiseraums kann also als gleich hoch angenommen werden. Berücksichtigt man den Speiserauminhalt, so ist der S. H. G.-Kessel günstiger, denn bei diesem ist der Inhalt des Speiseraumes 3,1 cbm, beim Borsig-Kessel nur 1,8 cbm. Der Kesselwirkungsgrad wird ebenfalls gleich hoch sein. Der Platzbedarf und die Bauhöhe sind, wie aus der Zeichnung zu ersehen ist, beim S. H. G.-Höchstdruckkessel kleiner, daher sind auch die Kosten für das Kesselgerüst und das Kesselmauerwerk geringer. Der ummauerte Raum über Flur ist beim Schmidt-Borsig-Kessel 386 cbm, beim S. H. G.-Kessel nur 245 cbm, also nur 63,5% des ersteren. Die Zahl der Verbindungen und Walzstellen ist nur etwa halb so groß als bei einem Steilrohrkessel. Da die Rohrschlangen, Sammelgefäße usw. serienweise hergestellt werden können, so sind auch die Herstellungskosten niedrig. Ich bin der Ansicht, daß der neue Kessel billiger ist als ein Höchstdruckkessel nach Art eines Wasserrohrkessels.

Besonders ist noch der selbsttätige Wasserumlauf ohne Umlaufpumpe in den Heizschlangenelementen hervorzuheben. Die Umlaufpumpe wird durch den Wärmeaustauschapparat ersetzt, der das spezifische Gewicht des Heizkondensats erhöht und einen dauernd sichern Umlauf in der gewünschten Richtung hervorbringt. Die Bauart des Kessels erscheint infolge der

Zahlentafel 2.

Vergleich der Heizflächen, Gewichte, Wasserinhalte und Verbindungsstellen eines Schmidt-Borsig-Steilrohrkessels und eines S. H. G.-Höchstdruckkessels mit mittelbarer Beheizung für je 10000 kg stündliche Dampfleistung.

	Schmidt-Borsig-Steilrohrkessel	S. H. G.-Kessel mit mittelbarer Beheizung
Heizflächen:		
Verdampfer qm	—	50
Kessel qm	280	132
Vorwärmer qm	200	210
Kondensatrückkühler qm	—	24
Insgesamt qm	480	416
Gewicht der wasser- und dampfführenden Teile ohne Überhitzer:		
H.-D.-Teil kg	46000	—
Rauchgas-Vorwärmer kg	9000	—
Gesamtgewicht kg	55000	43000
Wasserinhalt:		
H.-D.-Teil kg	10500	—
Kesseltrommel kg	—	4800
Heizsystem ohne Vorwärmer . . kg	—	900
Vorwärmer kg	6500	2400
Gesamtgewicht kg	17000	8100
Anzahl der Einwalzstellen	1236	464
Anzahl der lösbaren Verbindungen . .	—	140
Rauminhalt der Einmauerung über Flur cbm		
	386	245
Rauminhalt des Speiseraums in Obertrommeln cbm		
	1,8	3,1

Besonders ist noch der selbsttätige Wasserumlauf ohne Umlaufpumpe in den Heizschlangenelementen hervorzuheben. Die Umlaufpumpe wird durch den Wärmeaustauschapparat ersetzt, der das spezifische Gewicht des Heizkondensats erhöht und einen dauernd sichern Umlauf in der gewünschten Richtung hervorbringt. Die Bauart des Kessels erscheint infolge der

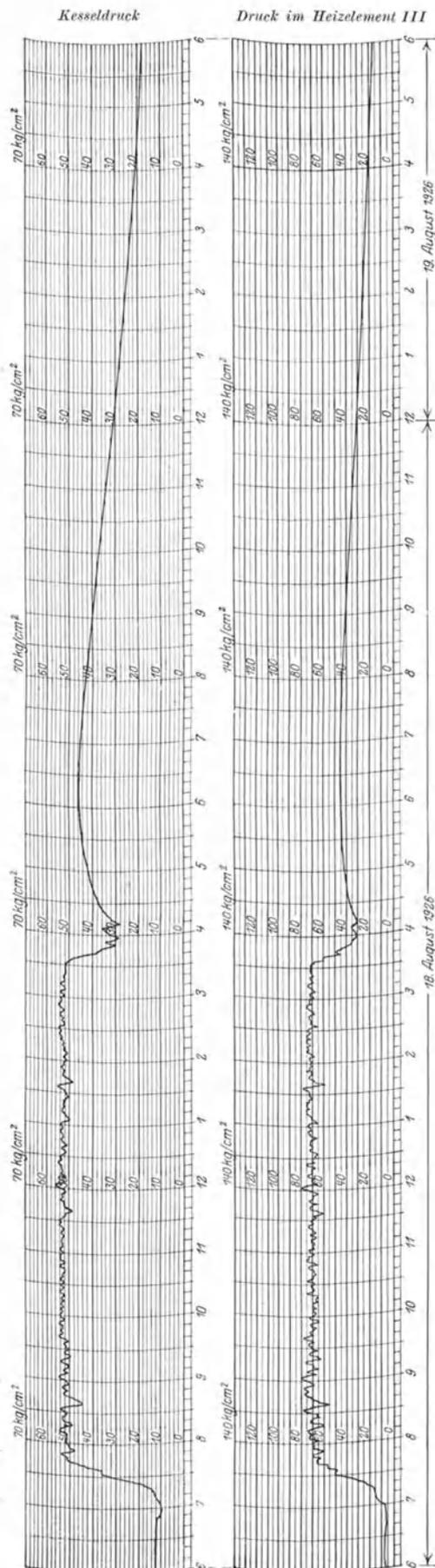


Abb. 23. Schreibmanometraufzeichnung des Kesseldruckes und eines Heizelementendruckes im S. H. G.-Sicherheitskessel in Wernigerode.

außen liegenden Sammelbehälter und Rohrverbindungen etwas verwickelt; jedoch lassen sich diese Teile gemeinschaftlich verkleiden und isolieren, so daß auch die Außenansicht eine ruhige Wirkung ergibt. Die in Frage kommenden Flanschverbindungen sind überdies durchaus ungefährlich. Es handelt sich ja durch die weitgehende Unterteilung in einzelne Systeme und dank dem hohen Druck nur um Rohre von geringer Lichtweite. Bei dem Versuchskessel sind in den kleinen, zur Wasserabscheidung dienenden Zwischenkesseln d Wasserstände angeordnet. Später bei einem normalen Betriebskessel dieser Bauart wird man sich mit anderen einfacheren Einrichtungen begnügen. Über die bisherigen Versuchsergebnisse des Versuchskessels möchte ich kurz folgendes berichten:

Die größte, bisher gemessene Verdampfungsleistung betrug 1483 kg/h bei 53 at mittlerem Druck und 460° Frischdampf Temperatur. Die Abgastemperatur war bei dieser Belastung noch etwa 375°. Die Vorwärmerheizfläche für das Heizkondensat ist nur $13 \times$ Rost, also für eine solche Belastung zu klein. Ferner wird die Wirkungsweise durch das in den Feuerraum eingebaute Feuerbüchselement I insofern verschlechtert, als das Heizmittel dieses Kreislaufes nicht zur Abkühlung der Feuergase benutzt wird. Für die weiteren Versuche wird der Vorwärmer vergrößert werden. Verdampfungsversuche mit 600 kg/h bzw. 1100 kg/h Dampfleistung ausgeführt, ergaben Kesselwirkungsgrade von 75 bzw. 73%. Auch hierbei wird die Abgastemperatur noch verhältnismäßig hoch. Diese niedrigen Wirkungsgradzahlen sind aber nicht für dieses Kesselsystem maßgebend, denn bei einem Kessel so kleiner Leistung ist die ausstrahlende Oberfläche des Mauerwerkes reichlich groß. Für größere Ausführungen lassen sich mit Sicherheit die gleichen Wirkungsgradzahlen erreichen als mit direkt wirkenden Kesseln.

Um festzustellen, wie sich der Kessel bei ungereinigtem Speisewasser verhält, ist bei den bisherigen Versuchen zur Speisung kaltes, unentlüftetes Wasserleitungswasser der Stadt Wernigerode a. H. verwendet worden. Dieses enthält im Liter 190,3 mg Kalziumoxyd (CaO), 37,0 mg Magnesiumoxyd (MgO), 25,2° Gesamthärte, 16,1° bleibende Härte und 9,1° Karbonathärte.

Der Kesselstein setzt sich hauptsächlich an dem durch das rückfließende Kondensat beheizten Speisewasservorwärmer ab, jedoch besitzt dieser Kesselstein nur eine geringe Härte. Er läßt sich leicht abklopfen bzw. durch eine Stahldrahtbürste abbürsten. Nach der eigentlichen Betriebskesseltrommel kommt der Kesselstein nur in Schlammform. Er kann dort bequem durch einen Wasserstrahl abgespült werden. Der abgezogene Kesselsteinschlamm ergibt nach der Trocknung ein ganz feines Pulver. Proben des Kesselsteins aus dem Speise-

wasservorwärmer, sowie des getrockneten Schlammes aus der Betriebstrommel zeige ich Ihnen hier.

Bei den Versuchen ist mittels Schreibmanometer der Dampfdruck im Betriebskessel und jeweils in einem Heizelement aufgezeichnet worden. Im vorliegenden Falle ist das dritte hinterste Heizelement an das Schreibmanometer angeschlossen. Aus der Abb. 23 ist zu erkennen, wie schnell sich die Druckschwankungen des Betriebskessels auf die Heizelemente bzw. die der Heizelemente auf den Kessel übertragen. Eine Verzögerung in der Wärmeübertragung ist kaum festzustellen. Der gesamte Wasserinhalt des Kessels beträgt 1900 kg und die Materialwärme entspricht noch etwa einem Wasserinhalt von 1300 kg. Die aufgespeicherte Gesamtwärme kommt also mehr als dem Doppelten der höchsten Dampfstundenleistung gleich. Trotzdem sieht man, welchen Einfluß schon geringe Änderungen in der Beheizung auf den Dampfdruck hervorrufen. Jedes Öffnen der Feuertür und das Aufwerfen frischer Kohle ergeben sofort einen Druckabfall, obgleich an den Betriebsverhältnissen nichts geändert wurde. Die Speisung erfolgte gleichmäßig und der Dampf wurde durch eine Drosselöffnung ins Freie abgeblasen. Aus den Druckaufzeichnungen ist auch das schnelle Anheizen des Kessels, sowie die allmähliche Abkühlung nach Aufstellung der Beheizung gut zu erkennen. Die Druckschwankungen sind übrigens keine Eigentümlichkeit des neuen Kessels, sondern sie treten auch bei Großwasserraumkesseln auf. In Abb. 24 sind die Druckschwankungen in einem Großwasserraumkessel mit rückkehrender Flamme eines Flußschleppdampfers auf der Donau für 7 at Kesseldruck anlässlich einer Probefahrt mit und ohne Propellersaugzug aufgezeichnet. Betrachtet man diese Erscheinungen, so muß man unbedingt zu der Auffassung kommen, daß

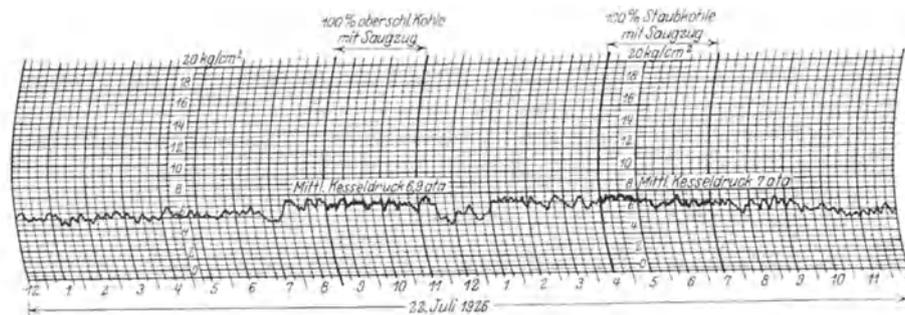


Abb. 24. Schreibmanometeraufzeichnung eines Großwasserraumkessels auf einem Flußschlepper.

ein Kessel mit einem ganz geringen Wasserinhalt, wie er von verschiedenen Seiten angestrebt wird, infolge seiner Empfindlichkeit für die Praxis nur ganz vereinzelt brauchbar sein wird. Die günstigen Eigenschaften des neuen S. H. G.-Höchst-Druck-Sicherheitskessels lassen sich kurz wie folgt zusammenfassen:

Ausführungsmöglichkeit für jeden Dampfdruck, Explosionssicherheit, Verwendung von Speisewasser jeder Art, keine Schwierigkeiten mit dem Rauchgasvorwärmer, Kesseltrommeln ohne Wärmespannungen, großer Speiseraum, selbsttätiger gesicherter Wasserumlauf, alle Dichtstellen außerhalb des Feuerraums, beliebige Ausbildung der Verdampfungsheizflächen, als auch Strahlungsheizflächen, bequeme Normalisierung, daher billiger Preis.

Um den Beweis zu liefern, daß das Kesselsystem für jede Größe ausführbar ist, ist in Abb. 25 bis 28 ein Kessel für eine Dampferzeugung von 28000 kg/h dargestellt. Für diesen Entwurf ist ein verhältnismäßig großer Wasserraum vorgesehen; daher sind drei Trommeln gewählt worden. Um die Verbindungsstellenzahl zu verringern, sind die Heizelemente in die Längsrichtung des Kessels gelegt. Dadurch wird erreicht, daß nur etwa $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ so viel Verbindungsstellen notwendig sind als bei einem Steilrohrkessel gleicher Leistung.

Der neue S. H. G.-Sicherheitskessel ist besonders dort am Platze, wo zur Erzielung größter Leistung aus einem bestimmten Dampfgewicht höchste Dampfspannungen benutzt werden und wo viel Zusatzspeisewasser notwendig ist, das ist in den mit Gegendruck arbeitenden Kraftbetrieben, in welchen viel Heizkondensat verloren geht.

Von erheblicher Bedeutung für die Betriebssicherheit der Höchstdruckkessel sind ferner die Armaturen. Bei allen Höchstdruckkesseln haben bisher die Wasserstände die meisten Schwierigkeiten gemacht. Das trifft sowohl für unsern ersten Versuchskessel aus dem Jahre 1910/11 als auch für den Schmidt-Borsig-Kessel zu. Ferner auch für die Versuche mit der Hochdrucklokomotive, sowie für die Kessel in Langerbrugge und den Kessel in der Weymouth-Kraftanlage.

Bei unsern Versuchen sind wir zu der Erkenntnis gekommen, daß die Wasserstandsgläser eine bestimmte Länge nicht überschreiten dürfen. Ist eine große Schaulänge erforderlich, dann

müssen mehrere Gläser in runder oder länglicher Ausführung übereinander angeordnet werden. Vor allen Dingen ist auch darauf zu achten, daß die Gehäuse vollständig steif sind und sich nicht etwa infolge einseitiger Beheizung verziehen. Außerdem müssen die Sitzflächen, sowie die Gläser genau eben sein, damit beim Anziehen in kaltem Zustande nicht schon

Biegungsbeanspruchungen hineinkommen. Um die Gläser schnell auswechseln zu können, und um ein gleichmäßiges Anpressen zu sichern, haben wir den Wasserstandsdeckelaufklappbar eingerichtet und die Anzugschrauben an einem doppelarmigen Hebel angelenkt. Abb. 29 zeigt unsern neuesten Wasserstand, der sich bisher ausgezeichnet bewährt hat. Von großer Bedeutung für die Haltbarkeit der

Wasserstandsgläser sind ferner die unter die Gläser gelegten Weichpackungen. Ist der Wasserstand sonst in Ordnung, so ist gewöhnlich von der Lebensdauer der Weichpackungen die Betriebszeit der Gläser abhängig.

Außer den unmittelbaren Wasserstandsanzeigern, bei denen damit gerechnet werden muß, daß die Gläser nach bestimmter Zeit zerstört werden, was meistens mit einem starken Geräusch verbunden ist, lassen sich Fernwasserstände mit mittelbarer

Wasserstandsanzeige ausbilden. Über das Prinzip eines solchen von Wilhelm Schmidt angegebenen Wasserstandes habe ich bereits in meinem Vortrag im Jahre 1921 hier an gleicher Stelle berichtet.

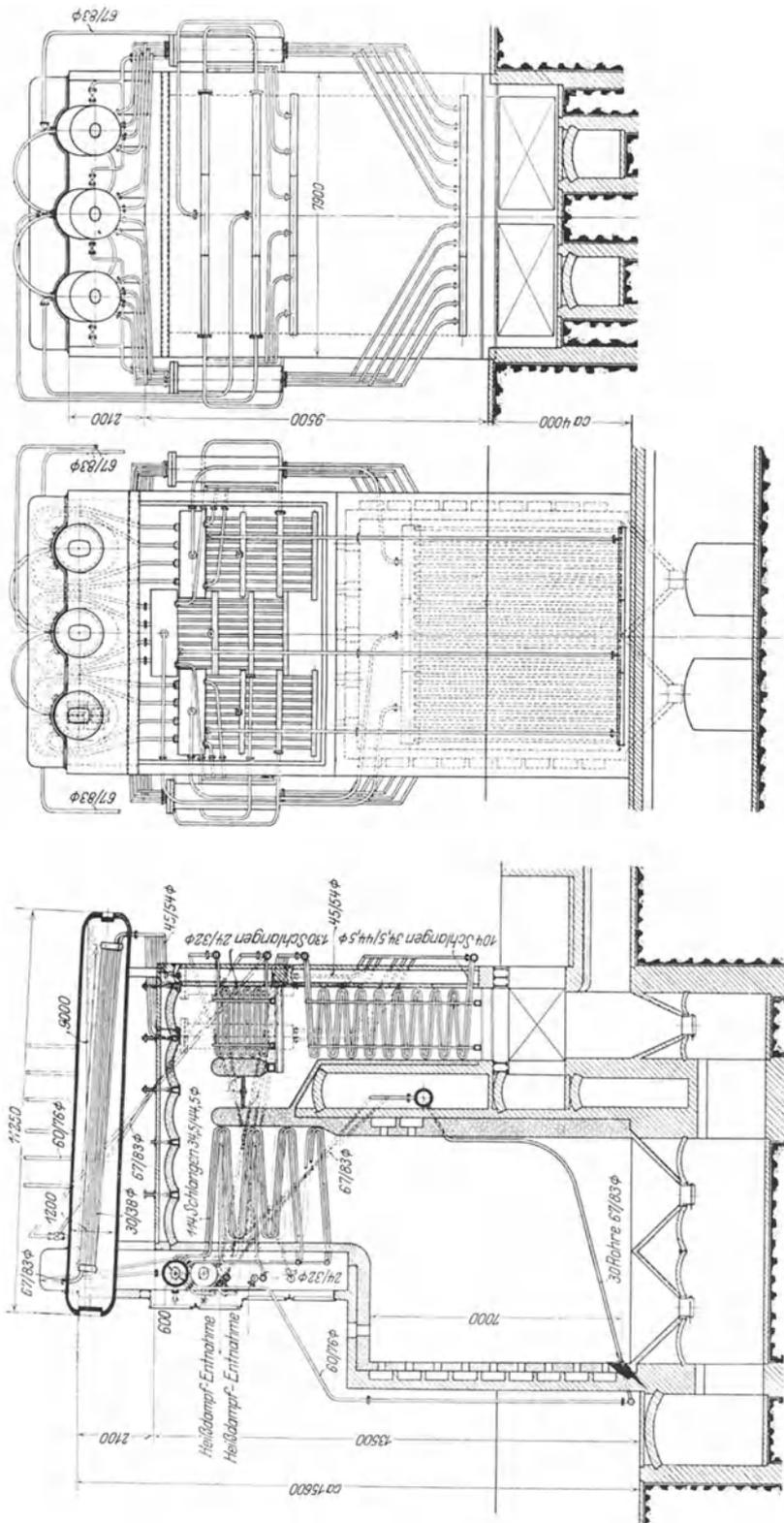


Abb. 25—27. S. H. G.-Höchst-Druck-Sicherheitskessel für eine Dampferzeugung von 28 000 kg/h mit Staubkohlenfeuerung für 100 at Betriebsdruck.

Wir haben einen derartigen Wasserstandsanzeiger ausgeführt und bei unsern Versuchen erprobt und dieser hat ohne jeden Anstand gearbeitet (Abb. 30). Sein Nachteil ist nur, daß die Wasserstandsänderungen bei Verwendung von Quecksilber im Verhältnis des spezifischen

Gewichts des Quecksilbers zum Wasser verkleinert dargestellt werden. Auf dem gleichen Grundgedanken beruht der Igamma Fernwasserstand der Firma J. G. Merckens A.G., Aachen. An Stelle des Quecksilbers wird bei diesem ein Halogenderivat der Grenzkohlenwasserstoffe der Fettsäurereihe verwendet, dessen spezifisches Gewicht etwas unter 2 liegt. Bei diesem Wasserstand wird erreicht, daß die Anzeige der Wasserstandsänderung im gleichen Maßstabe erfolgt wie die des Kesselwassers. In den Mitteilungen Ihrer Vereinigung vom 15. Mai dieses Jahres ist dieser Fernwasseranzeiger von Direktor Heinicke beschrieben, so daß ich mir ersparen kann, darauf näher einzugehen.

Ein weiterer mittelbar arbeitender Hochdruck-Wasser-

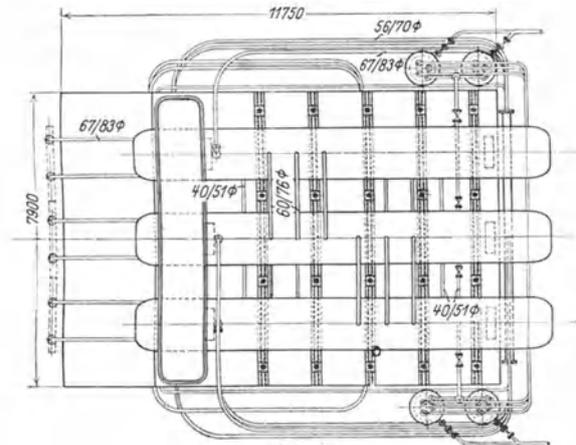


Abb. 28.

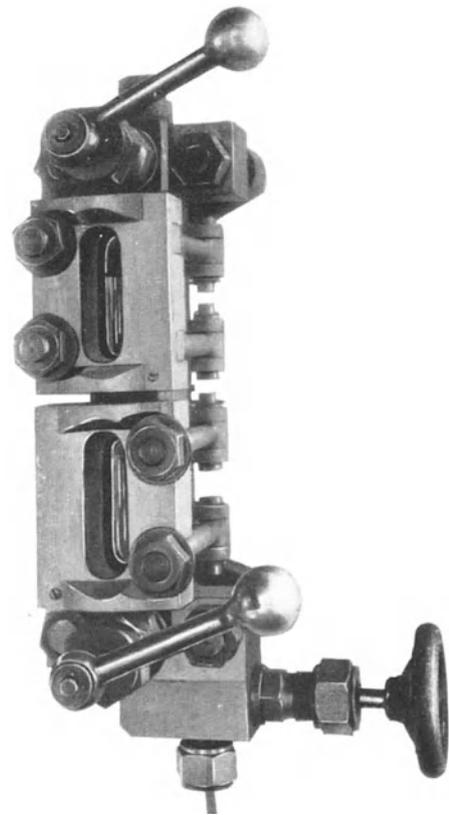


Abb. 29. S. H. G.-Höchstdruck-Wasserstandsanzeiger mit unterteiltem Schauglas.

standsanzeiger wird von der Firma Hübner & Meyer, Wien, ausgeführt (Abb. 31). Bei diesem sind ebenfalls Verbindungen mit dem Wasser- und Dampfraum des Kessels vorhanden. Der Unterschied der Wassersäule wird auf eine schwache Membrane übertragen, die mit einem Zeiger verbunden ist. Je nach der Höhe des Wasserstandes ändert sich die Stellung des

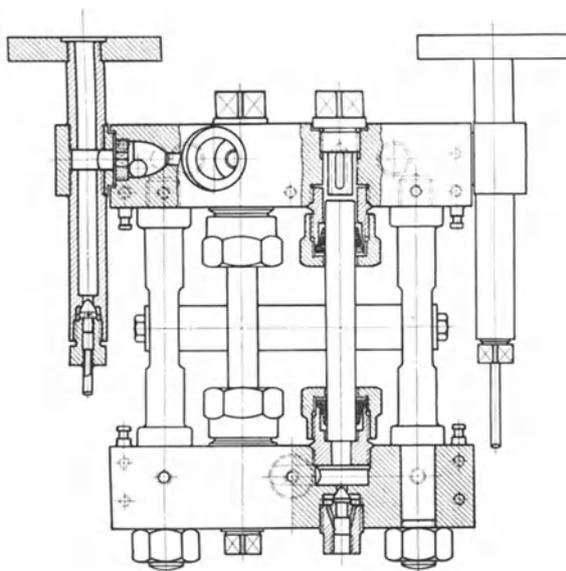


Abb. 30. Mittelbar arbeitender Wasserstandsanzeiger, Bauart W. Schmidt.

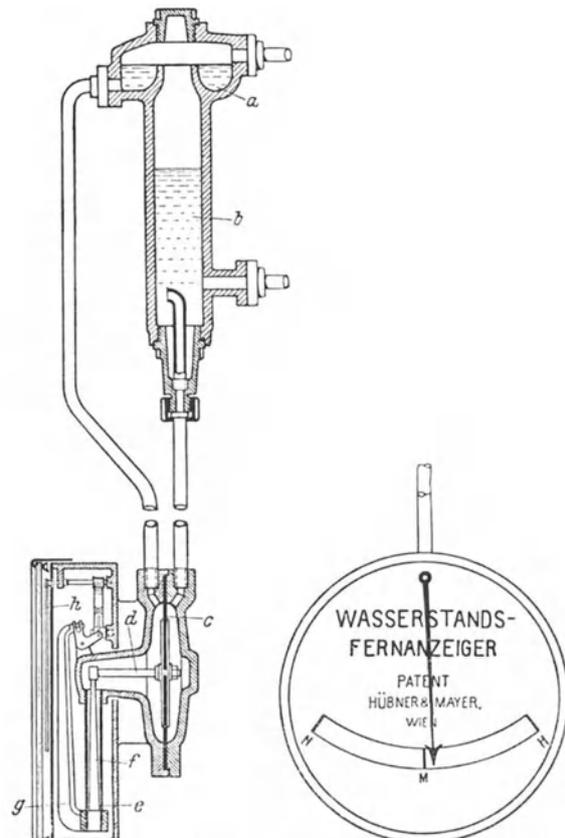


Abb. 31. Mittelbar wirkender Wasserstandsanzeiger von Hübner & Meyer, Wien.

Zeigers. Ein solcher Wasserstand ist am 110-at-Kessel der Firma Sulzer in Verwendung; er soll jetzt nach Überwindung anfänglicher Schwierigkeiten sicher arbeiten.

Zu welchem Ausweg schlechte Haltbarkeit der Wasserstandsgläser mitunter führt, dafür sind die Wasserstandsanzeiger der Babcock-Wilcox-Kessel in Langerbrugge der beste Beweis. Dort sind in die Wasserstandshahnköpfe an Stelle von Glasröhren Stahlrohre eingezogen, die mit vier feinen Bohrungen versehen sind. Strömt Wasser aus den Bohrungen aus, ist also genügend Wasser in den Kesseln, dann zeigen sich kleine weiße Nebelstrahlen. Sinkt der Wasserspiegel dagegen zu tief, so strömt Dampf aus. Der ausströmende Dampf überhitzt sich und der Dampfstrahl ist dann weniger sichtbar. Es ist dies zwar auch eine betriebsbrauchbare Lösung; als vollkommen kann sie aber nicht angesprochen werden.

Außer diesen mittelbaren Wasserstandsanzeigern sind bei diesen Kesseln noch mittelbar wirkende Wasserstände, Bauart Burnett-Brearley, ohne Gläser vorhanden, welche, als Wage ausgebildet, die Bewegung eines mehr oder weniger mit Wasser gefüllten Behälters mittels Hebeln vergrößert.

Sachverständige in den Vereinigten Staaten von Amerika, die mit dem 84-at-Kessel in Boston zu tun haben, behaupten, daß bei Höchstdruckdampf die Gläser überhaupt nicht zu halten sind, wenn sie mit dem Dampf und Wasser unmittelbar in Berührung kommen. Daher schützen die amerikanischen Babcock-Wilcox-Werke die Wasserstandsgläser durch unterlegte Glimmerscheiben, wobei die Gläser vom Dichtungsdruck entlastet sind und nur vom Dampfdruck angepreßt werden.

Auf diese Weise soll schon bewiesen sein, daß die Gläser sechs Monate halten.

Was die Haltbarkeit der Armaturen anbetrifft, so ist vor allen Dingen auf das Dichtmaterial zu achten. Kruppscher V 2a Stahl bewährt sich sehr gut; aber wir haben auch mit Reinickeldichtungen an selbstgefertigten oder den von Schäffer & Budenberg gelieferten Armaturen günstige Ergebnisse erzielt. Es kommt nur darauf an, die Sitze gut im Gehäuse zu befestigen, damit sie sich nicht lockern können.

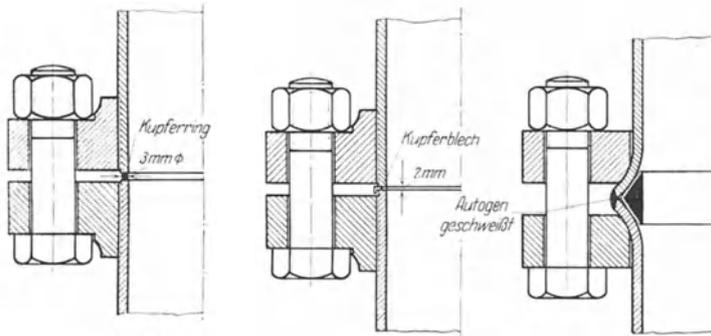


Abb. 32.

Abb. 33.

Abb. 34.
(Ausführung Krupp.)

Abb. 32—34. Rohrleitungs-Flanschverbindungen. Ausführung der Vorführungsanlage Wernigerode.

Wir haben ferner mit gutem Erfolge auch je ein Ventil der Firma Seyffert & Co., Berlin, und der Firma J. A. Hilpert, Nürnberg, bei Dampftemperaturen bis 460° und Dampfdrücken bis 60 at ausprobiert. Das Hilpertsche Ventil besitzt die sogenannte „Panzerdichtung“, die am Gehäuse bzw. Kegel aufgeschweißt ist.

Einen besonderen Vorteil, der hervorgehoben zu werden verdient, besitzt der Höchstdruckdampf. Dieser liegt darin, daß die Abmessungen der Absperrorgane ebenso wie die Rohrleitungsdurchmesser infolge der hohen Dichte des Dampfes klein ausfallen. Die Absperrorgane verziehen sich daher nicht so leicht als bei größeren Abmessungen, und die Rohrleitungen lassen sich leichter verlegen. Die Armaturgehäuse und Fassonstücke kann man bei kleineren Lichtweiten in Schmiedestahl ausführen, während sie bei größeren Abmessungen zweckmäßig in Stahlguß angefertigt werden.

Für die Rohrleitungen dürfen keinesfalls aufgenietete Flanschen benutzt werden. Man verwendet besser lose Flanschen mit vorgeschweißten Bunden oder, noch besser, aufgeschraubte Bunde oder Flanschen. In unserer Vorführungsanlage in Wernigerode verwenden wir letztere Konstruktion (Abb. 32 und 33). Allerdings handelt es sich hierbei nur um kleinere Rohrweiten. Als Dichtung verwenden wir weiches Kupferblech oder runde Kupferferringe, also rein metallische Dichtung. Diese Dichtungen klemmen wir unmittelbar zwischen die sauber bearbeiteten Rohrenden. In dieser Ausführung sind schon Flansche seit sechs Jahren verpackt, ohne daß es notwendig geworden ist, sie nachzuziehen, obgleich sie sehr oft warm und wieder kalt werden.

Bei den Atmoskesseln sowie denjenigen in Langerbrugge werden als Rohrleitungsdichtungen Weichisenringe benutzt. Weichpackungen, wie z. B. Klingerit oder ähnliches Dichtungsmaterial, eignen sich nicht für die Flanschdichtung des hochüberhitzten Höchstdruckdampfes, denn der in den Weichpackungen enthaltende Gummi verflüchtigt sich nach kurzer Zeit, und daher werden solche Dichtungen schnell zerstört. Auch Linsendichtungen aus Eisen oder Nickel können Verwendung finden, aber diese erfordern unnötig starke Flanschverbindungen.

dungen. Bei der Hochdrucklokomotive sind mit gutem Erfolg aufgeschliffene Eisenlinsen benutzt, die zwischen die aufgebördelten Rohrenden gelegt sind.

Die Flanschdichtungen lassen sich auch schweißen, und zwar hat die Firma Krupp eine meines Erachtens hierfür geeignete praktische Konstruktion, die in Abb. 34 gezeigt ist.

In einem so kurzen Zeitraum, wie er mir hier für den Vortrag zur Verfügung stand, ist es natürlich nicht möglich, alle für die Erhöhung der Betriebssicherheit der Höchstdruckkessel notwendigen Erfahrungen bekanntzugeben. Ich möchte nur immer wieder darauf hinweisen, daß vor allen Dingen bester Baustoff und sauberste Arbeit unbedingte Voraussetzung ist. Nur auf diese Weise kann den erhöhten Betriebsanforderungen genügt werden, die an alle Einzelteile einer solchen Anlage gestellt werden. Auf Grund der langjährigen Erfahrungen meiner Firma auf dem Gebiet des Höchstdruckdampfbetriebes und der eigenen Beobachtungen bin ich der festen Überzeugung, daß sich mit den heutigen bekannten Hilfsmitteln Höchstdruckkessel bauen lassen, die jeden Anforderungen in der Sicherheit des Betriebes wie der der Bedienungsmannschaften gewachsen sind. Die Betriebssicherheit richtig konstruierter Höchstdruckkessel ist zweifellos größer als die von Dampfkesseln bisheriger Betriebsdrücke und üblicher Ausführung.

Mit meinen Ausführungen, die vieles nur andeutungsweise bringen konnten, sollen keine unumstößlichen Ausführungsregeln gegeben werden, sondern sie sollen nur Anregungen sein, einen weiteren Erfahrungsaustausch herbeizuführen, damit auf diese Weise der Fortschritt auf diesem neuen Gebiet am schnellsten gefördert wird. Wenn mein Vortrag uns diesem Ziel näher bringt, so ist sein Zweck erfüllt.

Richtlinien für die Anforderungen an den Werkstoff und Bau von Hochleistungs- dampfkesseln

Für die Mitglieder der Vereinigung der Großkesselbesitzer als Grundlage für die Bestellung,
Materialabnahme und Bauüberwachung zusammengestellt

Ausgabe Juli 1926

(Herausgegeben von der Vereinigung der Großkesselbesitzer E. V., Charlottenburg.)

IV, 68 Seiten. 1926. Gebunden RM 4.—

Inhaltsübersicht:

Werkstoff der Kessel. Allgemeine Bestimmungen. — Schweißstahl. — Flußstahl. — Stahlguß. — Andere Werkstoffe. — Kesselteile. — **Bau der Kessel.** Allgemeines. — Werkstoff. — Vernietung (enthält die Richtlinien für die Bauüberwachung). — Schweißung und Bearbeitung im Feuer. — Berechnung der Blechdicken zylindrischer Dampfkesselwandungen mit innerem Überdruck. — Berechnung der Blechdicken von Dampfkesselflämmrohren mit äußerem Überdruck. — Berechnung der Blechdicken ebener Wandungen. — Berechnung der Blechdicken von Kesselböden ohne Verankerung gegenüber innerem Überdruck. — Berechnung der Blechdicken gewölbter Flämmrohrböden mit Aushalsung oder Einhalsung für ein oder zwei Flämmrohre. — Berechnung der Blechdicken von gewölbten Böden gegenüber äußerem Überdruck. — Schrauben und Verschraubungen. — Mannloch- und andere Ausschnitte. — Wasserkammer- und Teilkammerkessel.

Die Dampfkessel nebst ihren Zubehörteilen und Hilfseinrichtungen

Ein Hand- und Lehrbuch zum praktischen Gebrauch für Ingenieure, Kesselbesitzer
und Studierende

von

Reg.-Baumeister Prof. **R. Spalckhaver**, Altona a. E.

und

Ing. **Fr. Schneider** †, M.-Gladbach (Rhld.)

Zweite, verbesserte Auflage

Unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. **A. Rüster**, Oberingenieur und stellvertretender Direktor des Bayerischen
Revisions-Vereins

Mit 810 Abbildungen im Text. VIII, 481 Seiten. 1924

Gebunden RM 40.50

F. Tetzner, Die Dampfkessel. Lehr- und Handbuch für Studierende Technischer Hochschulen,
Schüler Höherer Maschinenbauschulen und Techniken sowie für Ingenieure und Techniker. Siebente,
erweiterte Auflage von Studienrat **O. Heinrich**, Berlin. Mit 467 Textabbildungen und 14 Tafeln. IX,
413 Seiten. 1923. Gebunden RM 10.—

Hochleistungs- und Hochdruckkessel. Studien und Versuche über Wärmeübergang, Zug-
bedarf und die wirtschaftlichen und praktischen Grenzen einer Leistungssteigerung bei Großdampfkesseln
nebst einem Überblick über Betriebserfahrungen. Von Prof. Dr.-Ing. **Hans Thoma**, Karlsruhe. Zweite
Auflage. In Vorbereitung

Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen. Einfluß von Belastungsschwankungen auf Dampfverbraucher und Kesselanlage sowie Wirkungsweise und theoretische Grundlagen der Regelvorrichtungen von Dampfnetzen, Feuerungen und Wärmespeichern. Von **Th. Stein**. Mit 240 Textabbildungen. VIII, 389 Seiten. 1926. Gebunden RM 30.—

Schnelle Anpassung des Dampfverbrauches an die Betriebsbeanspruchung ist der wichtigste Faktor für jede wirtschaftliche Betriebsführung von Dampfanlagen. In den letzten Jahren hat die selbsttätige Regelung und der Ausgleich von Belastungsschwankungen eine unerwartet rasche Entwicklung genommen. In dem vorliegenden Werk werden alle Arten von Regeleinrichtungen und Speichern, sowohl für den großen als den kleinen Betrieb, beschrieben, so daß jedem Betriebsleiter die Möglichkeit gegeben ist, das Mittel zu ergreifen, das sich seinem Betrieb am besten anpaßt.

Höchstdruckdampf. Eine Untersuchung über die wirtschaftlichen und technischen Aussichten der Erzeugung und Verwertung von Dampf sehr hoher Spannung in Großbetrieben. Von **Dr.-Ing. Friedrich Münzinger**. Mit 120 Textabbildungen. XII, 140 Seiten. 1926. RM 7.20; gebunden RM 8.70

Die Leistungssteigerung von Großdampfkesseln. Eine Untersuchung über die Verbesserung von Leistung und Wirtschaftlichkeit und über neuere Bestrebungen im Dampfkesselbau. Von **Dr.-Ing. Friedrich Münzinger**. Mit 173 Textabbildungen. X, 164 Seiten. 1922. Gebunden RM 6.—

Amerikanische und deutsche Großdampfkessel. Eine Untersuchung über den Stand und die neueren Bestrebungen des amerikanischen und deutschen Großdampfkesselwesens und über die Speicherung von Arbeit mittels heißen Wassers. Von **Dr.-Ing. Friedrich Münzinger**. Mit 181 Textabbildungen. VI, 178 Seiten. 1923. RM 6.—

Die Werkstoffe für den Dampfkesselbau. Eigenschaften und Verhalten bei der Herstellung, Weiterverarbeitung und im Betriebe. Von **Oberingenieur Dr.-Ing. K. Meerbach**. Mit 53 Textabbildungen. VIII, 198 Seiten. 1922. RM 7.50; gebunden RM 9.—

⊗ **Einrichtung, Betrieb, Kraftübertragung und Berechnung ortsfester Dampfkessel und Dampfmaschinen.** Mit Erörterung der bei der gesetzlichen Prüfung vorkommenden Fragen für Heizer, Maschinenwärter, Besitzer von Dampfmaschinenanlagen und Besucher technischer Lehranstalten. Von **Ing. August Ulbrich**, Prof. an der Staatsgewerbeschule in Wien. Vierzehnte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 170 Abbildungen, 4 Tafeln und den Kesselgesetzen für Deutschland und Österreich. 478 Seiten. 1922. (Technische Praxis, Band XVI.) Gebunden RM 4.50

Die Kessel- und Maschinenbaumaterialien nach Erfahrungen aus der Abnahmepraxis kurz dargestellt für Werkstätten- und Betriebsingenieure und für Konstrukteure. Von **O. Hönigsberg**, Zivilingenieur, Wien. Mit 13 Textfiguren. VIII, 90 Seiten. 1914. RM 3.—

Nieten und Schweißen der Dampfkessel dargestellt mit Berücksichtigung von Versuchen des Schweizerischen Vereins von Dampfkessel-Besitzern 1924/25. Von **Oberingenieur E. Höhn**. Mit 154 Abbildungen im Text und 28 Zahlentafeln. 148 Seiten. 1925. RM 8.—

Über die Festigkeit elektrisch geschweißter Hohlkörper. Versuche, veranstaltet vom Schweizerischen Verein von Dampfkessel-Besitzern. Berichterstatter: **Obering. E. Höhn**. 130 Seiten. 1924. RM 4.50

Maschinentechnisches Versuchswesen. Von Prof. Dr.-Ing. A. Gramberg, Oberingenieur an den Höchster Farbwerken.

Erster Band: **Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und zur Betriebskontrolle.** Zum Gebrauch an Maschinenlaboratorien und in der Praxis. Fünfte, vielfach erweiterte und umgearbeitete Auflage. Mit 326 Figuren im Text. XII, 565 Seiten. 1923. Gebunden RM 18.—

Zweiter Band: **Maschinenuntersuchungen und das Verhalten der Maschinen im Betriebe.** Ein Handbuch für Betriebsleiter, ein Leitfaden zum Gebrauch bei Abnahmeversuchen und für den Unterricht an Maschinenlaboratorien. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 327 Figuren im Text und auf 2 Tafeln. XVIII, 601 Seiten. 1924. Gebunden RM 20.—

Brand-Seufert, Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebsüberwachung insbesondere zur Überwachung des Dampfbetriebes. Zugleich ein Leitfaden für Maschinenbaulaboratorien technischer Lehranstalten. Neu herausgegeben von Dipl.-Ing. Franz Seufert, Oberingenieur für Wärmewirtschaft. Fünfte, verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 334 Abbildungen, einer lithographischen Tafel und vielen Zahlentafeln. X, 430 Seiten. 1926. Gebunden RM 29.40

Wahl, Projektierung und Betrieb von Kraftanlagen. Ein Hilfsbuch für Ingenieure Betriebsleiter, Fabrikbesitzer. Von Dipl.-Ing. Friedrich Barth, Nürnberg. Vierte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 161 Figuren im Text und auf 3 Tafeln. XII, 525 Seiten. 1925. Gebunden RM 16.—

Kolbendampfmaschinen und Dampfturbinen. Ein Lehr- und Handbuch für Studierende und Konstrukteure. Von Prof. Heinrich Dubbel, Ingenieur. Sechste, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 566 Textfiguren. VII, 523 Seiten. 1923. Gebunden RM 14.—

Die Steuerungen der Dampfmaschinen. Von Prof. Heinrich Dubbel, Ingenieur. Dritte, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 515 Textabbildungen. V, 394 Seiten. 1923. Gebunden RM 10.—

Anleitung zur Berechnung einer Dampfmaschine. Ein Hilfsbuch für den Unterricht im Entwerfen von Dampfmaschinen. Von Geh. Hofrat Prof. R. Graßmann, Reg.-Baumeister a. D. (Karlsruhe i. B.). Vierte, umgearbeitete und stark erweiterte Auflage. Mit 25 Anhängen, 471 Figuren und 2 Tafeln. XV, 643 Seiten. 1924. Gebunden RM 28.—

Die Kondensation bei Dampfkraftmaschinen einschließlich Korrosion der Kondensatorrohre, Rückkühlung des Kühlwassers, Entlüftung und Abwärmeverwertung. Von Oberingenieur Dr.-Ing. K. Hoefler, Berlin. Mit 443 Abbildungen im Text. XI, 442 Seiten. 1925. Gebunden RM 22.50

Der Regelvorgang bei Kraftmaschinen auf Grund von Versuchen an Exzenterreglern. Von Prof. Dr.-Ing. A. Watzinger, Trondhjem, und Dipl.-Ing. Leif J. Hanssen, Trondhjem. Mit 82 Abbildungen. 92 Seiten. 1923. RM 7.—

Technische Schwingungslehre. Ein Handbuch für Ingenieure, Physiker und Mathematiker bei der Untersuchung der in der Technik angewendeten periodischen Vorgänge. Von Privatdozent Dipl.-Ing. Dr. **Wilhelm Hort**, Oberingenieur, Berlin. Zweite, völlig umgearbeitete Auflage. Mit 423 Textfiguren. VIII, 828 Seiten. 1922. Gebunden RM 24.—

Die Berechnung der Drehschwingungen und ihre Anwendung im Maschinenbau. Von **Heinrich Holzer**, Oberingenieur der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg. Mit vielen praktischen Beispielen und 48 Textfiguren. IV, 200 Seiten. 1921. RM 8.—; geb. RM 9.—

Drehschwingungen in Kolbenmaschinenanlagen und das Gesetz ihres Ausgleichs. Von Dr.-Ing. **Hans Wydler**, Kiel. Mit einem Nachwort: Betrachtungen über die Eigenschwingungen reibungsfreier Systeme von Prof. Dr.-Ing. **Guido Zerkowitz**, München. Mit 46 Textfiguren. VI, 100 Seiten. 1922. RM 6.—

Handbuch der Feuerungstechnik und des Dampfkesselbetriebes mit einem Anhang über allgemeine Wärmetechnik. Von Dr.-Ing. **Georg Herberg**, Stuttgart. Dritte, verbesserte Auflage. Mit 62 Textabbildungen, 91 Zahlentafeln sowie 48 Rechnungsbeispielen. XVIII, 332 Seiten. 1922. Gebunden RM 11.—

Dampfkessel-Feuerungen zur Erzielung einer möglichst rauchfreien Verbrennung. Von **F. Haier**. Zweite Auflage im Auftrage des Vereins deutscher Ingenieure bearbeitet vom Verein für Feuerungsbetrieb und Rauchbekämpfung in Hamburg. Mit 375 Textfiguren, 29 Zahlentafeln und 10 lithographierten Tafeln. XXIV, 320 Seiten. 1910. Gebunden RM 20.—

Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung. Ein Leitfaden für die Praxis von Dr.-Ing. **Heinrich Gröber**. Mit 60 Textabbildungen und 40 Zahlentafeln. X, 200 Seiten. 1926. Gebunden RM 12.—

Die Wärmeübertragung. Ein Lehr- und Nachschlagebuch für den praktischen Gebrauch von Prof. Dipl.-Ing. **M. ten Bosch**, Zürich. Zweite, stark erweiterte Auflage. Mit 165 Textabbildungen, 69 Zahlentafeln und 48 Anwendungsbeispielen. VIII, 304 Seiten. Erscheint Ende 1926.

Die Separation von Feuerungsrückständen und ihre Wirtschaftlichkeit einschließlich der Brikettierung und Schlackensteinherstellung. Von Dipl.-Ing. **W. Engel**. Mit 30 Textabbildungen. 135 Seiten. 1925. RM 8.10; gebunden RM 9.60

Die Abwärmeverwertung im Kraftmaschinenbetrieb mit besonderer Berücksichtigung der Zwischen- und Abdampfverwertung zu Heizzwecken. Eine wärmetechnische und wärmewirtschaftliche Studie von Dr.-Ing. **Ludwig Schneider**. Vierte, durchgesehene und erweiterte Auflage. Mit 180 Textabbildungen. VIII, 272 Seiten. 1923. Gebunden RM 10.—

Abwärmeverwertung zu Heiz-, Trocken-, Warmwasserbereitungs- und ähnlichen Zwecken. Von Ingenieur **M. Hottinger**, Privatdozent, Zürich. Mit 180 Abbildungen im Text. X, 240 Seiten. 1922. RM 8.—; gebunden RM 10.—