

SAMMLUNG VIEWEG

**TAGESFRAGEN AUS DEN GEBIETEN
DER NATURWISSENSCHAFTEN
UND DER TECHNIK**

Heft 92

Siegfried Valentiner

**Physikalische Probleme
im Aufbereitungswesen
des Bergbaus**



Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH



Die „Sammlung Vieweg“ hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen, durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren **augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten**. Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig, und zwar für:

- Physik** (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):
Herr Geh. Reg.-Rat Prof. Dr., Dr.-Ing. E. h. **Karl Scheel**, Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;
- Chemie** (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):
Herr Prof. Dr. **Bernhard Neumann**, Techn. Hochschule Breslau;
- Technik** (Wasser-, Straßen- und Brückenbau, Maschinen- und Elektrotechnik, Schiffsbau, mechanische, physikalische und wirtschaftliche Probleme der Technik):
Herr Prof. Dr.-Ing. E. h. **Fritz Emde**, Techn. Hochschule Stuttgart.

Neuere und neueste Hefte der „Sammlung Vieweg“

- Heft 31. Dr. Heinrich Faßbender: *Die technischen Grundlagen der Elektro-medicin*. Mit 77 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 32/33. Prof. Rudolf Richter: *Elektrische Maschinen mit Wicklungen aus Aluminium, Zink und Eisen*. Mit 51 Abbildungen. M. 6,—.
- Heft 34. Obering. Carl Beckmann: *Haus- und Geschäfts-Telephonanlagen*. Mit 78 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 35. Dr. Aloys Müller: *Theorie der Gezeitenkräfte*. Mit 17 Abb. M. 3,—.
- Heft 36. Prof. Dr. W. Kummer: *Die Wahl der Stromart für größere elektrische Bahnen*. Mit 7 Abbildungen. M. 2,50.
- Heft 37. Dr. Reinhold Rieke: *Die Arbeitsmethoden der Silikatchemie*. 2. Aufl. Mit 4 Abbildungen. M. 3,50.
- Heft 38. Prof. Dr. Albert Einstein: *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. (Gemeinverständlich.)* 14. Auflage. (61. bis 65. Tausend.) Mit 4 Figuren. M. 3,—.
- Heft 39/40. Dr. Richard Grammel: *Die hydrodynamischen Grundlagen des Fluges*. Mit 83 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 41/42. Ingenieur Georg Duffing: *Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz und ihre technische Bedeutung*. Mit 23 Abb. M. 4,75.
- Heft 43. Dr. Robert Schwarz: *Feuerfeste und hochfeuerfeste Stoffe*. 2. vermehrte Auflage. Mit 10 Abbildungen. M. 2,—.
- Heft 44. Dr. Iwan Döry: *Einphasenbahnmotoren*. Mit 75 Abbildungen. M. 3,—.

Physikalische Probleme im Aufbereitungswesen des Bergbaus

Von

Dr. Siegfried Valentiner

Professor der Physik an der Bergakademie Clausthal



Mit 77 Abbildungen

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 1929

ISBN 978-3-663-00916-0 ISBN 978-3-663-02829-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-02829-1

Herausgeber dieses Heftes:
Geh. Reg. Rat Prof. Dr. Ing. e. h. Karl Scheel, Berlin

Alle Rechte vorbehalten

Vorwort.

Die folgenden Ausführungen sind aus Vorträgen entstanden, die ich im Februar 1928 im „Haus der Technik“ in Essen gehalten habe und deren Inhalt einem weiteren Kreise zugänglich zu machen, ich von verschiedenen Seiten gebeten worden bin. Vielleicht vermögen sie einerseits Bergbau-Studierende für die inneren Zusammenhänge bergbaulicher Verfahren und physikalischer Erkenntnis zu interessieren und zum Nachdenken über diese Zusammenhänge anzuregen, die noch vielfach schwer bis zum Ende zu verfolgen sind. Andererseits möchte ich das Bändchen als einen Versuch betrachtet wissen, auf technische Probleme eingestellte Physiker auf einige bergbauliche Fragen physikalischer Natur hinzuweisen, wobei ich selbst sehr wohl erkenne, daß die Ausführungen leicht auf andere als die hier behandelten Gebiete ausgedehnt werden könnten, wozu vielleicht bei einer Neuauflage Gelegenheit ist.

Die einzelnen Abschnitte sind so gut wie völlig selbständig und können daher auch in beliebiger Reihenfolge vorgenommen werden. Ich möchte sogar empfehlen, den ersten Abschnitt, der sich auf den spröden Stoff der Kohlenwaschkurven bezieht, zuletzt zu lesen. Seine Stelle im Bändchen erhielt er nur durch mein Streben nach einer gewissen Systematik in der Stoffanordnung. Zu den Ausführungen des zweiten Abschnitts möchte ich ergänzend bemerken, daß während der Drucklegung, die sich durch äußere Umstände leider verzögerte, in „Metall und Erz“ (35, 487, 1928) von Blümel (Aachen) in Anlehnung an das Buch von Finkey, „Die wissenschaftlichen Grundlagen der nassen Erzaufbereitung“, ein Aufsatz über den Satzprozeß erschienen ist, der, soweit er die auch von mir behandelten Fragen betrifft, mit meinen Ausführungen inhaltlich gut übereinstimmt. Und was die Theorie der Flotation anlangt, sei hier auf neue Arbeiten von K e l l e r m a n n

und Peetz vorbereitet, die nahe vor dem Abschluß stehen und deren Resultate in den Text selbst nicht mehr aufgenommen werden konnten. Ihnen zufolge scheint es für die Möglichkeit der Flotation wesentlich zu sein, daß das Öl aus Molekülen besteht, die einen hydrophoben und einen hydrophilen Teil enthalten; durch gewisse Zusätze zu dem Öl kann man den einen oder anderen Teil willkürlich verstärken und dadurch das Auftreten der Flotation beeinflussen.

Daß ich insbesondere solche Gebiete bevorzugt habe, über die in Clausthal gearbeitet wurde, mag wohl als Vorteil angesehen werden. Daß andererseits die Systematik der Darstellung die Benutzung einiger Abbildungen notwendig machte, die in ähnlicher Form bereits in anderen Büchern zu finden sind, ist selbstverständlich.

Für das freundliche und geduldige Eingehen der Verlagsbuchhandlung auf meine zum Teil noch während der Drucklegung vorgebrachten Wünsche, bin ich besonders dankbar.

Clausthal, Dezember 1928.

Bergakademie

S. Valentiner.

Inhalt.

	Seite
Einleitung	1
1. Über die Wirtschaftlichkeit von Aufbereitungsanlagen	5
2. Vorgänge in den Setzmaschinen	16
3. Aus der modernen Strömungstheorie	30
4. Herdarbeit	41
5. Flotation (Schwimmaufbereitung)	50
6. Magnetische Aufbereitung	62
7. Elektrostatische Aufbereitung und die Elektrofilter	85
8. Materialprüfung durch Röntgenstrahlen	103

Einleitung.

Wenn man durch eine moderne Erz- oder Kohlenaufbereitung hindurchwandert, kann man sich des Eindrucks nicht erwehren, als ob dort trotz der häufig technisch sehr vollkommenen Anlage von moderner Physik nicht allzuviel zu verspüren sei. Man fährt Kohle und Erze von den Bergwerken herein, bringt sie an die Klaubtische, zerkleinert sie durch Walzen und in Pochwerken, klassiert sie mit Hilfe von Sieben und sortiert sie in den Setzmaschinen und auf den Herden in einer Weise, wie sie zum Teil seit alters her bekannt ist, häufig mit dem einzigen Unterschied, daß manche Handarbeit durch Maschinenarbeit ersetzt ist, und daß zum Antrieb der Maschinen häufig thermodynamische oder elektromagnetische Kräfte an Stelle rein mechanischer benutzt werden. Wohl ist jetzt auch manches andere praktischer und wirtschaftlicher eingerichtet als in älterer Zeit, und manches neue und zweckmäßige Material wird bei dem Bau der Maschinen verwendet, das den Anforderungen besser entspricht als das, was man noch vor wenigen Jahrzehnten gebrauchte. Im Sinne moderner Physik kann man als neu dagegen vielleicht nur die Schwimmaufbereitung oder „Flotation“ nennen und gewisse Methoden, die man zusammenfassend als elektromagnetische bezeichnen mag. Es liegt dies gewiß nicht etwa an einem von vornherein ablehnenden Standpunkt gegenüber der physikalischen Erkenntnis, sondern vielmehr daran, daß man sich während der langen Zeit des Bergbautreibens eine außerordentlich große Erfahrung angeeignet hat in all dem, was zur Gewinnung der Erze notwendig ist, eine Erfahrung, die sich gründet auf eine Unzahl von freilich nicht systematischen, im Gegenteil meist zufälligen Versuchen, möglichst praktisch Erz vom Gestein zu trennen, eine Erfahrung, auf Grund deren die Methoden oft wirklich so weit durchgearbeitet sind, daß von einer weiteren theoretischen Behandlung nicht mehr viel Besserung erwartet werden kann.

Mit dieser reinen Empirie ist aber aufs engste der Umstand verknüpft, daß der tiefere Zusammenhang und die Wirkungs-

weise des eingeschlagenen Verfahrens im einzelnen durchaus nicht immer klar erkannt worden ist, und daß man fast bei jedem Teilprozeß einer Aufbereitungsanlage auf Fragen stößt, die man nicht aus dem Handgelenk beantworten kann, ja auf Probleme, die noch überhaupt auch dem, der eingehender sich mit der Sache befaßt hat, einstweilen unlösbar erscheinen. Um irgend ein Beispiel herauszugreifen, erinnere ich an die Beschaffenheit der Siebtrommeln (Abb. 1), die dazu dienen, das Haufwerk der

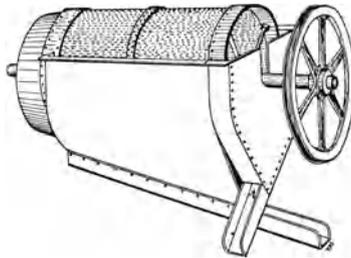


Abb. 1. Siebtrommel mit Mantel.

Korngröße nach zu trennen, und über deren zweckmäßigste Lochform gewiß das letzte Wort noch nicht gesprochen ist. Häufig mag das kreisrunde Loch in den Sieben Vorteile bieten gegenüber dem quadratischen oder rechteckigen; und es sollte wohl die Form des Materials bei der Wahl der Öffnungen mehr berücksichtigt werden, als es bisher geschehen; bereits öfters ist auch überlegt worden, ob sich bei gewissen Materialien nicht die Schlitzform besser eignen würde. Man könnte z. B. daran denken, Schieferplättchen von gewissen Dimensionen durch schlitzförmige Öffnungen von Kohle einer Korngröße, die in bezug auf Siebe mit runder Lochform gleich genannt wird, zu trennen ¹⁾; eine Wahrscheinlichkeitsrechnung über die Zweckmäßigkeit der einen oder anderen Form der Löcher mit Rücksicht auf die Form des Materials anzustellen, wäre am Platz. Auch über die Wahl der Entfernung ineinandergesteckter Siebtrommeln, die Wahl der Radien und Rotationsgeschwindigkeiten wäre manches zu sagen und manches durch Versuche und Überlegungen zu verbessern. Daß man diesen und ähnlichen Problemen ernstlich nicht weiter nachgegangen ist, liegt daran, daß man sich von einer auf solche

¹⁾ Verwendung der Allard'schen Rätter.

Überlegungen gegründeten Änderung nicht allzuviel wirtschaftliche Vorteile versprach und daher langwierige Rechnungen und Versuche scheute. Andererseits gibt es aber ganz gewiß eine große Reihe von Prozessen, deren wissenschaftliche Durchforschung trotz weitgehender empirischer Kenntnisse des technischen Vorgangs wertvolle weitere Entwicklung verspricht, die ohne ein tiefes Verständnis der inneren Zusammenhänge nicht möglich ist. Wenn es auch oft das Los der Wissenschaft ist, Lösungen von Problemen, die empirisch bereits gefunden wurden, hinterher nur v e r s t ä n d l i c h zu machen und sozusagen „nachzuempfinden“, so ist doch eben häufig gerade nur dadurch eine Förderung der Technik zu erzielen.

Von Fragen physikalischer Natur, wie sie eine Aufbereitungsanlage anregt, soll auf den folgenden Seiten die Rede sein. Bei der Unbestimmtheit und dem Umfang dieses Themas scheint es notwendig, ein kurzes Wort über die Auswahl der zu behandelnden Probleme vorauszuschicken. Daß ich mich als Physiker auf die rein physikalischen Fragen beschränken, also alles Problematische, das die eigentlich t e c h n i s c h mechanischen, thermischen und elektrischen Vorgänge betrifft, beiseite lassen möchte, wird man mir nicht verübeln. So will ich mich z. B. um die interessanten Fragen nach der Beanspruchung der Federn von Brechern und Walzwerken, um die Füllung von Mühlen mit kubischen Mahlsteinen oder Kugeln, um die Lagerung von Pochwerken usw. hier nicht kümmern, so wichtig vielleicht die Verbesserungen auch wären, die auf Grund eingehender wissenschaftlicher Untersuchungen vorgeschlagen werden könnten. Nur sozusagen „im Vorbeigehen“ werde ich in Anbetracht der Bedeutung der Materialuntersuchung durch Röntgenstrahlen zur Kenntnis der bei Brüchen auftretenden Spannungen auf dieses wichtige Gebiet kurz eingehen, und was die Mühlenfüllung anbelangt, so sei wenigstens im Anschluß an die obige Bemerkung über die Verwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung bei Fragen der Siebtrommeln darauf hingewiesen, daß auch hier zum Teil Probleme der Wahrscheinlichkeitsrechnung vorliegen, und es sei an die kürzlich wieder von E. H. R o s e gemachten Vorschläge erinnert, Quadern statt Kugeln zu verwenden, nachdem erkannt worden ist, daß die Würfel größere Angriffsmöglichkeiten für die Zerkleinerung bieten als

die Kugeln und dabei zu einer Art von selektiver Zerkleinerung Veranlassung geben, indem die größeren Stücke zwischen den Quadern die kleineren vor zu weitgehender Zerkleinerung schützen sollen.

Von den verbleibenden Problemen scheinen mir zurzeit mit im Vordergrund des Interesses zu stehen: die Bewegungsvorgänge in den Setzmaschinen und auf den Herden, sowie die die Flotation betreffenden Fragen einerseits und die elektrostatisch-elektromagnetische Aufbereitung, sowie die elektrische Entstaubung und die Materialuntersuchung mit Röntgenstrahlen andererseits. Darauf sei denn im folgenden näher eingegangen. Da aber ein Fortschritt in der Technik dieser Gebiete nur bei genauer Kenntnis der physikalischen Grundlagen möglich ist, und da als die vornehmste Aufgabe dieses Bändchens betrachtet wird, durch Skizzieren der Art und Weise, wie Aufbereitungsprozesse theoretisch und experimentell angegriffen werden können, und durch Skizzieren der Richtung, in der eine Entwicklung zu erwarten ist, zur Weiterarbeit anzuregen, bin ich in einem besonderen Abschnitt etwas ausführlicher 1. auf die Grundlagen der modernen Strömungstheorie eingegangen, die auch in anderen Bergbaugebieten eine besonders wichtige Rolle spielt, und 2. auf die Grundlagen der Röntgenstrahlen, ohne die die Möglichkeit der Strukturuntersuchung nicht erfaßt werden kann. In Anbetracht dessen ferner, daß es das wichtigste Ziel jeder technischen Neuerung ist, die Anlagen und damit alle Einzelprozesse möglichst ökonomisch zu gestalten, schien es mir geboten, einen kleinen Abschnitt über die Frage voranzuschicken, ob man nicht in gleicher Weise wie bei thermodynamischen und elektromagnetischen Maschinen bei den Aufbereitungsprozessen von einem Wirkungsgrad sprechen kann, oder wie weit man das kann. Daß es in gewissem Sinne möglich sein wird, läßt sich zeigen. Es setzt freilich die theoretische Beherrschung des Prozesses, die genaue Kenntnis des aufzubereitenden Materials und schließlich auch des Endzieles voraus. Nicht ist es aber dabei meine Absicht, auf die Frage der B e n e n n u n g der Endprodukte wie „Ausbringen“, „Trennungsgrad“ u. dgl. einzugehen, deren Festlegung begrüßenswerterweise sich ein Ausschuß der Gesellschaft Deutscher Metallhütten- und Bergleute angelegen sein läßt.

1. Über die Wirtschaftlichkeit von Aufbereitungsanlagen.

Die Aufgabe einer Aufbereitungsanlage ist die, aus einem Haufwerk Berge und Erze oder Kohle voneinander vollkommen zu trennen. Durch Auslesen wäre das bei genügender, vorhergehender Zerkleinerung theoretisch möglich, und es wäre dazu eine Arbeit notwendig, deren Betrag man in gewissen Einheiten bei einer bestimmten Zusammensetzung und Korngröße des Haufwerkes zahlenmäßig abschätzen könnte. Man wird bei der Stellung dieser Aufgabe lebhaft an ein viel behandeltes Problem der Physik erinnert, nämlich an die Frage z. B. der Arbeit, die geleistet werden muß, um aus einem Gemisch von Sauerstoff und Stickstoff den Sauerstoff von dem Stickstoff zu trennen. Die Ausführung dieser Arbeit scheint unmöglich, wenn wir nicht irgendwelche physikalische oder chemische Eigenschaften benutzen können. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die beiden Gase sich ohne unser Zutun voneinander trennen und nur infolge ihrer molekularen Wärmebewegung zufällig für einen Augenblick völlig getrennt sind, ist außerordentlich gering, wenn sie sich auch zahlenmäßig angeben läßt. Sie ist ungeheuer viel kleiner als die Wahrscheinlichkeit dafür, daß dauernd der Raum gleichmäßig von den Gasen erfüllt bleibt. Und auf das zufällige Eintreten dieser Trennung der Gase von selbst werden wir daher nicht warten können. Die Entropie — so sagt der Theoretiker —, eine Größe, die durch die Wahrscheinlichkeit des Zustandes bestimmt wird, ist im zweiten Fall ungeheuer viel größer als im ersten, und es ist der Satz bekannt, daß die Abnahme der Entropie ohne unser Zutun bei einem Prozeß in der Natur äußerst unwahrscheinlich ist. Dieses „unser Zutun“ bedeutet eine Arbeit, die nun freilich auf verschiedenste Weise ausgeführt werden kann. Am zweckmäßigsten wird es sein, zur Trennung diejenigen physikalischen oder chemischen Eigenschaften der beiden Gase zu verwenden, in denen die Gase möglichst große Unterschiede zeigen. Eine der bekanntesten Methoden der Trennung ist die der Verflüssigung der Luft, bei der man zur Trennung von Stickstoff und Sauerstoff die Differenz der Sättigungsdrucke von Stickstoff und Sauerstoff bei der Tem-

peratur der flüssigen Luft benutzt. Offenbar handelt es sich bei diesen Methoden — genau so ist es bei den Aufgaben der Aufbereitungskunde — um Auslösungsprozesse, indem durch die Prozesse ein Produkt als Resultat geliefert wird, dessen Energieinhalt mit den Energieänderungen des Prozesses in Beziehung zu setzen, ganz gewiß keinen bestimmten Sinn hat. Insofern ist es schwer, von einem Wirkungsgrad des Prozesses im eigentlich thermodynamischen oder mechanischen Sinne zu sprechen. In übertragener Bedeutung kann man es vielleicht z. B. tun, als von dem Verhältnis des Geldwertes der pro Stunde gewonnenen Anzahl Liter getrennten Sauerstoffs und getrennten Stickstoffs von dem für die gedachte Verwendung notwendigen Reingehalt zu dem Geldwert der während der Zeit in die Anlage hineingesteckten Energie.

Wenn man in der Lage wäre, den Prozeß genau rechnerisch zu verfolgen, dann könnte man wenigstens feststellen, wieviel von der verwendeten Energie, insbesondere bei der praktischen Ausführung, der Erreichung des Zieles nicht zugute kommt (z. B. in Form von Wärmeabgabe bei der Verflüssigungsanlage od. dgl.), und man könnte als Wirkungsgrad der wirklichen Anlage, verglichen mit der idealen, betrachten: das Verhältnis der um die „vergeudete“ Energie verminderten Gesamtenergie zu dieser. Auch das wiederum ist aber nur möglich, wenn das Ziel ein völlig bestimmtes ist, was nur selten der Fall, indem durch die „vergeudete“ Energie zuweilen Nebenprodukte geliefert werden, die sehr wertvoll sind.

So wird es zweckmäßig sein, das Streben nach der Angabe eines eigentlichen Wirkungsgrades aufzugeben, aber zur Charakterisierung der Anlage die aufgewandte Energie mitzuteilen, ferner die gewonnenen Endprodukte und darüber hinaus — was man meines Erachtens zur richtigen Beurteilung der Maschine unbedingt braucht —, wie groß die Änderungen der das Resultat bestimmenden Größen sein müssen, um eine geforderte Variation des Endeffektes zu erhalten. Wenn man weiter aber auch versuchen will, die Wirtschaftlichkeit einer Anlage dauernd zu beherrschen, ist es bei der Veränderlichkeit der einzelnen für den Verlauf des Prozesses maßgebenden Faktoren notwendig, sie dauernd zu kontrollieren. Es handelt sich mit anderen Worten

also um eine genaue Betriebsüberwachung. Nicht in allen Anlagen ist es bisher gelungen, eine solche Überwachung in geeigneter Weise durchzuführen, wenn auch mehr und mehr ihre Bedeutung für die Erzielung guter Wirtschaftlichkeit erkannt worden ist. Erfolgreiche Versuche einer sorgfältigen Betriebsüberwachung liegen eigentlich nur bei den Kohlenwäschen (z. B. Aufbereitung der Kohlen für die Kokereien mit vorgegebenem Aschen- und Feuchtigkeitsgehalt) vor, ermöglicht durch die Aufnahme der sogenannten Waschkurven, die von Reinhardt¹⁾ bereits im Jahre 1911 dringend empfohlen worden sind, und ohne die ein Urteil über die Zweckmäßigkeit einer Aufbereitungsanlage für Grob- und Feinkohlen schlechterdings nicht abzugeben ist. Erst in den allerletzten Jahren ist auch in weiteren Kreisen die Bedeutung dieser Waschkurven erkannt worden, wozu Reinhardt²⁾ selbst dadurch beigetragen hat, daß er im Jahre 1926 die Anwendungsweise dieser Kurven in einer einfachen und sehr allgemeinen Darstellung zusammen mit der Aufstellung der Kurven behandelt hat. Wenn auch dieses Schema direkt durchaus nicht unmittelbar auf andere Aufbereitungsanlagen übertragen werden kann — nichts ist, wie mir scheint, für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Aufbereitungsanlage so gefährlich wie eine geistlose Schematisierung —, so gibt die Aufstellung der Waschkurven doch ein so klares Bild von dem, was an Kenntnissen für eine jede Anlage gefordert werden muß, daß es in Anbetracht der vorhin aufgeworfenen Frage nach dem Wirkungsgrad mir am Platz zu sein scheint, in kurzem auf diese Waschkurven einzugehen.

Für die Koksbereitung z. B. bedarf es einer Kohle bestimmten Aschen- und Feuchtigkeitsgehalts, und es handelt sich also darum, eine Kohle solcher Beschaffenheit aus der Rohkohle zu gewinnen. Das kann in verschiedenster Weise geschehen, aber nur eine Weise wird die vorteilhafteste sein. Um einen bestimmten Fall herauszugreifen, nehmen wir an, wir hätten es mit Feinkohle von einer Korngröße zwischen 0 und 10 mm zu tun. Gewisse Überlegungen zeigen, daß es günstig ist, von vornherein vor dem

1) K. Reinhardt, Glückauf 1911, S. 221.

2) K. Reinhardt, Glückauf 1926, S. 485, 521. — Vgl. auch z. B. R. Wüster, Glückauf 1925, S. 61. — O. Schäfer, Einführung in das Wesen und den Aufbau der Waschkurven für Steinkohlen, Herne, Maschinenfabrik Baum A.-G., 1927.

Waschen der Kohle den „nichtwaschbaren“ Staub von 0 bis 0,2 mm Korngröße abzusaugen, um ihn später je nach seinem Aschengehalt mehr oder weniger vollständig dem Endprodukt wieder zuzusetzen. Die vom Staub befreite Kohle mag ferner durch Setzmaschinen, die das Setzgut in eine Anzahl Portionen verschiedenen spezifischen Gewichts (hier auch Aschengehalts) trennen können, in z w e i Teile zerlegt worden sein, einen Teil Kohle mit geringerem, einen Teil Berge mit größerem Aschengehalt. Die Frage ist nun die: Wie weit muß der Setzprozeß betrieben werden, um

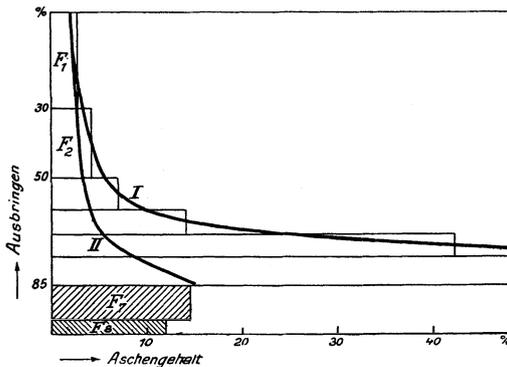


Abb. 2. Schema der Kohlewaschkurven.

einen bestimmten Aschengehalt im gesamten Endprodukt (Kohle + Staub) bei günstigstem Ausbringen zu erzielen? Ferner: Wann kann, und in welcher Menge, der Staub zugefügt werden? Mit Kenntnis der Waschkurven ist die Antwort sofort zu geben. Diese Kurven liefern die Abhängigkeit des Aschengehalts vom Ausbringen und lassen sich in folgender Weise gewinnen: Durch eine Versuchssetzmaschine ¹⁾ zerteilt man ein Probequantum in eine möglichst große Reihe von Portionen verschiedenen spezifischen Gewichts, d. h. Aschengehaltes. Man bestimmt ihr Mengenverhältnis und erhält so für einen gewissen Prozentsatz der Rohkohle einen bestimmten Aschengehalt. In Abb. 2 ist das Resultat einer solchen Rohkohlenuntersuchung eingetragen, indem das Ausbringen (die Mengen bestimmten Aschengehaltes der Probe dividiert durch das Gesamtprobequantum in Prozent) als Ordinate,

¹⁾ Über die Wirkungsweise der Setzmaschinen, siehe Abschnitt 2.

der Aschengehalt als Abszisse aufgezeichnet worden ist. Die abgegrenzten Flächenstücke $F_1, F_2 \dots$, die sich auf die einzelnen Portionen beziehen, geben uns unmittelbar in ihrem Inhalt den Betrag an Bergen an, der in den verschiedenen Proben noch enthalten ist; das oberste Flächenstück F_1 zeigt uns den Betrag an Bergen in den spezifisch leichtesten 30% des Gesamtgutes; das darunterliegende F_2 den der nächst schwereren 20% und so fort. Der mittlere Aschengehalt der spezifisch leichtesten 30% unserer Rohkohle ist nach der Abb. 2 nur 2,8%. Ein Teil dieser Probe hat natürlich einen noch kleineren Aschengehalt, der Rest einen größeren, so daß, wenn wir durch die Setzmaschine eine weitere Trennung nach dem spezifischen Gewicht vornehmen könnten und würden, das erste Flächenstück in z. B. zwei zerfallen würde, von insgesamt gleicher Ausdehnung, aber verschiedener Breite (in Richtung der Abszisse). Könnten wir das Gesamtmaterial auf irgend eine Weise in unendlich viele kleine Portionen verschiedenen spezifischen Gewichts teilen, die wir danach bzw. nach dem Aschengehalt geordnet numerieren, und würden das Ansteigen des Aschengehaltes mit der Nummer der Portion graphisch auftragen, so würden wir statt einer Zickzacklinie eine Kurve erhalten, deren Punkte durch ihre Abszissen die Aschengehalte der spezifisch leichtesten Schicht angeben, die noch in dem Gemisch vorhanden ist, nachdem der durch die Ordinate angegebene Betrag spezifisch leichteren Materials dem Gute entzogen ist. Diese Kurve I ist die Waschkurve, die natürlich auch mit sehr guter Annäherung konstruiert werden kann, wenn das Probenmaterial nur in einige wenige Portionen nach dem spezifischen Gewicht zerteilt worden ist¹⁾. Die Kurve schneidet die Mitten der rechten Rechtecksseiten der den einzelnen Portionen zukommenden Flächenstücke so, daß die aus den Rechtecken herausgeschnittenen Dreiecke flächengleich sind mit den unter den Schnittpunkten liegenden, von den Rechtecksseiten und der Kurve eingeschlossenen Dreiecken²⁾.

¹⁾ Die Gestalt der Zickzacklinie hängt etwas von der Art der Abtrennung der Portionen ab; näheres siehe unten.

²⁾ Es ist üblich geworden, Abszisse und Ordinate so zu wählen und zu legen, wie dies in der Abbildung hier geschehen ist; und es mag,

Die in der Abb. 2 gezeichnete Kurve II gibt den mittleren Aschengehalt an¹⁾, das bedeutet: ein Punkt der Kurve liefert durch seine Abszisse den Aschengehalt, den man in einer Portion von soviel Prozent, wie die Ordinate des Punktes anzeigt, finden würde. Sie ist nur bis zu einem Prozentgehalt von 85 durchgezogen, da aus dem Gesamtgut 10% nicht waschbarer Staub (F_7) vorher herausgenommen wurde und 5% Schlamm (F_8) sich

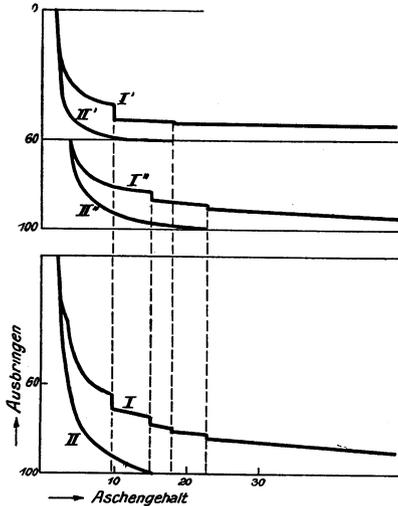


Abb. 3. Zur Addition der Kohlewaschkurven.

aus dem Umlaufwasser der Setzmaschinen nach Beendigung des Versuches niedergeschlagen hat, also ebenfalls dem zur Konstruktion der Kurven verwendeten Material entzogen ist. Ihr Aschengehalt ist nach der Abb. 2 12% und 14,5%.

Die Brauchbarkeit und Wichtigkeit dieser graphischen Darstellung erhellt z. B., wenn man der Frage nachgeht, wie gestaltet sich das Gesamtausbringen zweier getrennt gewaschener Kohlesorten, deren Waschkurven bekannt sind, und die bis zu einem

um keine Verwirrung hervorzurufen, daran festgehalten werden. Manches ließe sich vielleicht etwas einfacher ausdrücken, wenn die Zählung auf der Ordinate von 0 bis 100% aufwärts, nicht abwärts, geschähe, wie man es sonst gewohnt ist, und Abszisse und Ordinate vertauscht wären.

¹⁾ Auch in den folgenden Abbildungen geben die mit I bezeichneten Kurven den Aschengehalt der Schicht selbst, die mit II bezeichneten Kurven den mittleren Aschengehalt, wie er im Text definiert ist, an.

bestimmten Aschengehalt gewaschen werden sollten? Die Kohlenmengen der beiden Sorten seien 40 und 60 % der Gesamtmenge, und in Abb. 3 seien die zugehörigen Aschenkurven übereinander eingezeichnet. Das Ausbringen, das wir in Summa bei einem bestimmten Aschengehalt erwarten müssen, finden wir in dem unteren Teile der Abbildung offenbar durch Addition der Ordinaten der zu gleichen Aschengehalten gehörenden Punkte des

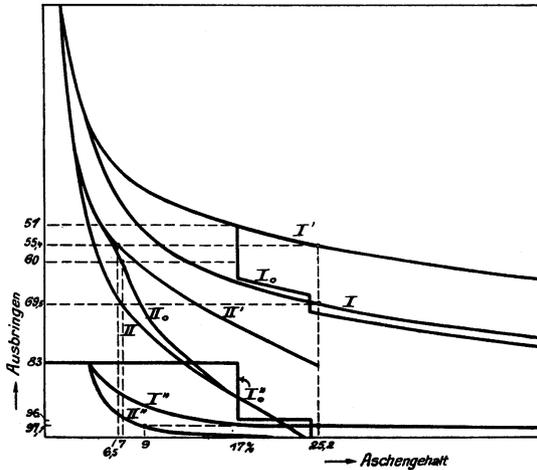


Abb. 4. 1. Beispiel der Benutzung von Kohlewaschkurven.

oberen Teils der Abbildung [gerechnet von den Anfangsordinaten (bei 0 bzw. bei 60 %) der beiden Kurven], die uns in der graphischen Darstellung die Kurven I und II gibt. Es sind übrigens natürlich die gleichen Kurven, die wir erhalten würden, wenn wir von vornherein die beiden Sorten zusammenmischen und für die Mischung die Waschkurve aufstellen würden. In dem Sinne enthält auch die Abb. 4 die Waschkurven von zwei Kohlesorten, nämlich 1. der waschbaren Kohle von 0,2 bis 10 mm Korngröße (83 $\frac{0}{0}$), Kurve I', II', und 2. Staub und Schlamm (17 $\frac{0}{0}$), Kurve I''; daß die Waschkurve der zweiten Kohlesorte aus einer einfachen Zickzacklinie besteht, ist an sich gleichgültig. Um das Ausbringen bei bestimmtem Aschengehalt festzustellen, wenn Staub und Schlamm der waschbaren Kohle nach dem Waschen wieder zugesetzt werden dürfen, brauchen wir nur die gemeinsame Waschkurve I₀ bzw. II₀ zu betrachten. Aus ihr können wir alles Ge-

wünschte herauslesen, also z. B. auch das günstigste Ausbringen bei einem mittleren Aschengehalt von 7%: Zur Abszisse 7% Aschengehalt gehört in Kurve II₀ das Ausbringen 60%. Es setzt sich zusammen aus der bis zum Aschengehalt des Staubes von 17% gewaschenen Waschkohle (51% der Rohkohle) und einem Teil (nämlich $\frac{60 - 51}{96 - 83} = 9/13$) des vorher abgesaugten Staubes (9% der Rohkohle). Der Schlamm bleibt, wie auch der Rest des Staubes, endgültig ausgeschieden.

Werden Staub und Schlamm flotiert, also für sich aufbereitet, und dann in geeignetem Maße zugesetzt, so kommt ihnen eine andere Waschkurve zu, deren Zusammensetzung mit der Waschkurve der ersten Sorte die Kurve I und II ergibt. II liefert zur Abszisse 7% Aschengehalt 69,5% Ausbringen, entsprechend einem Aschengehalt von 25,2% der aschenreichsten Schicht (abzulesen an Kurve I), aus der sich weiter mit Kurve I' und II' ein mittlerer Aschengehalt von 6,5% der ersten Kohlensorte (55,4% der Rohkohle) und mit Kurve I'' und II'' ein mittlerer Aschengehalt von 9% der zweiten Kohlensorte (Staub und Schlamm) (14,1% der Rohkohle) errechnen läßt. Bei Aufbereitung von Staub und Schlamm und nachherigem Zumischen in geeignetem Maße, nämlich von 14,1 : 17 des vorhandenen Staubes und Schlammes, erhält man also ein Ausbringen von 9,5% mehr als im ersten Fall.

Ich entnehme dem ausgezeichneten Aufsatz *Reinhardt*¹⁾ noch ein anderes Beispiel, um weiter den Wert der Waschkurven für die Betriebsüberwachung zu beleuchten. „Es handelt sich um den Betrieb einer Feinkohlenwäsche, aus der erhalten werden:

67% gewaschene Kohle	mit	5,17% Asche
12 „ nicht waschbarer Staub . . . „	14,0 „ „	
3 „ Schlamm	20,0 „ „	
18 „ Berge	57,7 „ „	

zusammen also 100% mit 16% Asche. Staub und Schlamm werden mit der gewaschenen Kohle zu einer Menge von 82% Kohle mit 7% Aschengehalt gemischt. Es soll untersucht werden, ob dieses Ausbringen von 82% vermehrt werden kann.“

1) K. Reinhardt, l. c. 1926, S. 524.

Ein solches vermehrtes Ausbringen wäre in diesem Fall, in dem Staub und Schlamm vollständig wieder zugesetzt worden sind, nur möglich, wenn eine Nachwäsche der Berge noch ein merkliches Ausbringen mit im Mittel 7% Asche ergäbe. Mit einer Versuchssetzmaschine wird man also die Waschkurven der Kohle mit Staub und Schlamm und die der Berge (als einer zweiten Kohlenart) aufnehmen, und man findet z. B. die in Abb. 5 gezeichneten Kurven. Dabei fällt sofort auf, daß bei Nachwäsche der Berge sich Schichten abtrennen lassen mit viel kleinerem Aschengehalt,

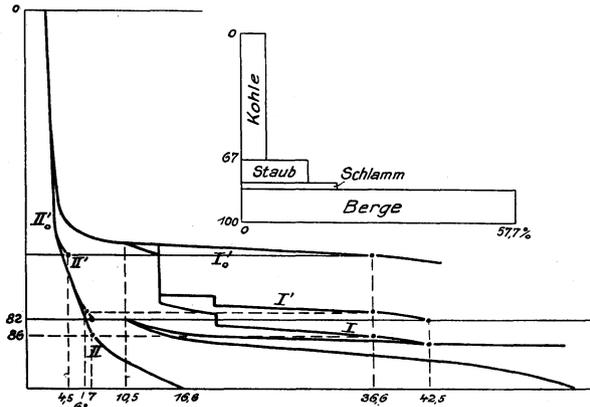


Abb. 5. 2. Beispiel der Benutzung von Kohlewaschkurven.

nämlich 10,5%, als dem der aschenreichsten Schicht der Kohle mit 42,5%. Solche Verhältnisse kommen z. B. vor, wenn eine Wäsche stark überlastet ist. Die Zusammensetzung der Waschkurven liefert die der Mischung I und II, und aus II entnimmt man, daß bei dem mittleren Aschengehalt von 7% (und einem Aschengehalt von 36,6% — vgl. I — der aschenreichsten Schicht) ein Ausbringen von 86% (also 4% mehr als vorher angenommen) möglich sein muß. (Die Waschkurve der Rohkohle hätte das von vornherein ergeben; die Nachprüfung der in Wirklichkeit vorgenommenen Wäsche und Trennung in Kohle und Berge durch die Waschkurven der Kohle und der Berge schließt den Vorteil in sich, zugleich einen Fingerzeig zu geben, ob und auf welche Weise die vorhandene Anlage ohne prinzipielle Änderung zu bessern ist.) Um das Ausbringen von 86% zu erzielen, muß man nun erstens die Kohle, einschließlich der Staub- und Schlammteile,

auf einen Gehalt von 36,6% Asche der aschenreichsten Schicht waschen bzw. auf einen mittleren Aschengehalt von 6,3% (vgl. Kurve I' und II'), oder ausschließlich Staub und Schlamm, die man nachher zusetzen kann, 4,5% (vgl. Kurve I₀' und II₀') — und muß man z w e i t e n s die Berge nachwaschen auf einen mittleren Aschengehalt von 16,6%. Ob dieses Mehrausbringen eine Nachwäsche der Berge rechtfertigt, wobei zu beachten ist, daß die berechneten Werte in der Praxis nicht ganz erreicht werden, ist natürlich eine Frage für sich.

Da der Kohle für den gewünschten Aschengehalt in diesem Falle der gesamte Staub und Schlamm nach der Wäsche zugegeben werden kann, ist natürlich eine Aufbereitung von Staub und Schlamm z. B. durch Flotation überflüssig. Wäre es anders, so wäre zunächst die Aufstellung der Waschkurven von Staub und Schlamm mit Hilfe einer Versuchs-Flotationsanlage zweckmäßig, aus der der Wert der Aufbereitung von Staub und Schlamm durch Vergleichen mit der Waschkurve der Kohle leicht erkannt werden könnte.

In der Art, die Waschkurven zweier Kohlsorten zu einer der Mischung durch Addition der Ordinaten zusammenzuziehen, prägt sich übrigens die Annahme einer Gesetzmäßigkeit aus, die ganz allgemein zu erweisen ist: Sind zwei oder mehr Kohlsorten aufzubereiten, die nach der Wäsche gemischt werden sollen, so kann der Forderung nach dem größten Gesamtausbringen mit einem bestimmten Aschengehalt jedenfalls nur dann genügt werden, wenn die Sorten so weit aufbereitet sind, daß die Aschengehalte der aschenreichsten Schichten der gewaschenen Kohlen gleich sind (abgesehen von den Sorten, die infolge ihres geringen Aschengehaltes überhaupt ganz den anderen Sorten zugefügt werden können, ohne daß der geforderte mittlere Aschengehalt erreicht wird, z. B. Mitnahme von Staub und Schlamm im obigen Beispiel).

Auf eine wichtige Tatsache muß hier schließlich noch hingewiesen werden. Es gibt verschiedene Methoden, die Abhängigkeit von Ausbringen und Aschengehalt, die durch die Waschkurven wiedergegeben wird, experimentell zu bestimmen. Im wesentlichen sind es drei Verfahren (von verschiedenen Abarten abgesehen), die in Aufnahme gekommen sind. Das eine von H e n r y

angegebene kennzeichnet R e i n h a r d t kurz folgendermaßen: „In einem etwa 50 mm weiten, unten geschlossenen Zylinder kann ein Kolben aus feinem Drahtgeflecht durch eine dünne, aus dem Zylinder ragende Stange senkrecht auf und ab bewegt werden. Der Zylinder wird mit Wasser gefüllt und auf den Kolben eine Menge von etwa 200 g einer guten Durchschnittsprobe der zu untersuchenden Feinkohle gebracht. Bewegt man nun den kleinen Siebkolben mit Hilfe seiner Stange lange genug langsamer aufwärts, und rascher abwärts, so lagert sich die Kohle in einer Reihe von Schichten mit verschiedenem Aschengehalt übereinander. Die so geschichtete Kohlsäule wird dann vorsichtig aus dem Zylinder herausgenommen und sorgfältig in dünne wagerechte Schichten zerlegt. Die einzelnen Schichten werden getrocknet, gewogen und dann auf ihren Aschengehalt untersucht. Etwa im Zylinder zurückbleibender Schlamm wäre ebenfalls nach Menge und Aschengehalt zu bestimmen und der Schicht mit gleichem Aschengehalt zuzurechnen.“ — Ein zweites Verfahren, das zuerst in der englischen und amerikanischen Literatur angegeben war, und das W ü s t e r in seinem Aufsatz näher beschreibt, das Schwimm- und Sinkverfahren (float and sink), beruht auf einer Trennung der Kohlenportionen nach dem spezifischen Gewicht durch Schwimmen und Sinkenlassen in Flüssigkeiten geeignet hohen spezifischen Gewichts. Die Kohlenteile mit höherem spezifischen Gewicht als dem der Flüssigkeit sinken dabei unter, die übrigen schweben und schwimmen in der Flüssigkeit und werden nach eingetretenem Beharrungszustand sorgfältig abgeschöpft und in einer Flüssigkeit von etwas geringerem spezifischen Gewicht sinngemäß weiter behandelt. — Das dritte Verfahren, das gegenüber den beiden ersten den Vorteil größerer Anlehnung an den wirklich stattfindenden Aufbereitungsprozeß hat, und den der Möglichkeit, größere Kohlenquanten zu verwenden, benutzt eine kleine Versuchssetzmaschine von der Firma Schüchtermann & Kremer mit fünf Durchsetzabteilungen (Abb. 6), die also sechs Portionen außer dem Schlamm und Staub liefert, deren Mengenverhältnis und Aschengehalt bestimmt werden können. — R e i n h a r d t hat die Frage geprüft, ob es prinzipiell gleichgültig ist, welches dieser Verfahren zur Ableitung der Waschkurve benutzt wird, und hat gezeigt, daß man zu falschen Schlüssen kommen kann ebensowohl

durch Verwendung eines zu genauen als eines zu ungenauen Verfahrens, und daß man bemüht sein muß, bei der Versuchsanlage die Trennung nach dem spezifischen Gewicht möglichst genau so weitgehend wie bei der praktisch verwendeten Setzmaschine oder Flotationsanlage durchzuführen. Man sieht das sofort ein, wenn man sich vergegenwärtigt, daß man bei der Ableitung der Schlüsse über die Wirtschaftlichkeit aus den Diagrammen unter anderem auch Bezug nehmen muß auf die Kurven I, die den Aschengehalt einer bestimmten kleinen Schicht nach Abtrennung aller spezifisch leichteren Schichten wiedergibt, und diese je nach der Anzahl der Portionen, in die die Rohkohle geteilt wird, etwas verschieden ausfallen müssen. Für die Schlüsse, die man für die Praxis zieht, ist eben die wirkliche Zickzacklinie maßgebend, nicht die ausgeglichene Kurve, die einer unendlich großen Anzahl von Portionen entspricht. (Näheres siehe bei R e i n h a r d t.)

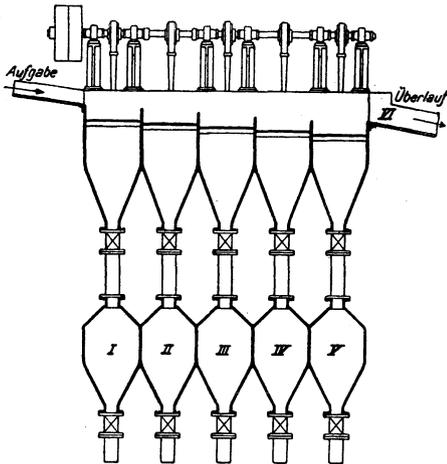


Abb. 6. Versuchsetzmaschine.

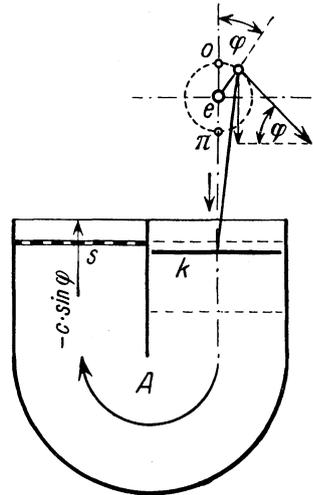


Abb. 7. Schnitt eines Setzkastens.

2. Vorgänge in den Setzmaschinen.

Bei der Aufbereitung durch eine Setzmaschine benutzt man einen abwechselnd aufsteigenden und niederfallenden Wasserstrom, in welchem sich das spezifisch schwerere Material durch schnelleres Niedersinken von dem spezifisch leichteren trennt,

wenn die Korngrößen gewisse Grenzen nicht überschreiten¹⁾. Das Prinzip aller Setzmaschinen erkennt man leicht aus der schematischen Abb. 7, die dem vortrefflichen Buch von F i n k e y, „Die wissenschaftlichen Grundlagen der nassen Erzaufbereitung“²⁾, entnommen ist. A ist ein Vertikalschnitt des eigentlichen sogenannten Setzkastens, der mit Wasser gefüllt ist, das durch den von der Exzentrerscheibe e bewegten Kolben k auf und ab gedrückt wird. (Die augenblickliche Exzenterstellung ist durch den Winkel φ bestimmt.) Das aufzubereitende Gut liegt auf dem festen Sieb s und wird durch den hindurchtretenden Wasserstrom gehoben, und zwar im allgemeinen um so höher, je geringer sein spezifisches Gewicht ist. Nach einigen Hin- und Hergängen des Wassers wird daher das spezifisch schwerere Korn tiefer liegen als das spezifisch leichtere und sich in irgend einer Weise von diesem getrennt abfangen lassen.

Um die Wirkungsweise der Maschine zu verstehen, muß man sich von den Bewegungen der auf dem Sieb liegenden und zeitweise vom Wasserstrom mitgenommenen Körner Rechenschaft zu geben versuchen. Formelmäßig beschreiben kann man sie freilich nur bei vereinfachenden Annahmen, die indessen das Problem nicht wesentlich verändern, so daß die Beschreibung doch zu einem Verständnis führt, aus dem heraus angegeben werden kann, für welches Material die Setzmaschinen brauchbar sind, und zu Resultaten, die mit der Erfahrung übereinstimmen. Die bedenklichste Annahme, ohne die freilich gar nicht weiterzukommen ist, ist die, daß man ein einzelnes Korn auf dem Sieb im Wasserstrom betrachten darf und die Behinderung durch die Nachbarkörner durch einen der sogenannten Endgeschwindigkeit beigefügten konstanten Faktor genügend berücksichtigen kann. Auf sie und andere vereinfachende Annahmen kommen wir zum Schluß zurück (vgl. hierzu d. Bem. im Vorwort).

Wie F i n k e y zeigt, läßt sich der Wert der absoluten Geschwindigkeit v des Kornes zur Zeit t mit guter Annäherung durch

1) Die Setzmaschinen werden zur Trennung von Material sehr verschiedener Korngröße verwendet, von einigen Zentimetern bis etwa 0,5 mm, selten noch weiter.

2) J. Finkey, deutsch von J. Pocsu bay. Verlag Springer, Berlin 1924.

einen Ausdruck angeben, der aus drei Summanden besteht, von denen jeder eine leicht durchsichtige Bedeutung hat. Es ist

$$v = A_1 + A_2 + A_3 = -c \sin \varphi + \vartheta v_0 + \frac{\vartheta v_0 c^2}{2 g_0 r} \cos \varphi \quad \dots (1)$$

und darin ist der erste Summand, $A_1 = -c \sin \varphi$, der Ausdruck für die Geschwindigkeit v_1 des Wasserstromes:

$$v_1 = \beta c_0 \sin \varphi = c \sin \varphi \quad \dots \dots \dots (2)$$

wenn mit c_0 die konstante Umfangsgeschwindigkeit der Exzenterscheibe bezeichnet wird und $\beta (< 1)$ ein Faktor ist, durch den der Unterschied zwischen der Kolbengeschwindigkeit und der etwas kleineren Wassergeschwindigkeit $c \sin \varphi$ Berücksichtigung findet. (Der Kolben schließt den Zylinder nicht so dicht ab, daß nicht Wasser zwischen ihm und der Zylinderwandung entweichen kann.) Die beiden anderen Summanden A_2 und A_3 geben die Geschwindigkeit des Kornes relativ zu der des Wassers an, und von ihnen A_2 die, die das Korn in kurzer Zeit annehmen würde, wenn die Wasserstromgeschwindigkeit zeitlich nicht veränderlich wäre, während A_3 den Einfluß der Veränderlichkeit der Wasserstromgeschwindigkeit berücksichtigt, die sich der Bewegung des Kornes nicht momentan, sondern erst allmählich mitteilen kann. Hätte der Wasserstrom eine konstante Geschwindigkeit, so würde ein einzelnes Korn in ihm infolge der Schwere sehr bald in vertikaler Richtung eine konstante Geschwindigkeit relativ zu der des Wasserstroms annehmen, die man als Endgeschwindigkeit v_0 bezeichnet, nämlich dann, wenn die Beschleunigung durch die Schwerkraft gerade durch die Verzögerung aufgehoben ist, welche durch die Reibung im Wasser verursacht wird, die ihrerseits von der relativen Geschwindigkeit abhängt. Da das Korn in seiner Bewegung durch andere Körner behindert ist, so wird es diese Endgeschwindigkeit freilich nicht voll erreichen. Durch den Faktor ϑ wollen wir diese Behinderung berücksichtigen; mit

$$A_2 = \vartheta v_0$$

ist also die Endgeschwindigkeit des Kornes relativ zur Wassergeschwindigkeit gemeint.

Infolge der Trägheit des Kornes nun wird bei einer Änderung der Wassergeschwindigkeit, die in unserem Fall vorhanden ist

(φ ändert sich ja mit der Zeit), das Korn nicht momentan dieser Änderung ganz folgen; die relative Geschwindigkeit wird um einen Betrag verändert, der durch das dritte Glied A_3 gegeben ist, worin r die Größe des Wasserhubes und g_0 mit der Fallbeschleunigung $g = 981 \text{ cm/sec}^2$ des sich bewegenden Kornes durch

$$g_0 = g \frac{\delta - 1}{\delta}$$

zusammenhängt. r wird in einfacher Weise durch den Radius der Exzentrerscheibe bestimmt. In dem Augenblick, wo die Wasserbeschleunigung das Zeichen wechselt (durch den Wert 0 hindurchgeht), wird dieser Betrag 0 werden, wie das auch in A_3 durch den Faktor $\cos \varphi$ zum Ausdruck kommt. Das Nachhinken muß um so größer sein, je größer die Masse des Kornes ist, d. h. bei gleich großen Körnern, je größer die Dichte und bei Körnern, deren Endgeschwindigkeit v_0 gleich ist („gleichfällig“), je kleiner die Dichte — denn wie aus Gleichung (3) hervorgeht, s. u., ist in dem Fall angenähert: $d_1 (\delta_1 - 1) = d_2 (\delta_2 - 1)$, wenn d die Korngröße des Materials, δ das spezifische Gewicht bedeutet und sich der Index auf die beiden verschiedenen Sorten bezieht; bei spezifisch gleich schweren Körpern ist das Nachhinken um so größer, je größer das Korn ist. Dies alles kann man unmittelbar auch aus der Formel für A_3 herauslesen.

Bevor wir unsere eigentliche Aufgabe weiter verfolgen, die Bewegung des Kornes im einzelnen zu diskutieren, sei hier ein Wort eingeschaltet über die Größe der Endgeschwindigkeit, eine Größe, die insbesondere für die Möglichkeit der Aufbereitung mit Hilfe von „Stromapparaten“ von Bedeutung ist. Unter gewissen, freilich nach neueren Theorien nicht mehr ganz zutreffenden Annahmen über die Größe der Reibung findet man leicht

$$v_0 = C \sqrt{d(\delta - 1)} \dots \dots \dots (3)$$

mit dem konstanten Faktor C , eine Abhängigkeit, die von der Erfahrung bestätigt wird, wenn man für diesen Faktor den Wert 24,4 einsetzt, solange spezifisches Gewicht und Korngröße (in cm gemessen) so groß sind, daß sich für die Geschwindigkeit (in cm/sec) ein Wert ergibt, der größer ist als ein gewisser kritischer, v_k , den besondere Überlegungen zu $3,1 \sqrt[3]{\delta - 1} \text{ cm/sec}$ ergeben haben. Unterhalb dieser Geschwindigkeit spielt die Reibung in

der Flüssigkeit, wie sich zeigt, eine erheblich größere Rolle, und Rechnung und Erfahrung ergeben eine andere Abhängigkeit, nämlich (in cm/sec):

$$v'_0 = K d^2 (\delta - 1), \quad \text{mit} \quad K = 5450 \frac{1}{\text{cm} \cdot \text{sec}} \quad \dots (3')$$

Anschaulich zeigt Abb. 8 die Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_0 [Ordinate] von spezifischem Gewicht und Korngröße d [Abszisse]¹⁾. Sie gibt Resultate von Richards und Eastman wieder, und zwar bezieht sich die Kurve c auf Bleiglanz, die c_1 auf

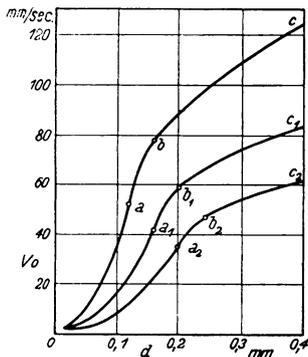


Abb. 8. Endgeschwindigkeit verschiedenen Materials und verschiedener Korngrößen.

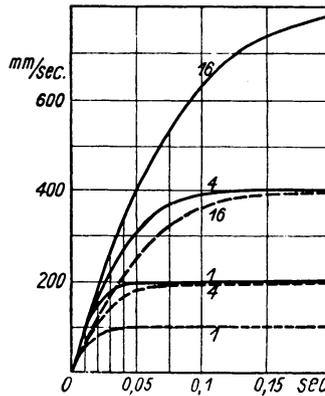


Abb. 9. Geschwindigkeit der Körner im Wasser im Anfang.

Zinkblende, die c_2 auf Quarz; im Stück $a b$ bzw. $a_1 b_1, a_2 b_2$ liegt der Übergang von Formel (3) zu Formel (3'). Um einen Begriff der Geschwindigkeit in gewissen extremen Fällen zu geben, schreibe ich hier die kleine Tabelle her:

		für $d = 0,1 \text{ cm}$		für $d = 1 \text{ cm}$	
Bleiglanz . . .	$\delta = 7,5$	$v_0 = 19,8 \text{ cm/sec}$	$v_0 = 61 \text{ cm/sec}$	$v_k = 5,8 \text{ cm/sec}$	
Quarz	2,6	9,8	30,5	3,6	
Kohle	1,3	4,2	13,5	2,1	

Wie außerordentlich schnell die kleinen Körner übrigens diese Endgeschwindigkeit annehmen, zeigt instruktiv die Abb. 9, die uns

¹⁾ Der bequemeren Schreibweise wegen sind die Korngrößen und daher auch die anderen Längenmaße in den Abbildungen in mm angegeben.

auch zugleich den Verlauf der Geschwindigkeitsänderung angibt. Als Abszisse ist dort die Zeit, als Ordinate die augenblickliche Geschwindigkeit aufgetragen, die Zahlen an den Kurven sind die Korngrößen in Millimetern, die gestrichelten Kurven beziehen sich

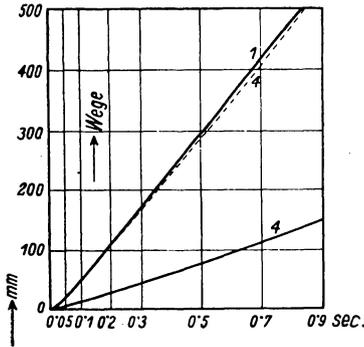


Abb. 10. Wege im aufsteigenden Wasserstrom. (Wassergeschwindigkeit $v = 1$ m/sec.)

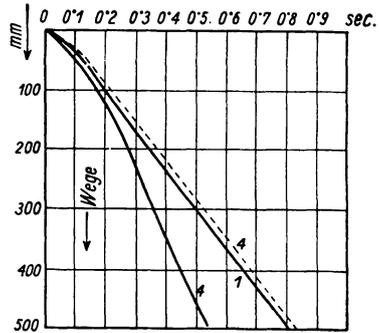


Abb. 11. Fallräume im niedergehenden Strom. ($v = 0,25$ m/sec.)

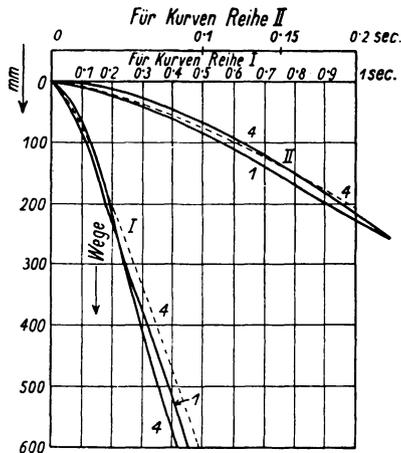


Abb. 12. Fallräume im niedergehenden Strom. ($v = 1,0$ m/sec.)

auf Quarz, die ausgezogenen auf Bleiglanz. In der kurzen Zeit, die nach zehntel Sekunden zählt, in der die Endgeschwindigkeit v_0 erreicht wird, nimmt die Geschwindigkeit des Kornes in der aus den Kurven ersichtlichen Weise mit der Zeit zu, nämlich nach einer hyperbolischen Tangensfunktion, in die spezifisches Gewicht und

Korngröße eingehen. Die drei Bilder, Abb. 10 bis 12, nach Karlik (s. u.), die ohne weitere Erläuterungen verständlich sind, zeigen die verschiedenartigen Verhältnisse, die bei Materialien mit verschiedenem d und δ im auf- und absteigenden Wasserstrom verschiedener Geschwindigkeit eintreten können. Insbesondere zeigt uns Abb. 12, daß im herabfallenden Wasserstrom das Bleiglanz-Korn von 4 mm Korngröße erst langsamer, dann (nach 0,16 sec) schneller als das Quarz-Korn gleicher Größe fällt, während das mit dem Quarz gleichfällige (gleiches v_0), kleinere Bleiglanz-Korn von 1 mm Korngröße von vornherein schneller mitgenommen wird.

Der oben, Gleichung (1), angegebene Wert der Geschwindigkeit v des Kornes führt nun freilich noch nicht zu einem übersichtlichen Bild der Bewegung der Körner; dazu ist vielmehr notwendig, den Weg S zu berechnen, den das Mineralkorn bis zu dem Augenblick t der Exzenterstellung φ zurückgelegt hat. Der Ausdruck dafür ist kompliziert, wenn man nicht einige für die Verhältnisse der Praxis erlaubte Vereinfachungen in die Rechnung einführt. Dadurch gestaltet sich der Wert für S übersichtlicher und nimmt folgenden Ausdruck an:

$$S = \frac{\vartheta v_0 r}{c} (\varphi - \varphi_1) + \frac{\vartheta v_0 c}{2 g_0} (\sin \varphi - \sin \varphi_1) + r (\cos \varphi - \cos \varphi_1).$$

In dieser Gleichung kennen wir alle Größen bis auf φ_1 ; das ist der Winkelwert von φ , bei dem das Korn sich von der Unterlage loslöst. Daß im allgemeinen dieser Wert größer als Null ist, liegt daran, daß eine gewisse Wassergeschwindigkeit notwendig ist, um ein Teilchen vom Sieb nach oben mitzureißen. Wir finden unter der Annahme, daß die Endgeschwindigkeit sich unverzüglich einstellt, φ_1 aus der unschwer ableitbaren Gleichung

$$\sin \varphi_1 = \frac{\vartheta v_0}{c}.$$

Aus dem gleichen Grunde, demzufolge in Gleichung (1) neben A_2 auch A_3 zu berücksichtigen ist, müssen wir freilich dem Zähler noch A_3 zufügen.

Man erkennt den Inhalt des Ausdrucks für S am leichtesten, wenn man für einen oder mehrere bestimmte Fälle S wirklich berechnet. Das ist für ein Bleiglanz- und ein Quarzkorn von der Korngröße 10 mm geschehen. Abb. 13 zeigt das Resultat der

Rechnung. In ihr ist als Abszisse die Exzenterstellung durch Auftragen des Winkels φ , der von 0 bis 2π wachsen kann, angegeben, als Ordinate der Abstand von der Ruhelage (Sieblage). Die Kurve b bezieht sich auf Bleiglanz, q auf Quarz, und die beiden anderen eingezeichneten Kurven w und k geben die zu φ gehörigen Abstände der Wasseroberfläche und des Kolbens von den Ausgangsstellungen an. Wir sehen aus der Abb. 13, daß zwar das

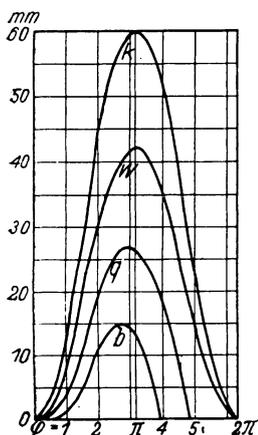


Abb. 13. Wege der Körner auf dem Sieb.

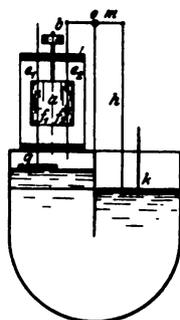


Abb. 14. Indikatorvorrichtung.

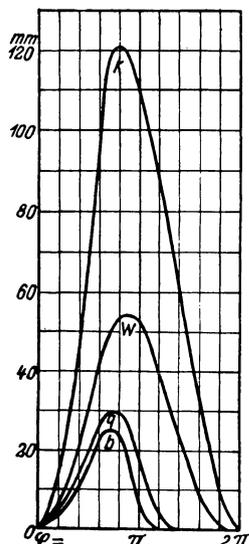


Abb. 15. Wege der Körner auf dem Sieb.

Wasser seine Bewegung bei dem Drehwinkel $\varphi = 0$ beginnt, daß dagegen das Quarzkorn und das Bleiglanz Korn in dem Augenblick noch nicht von der Bewegung ergriffen werden, vielmehr das Sieb erst bei einem Winkel $\varphi_1 = 0,244$ und $0,51$ verlassen. Die größten Steighöhen werden erreicht bei $3,14$ bzw. $2,97$ und $2,74$. Bemerkenswert ist, daß das Ausgangsniveau vom Quarz und Bleiglanz bereits bei $\varphi = 4,8$ und $3,9$ erreicht wird, während das Wasser die ganze Periode bis zum Wert $\varphi = 6,28$ hindurch in Bewegung ist. Das entspricht der Tatsache, daß die absolute Geschwindigkeit des Kornes im aufsteigenden Wasserstrom kleiner ist als im absteigenden.

Mit einer kleinen Versuchssetzmaschine kann man im Laboratorium die Bewegungen studieren und die Resultate nachprüfen. Richards hat mittels eines Indikators an einer solchen Maschine die Bewegungen sich aufzeichnen lassen und eine prinzipielle Übereinstimmung mit den theoretisch abgeleiteten Kurven gefunden. Das Schema seines Indikators erkennt man aus der Abb. 14. Auf der Siebseite des Setzkastens wird eine um eine vertikale Achse drehbare und durch ein Uhrwerk in Rotation erhaltene Trommel a in einem festen Rahmen aufgesetzt. Auf ihrer Mantelfläche, die mit einem Papierstreifen bedeckt ist, schreiben die Federn f_1 und f_2 die Bewegung von Wasser, Setzgut und Kolben auf, indem f_2 von einer Führungsstange e_2 , die über den Arm m mit dem Kolben k verbunden ist, bewegt wird, während f_1 durch e_1 an der Platte g befestigt ist und mit dieser sich bewegt; je nachdem die Bewegung des Wassers durch f_1 aufgezeichnet werden soll, oder die Bewegung des Setzgutes, wird die Platte g aus Kork gewählt, so daß sie auf dem Wasser schwimmt, oder ist sie ein leichtes Drahtsieb, das in das Setzgut eingebettet ist. Mit diesem Indikator aufgenommene Aufzeichnungen sehen wir in Abb. 15. Die Kurven zeigen in der Tat denselben Verlauf wie die theoretisch abgeleiteten.

Fragen wir nun zunächst danach, wovon die größte Höhe der Kurven, also die Höhe, bis zu der die Körner steigen können, abhängig ist. Man erhält leicht den Wert dieses Maximums, wenn man zunächst aus der Gleichung der Geschwindigkeit des Kornes den Winkel φ_0 berechnet, für den die Geschwindigkeit Null wird, und diesen Wert in den Ausdruck für S einsetzt. Man findet bei Vernachlässigung von $\left(\frac{\vartheta v_0 c}{2 g_0 r}\right)^2$ gegen 1 aus

$$0 = \vartheta v_0 - c \sin \varphi_0 + \frac{c}{r} \cos \varphi_0$$

leicht:

$$\sin \varphi_0 = \sin \varphi_1 \left(1 - \frac{c^2}{2 g_0 r}\right).$$

Ich will den etwas umständlichen Ausdruck des Maximums hier nicht anschreiben; schon aus dem Ausdruck von S kann man entnehmen, daß spezifisches Gewicht und Korngröße einen Einfluß auf das Maximum haben werden, wie es die Abb. 13 und 15 auch

zeigen. Um ein anschauliches Bild der Verhältnisse zu erhalten, berechnet man wieder für einige praktisch vorkommende Fälle S_0 und trägt die Werte graphisch auf. In Abb. 16 ist dies geschehen, und zwar für Quarz- und Bleiglanzkörner mit den Korngrößen 1, 10 und 20 mm. Man sieht, wie stark die Steighöhe S_0 wächst bei sonst gleichen Verhältnissen, wenn der Durchmesser abnimmt, und andererseits, wieviel größer die Steighöhen sind bei den spezifisch leichteren als bei den spezifisch schwereren Materialien. Von Bedeutung ist es, wie aus Abb. 16 und den Formeln, die zu ihr geführt haben, entnommen werden kann, daß

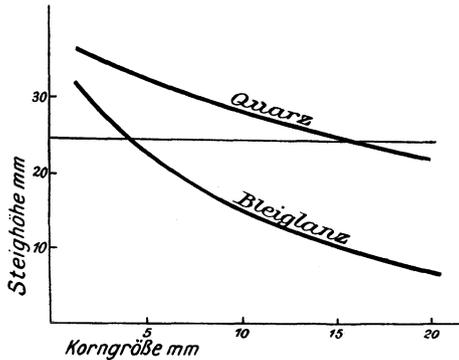


Abb. 16. Steighöhen der Körner.

insbesondere Materialien, die beim freien Fall im Wasser gleiche Endgeschwindigkeit v_0 zeigen, also „gleichfällig“ sind, fast genau gleiche Höhen erreichen; [für Quarz und Bleiglanz folgt aus $d_1(\delta_1 - 1) = d_2(\delta_2 - 1)$ angenähert $d_1 : d_2 = 1 : 4$; die eingezeichnete horizontale Gerade schneidet die beiden Kurven in Punkten mit Abszissen, die sich wie 1 : 4 verhalten], die spezifisch leichteren steigen ein klein wenig höher. Die weitere Diskussion, wie auch Abb. 10, ergibt ferner, daß das spezifisch schwerere die maximale Höhe zu einem ein klein wenig früheren Zeitpunkt durchläuft und von da (vgl. Abb. 12) etwas schneller zurückfällt als das spezifisch leichtere Material, so daß es auch eher auf der Ausgangslage wieder ankommt. Daraus ist zu schließen, daß gleichfälliges Material mit der Setzmaschine gerade noch getrennt werden kann, was wir in der Praxis vielfach zu beobachten Gelegenheit haben. Die wenig verschiedene zeitliche Änderung

des Orts zweier solcher gleichfälliger Körner ist schematisch durch die Kurven in Abb. 17 wiedergegeben.

Daß ganz allgemein, nicht bloß bei gleichfälligem Material, die Wegdifferenz mit zunehmender Geschwindigkeit des Wasserstromes zunimmt, ist aus den Gleichungen leicht abzuleiten und auch unmittelbar verständlich. Man kann also durch Vergrößerung dieser Geschwindigkeit (schnellere Hübe und größere Hubzahl) die wegen der Kleinheit der Wegdifferenz oft schwierige Trennung auch von gleichfälligem Material erleichtern. Da die Wegdifferenz ferner mit der Differenz der spezifischen Gewichte

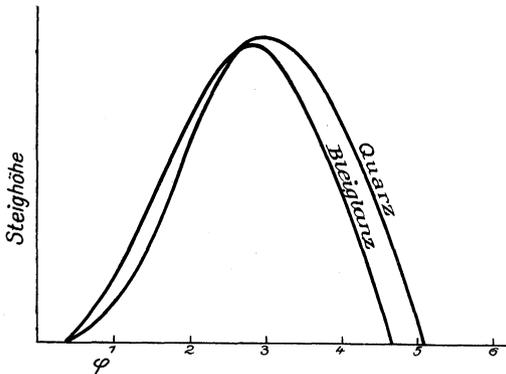


Abb. 17. Wege gleichfälligen Materials.

der zu trennenden Materialien wächst, ist der praktische Erfolg der Setzmaschine um so größer und sicherer, je größer dieser Unterschied ist. Aus Abb. 16 kann man weiter ablesen, daß man zur Trennung kleinerer Korngrößen mit kleineren Hubhöhen auskommen kann, da die Steighöhen mit abnehmender Korngröße wachsen.

Weiter wollen wir prüfen, ob ein günstigstes Wertepaar der Hubhöhe r und Hubzahl n für das Setzverfahren existiert und angegeben werden kann. Als solches werden wir ein Wertepaar von r und n bezeichnen können, bei dem das Produkt aus Wegdifferenz in dem Augenblick, in dem das spezifisch schwerere Material in seinem Ausgangsniveau ankommt, und Hubzahl — denn es kommt auf die Summe der Wegdifferenzen in der Zeiteinheit an — einen maximalen Wert annimmt. Die Beantwortung

der Frage kommt also auf die Lösung der Maximum-Minimum-Aufgabe hinaus, zu bestimmen, wann die Funktion

$$F(n, r) = n \cdot (S_1 - S_2)$$

ein Maximum ist, wenn S_1 und S_2 die momentanen Lagen der Körnersorten, also $(S_1 - S_2)$ die besagte Wegdifferenz sind. In Betracht dessen, daß in der Praxis meist die Hubzahl n durch die Tourenzahl der zur Verfügung stehenden Antriebsmaschine mit nicht allzu großem Spielraum gegeben ist, kann man zunächst die speziellere Frage stellen: Wann ist $F(n, r)$ bei vorgegebenem n

ein Maximum? Das ist der Fall, wenn $\frac{\partial F}{\partial r} = 0$ ist, wodurch für r

eine Bedingung gegeben wird, die sich in Annäherung wohl explizite angeben läßt, indessen gerade wegen der Näherungsrechnung nicht ganz einfach zu diskutieren ist. Wir entnehmen aber wenigstens der Entwicklung, daß zu jeder Hubzahl n wirklich ein be-

stimmter günstigster Wert von $c_0 = \frac{2\pi n \cdot r}{60}$, also auch von r ge-

hört, der von Dichte und Korngröße abhängt. Andererseits kann man auch die günstigste Hubzahl n zu einem vorgegebenen r auf-

suchen, indem man die Gleichung $\frac{\partial F}{\partial n} = 0$ aufstellt. Das günstigste

Wertepaar n, r endlich erhalten wir, wenn wir die Gültigkeit beider Gleichungen fordern, aus denen wir n und r als Funktionen von Dichte und Korngröße berechnen können. R e h w a l d hat sich im Bergmännischen Institut der Bergakademie Clausthal eingehender mit diesem Gebiet beschäftigt, ohne dabei aber infolge der Kompliziertheit der Verhältnisse zu ganz befriedigenden Schlüssen gelangt zu sein. Auch experimentell hat er versucht, mit einer kleinen Setzmaschine und einem Indikator, der dem von R i c h a r d s ähnlich ist, einfache Gesetzmäßigkeiten aufzufinden, wobei er mit einiger Sicherheit wenigstens zeigen konnte, daß $n(S_1 - S_2)$ mit steigender Tourenzahl bei gegebener Hubhöhe und mit steigender Hubhöhe bei konstanter Hubzahl bis zu einem maximalen Wert wächst, von dem sich die Praxis, wie es scheint, nicht allzu weit entfernt. R e h w a l d hat sich auch der weiteren wichtigen Untersuchung gewidmet, festzustellen, in welcher Weise $n(S_1 - S_2)$ sich mit n und r ändert. Im Sinne unserer obigen

Forderung einer genauen Betriebsüberwachung läge es, wenn außerdem nun noch rechnerisch und experimentell geprüft werden würde, welchen Einfluß Änderungen in der Zusammensetzung des Materials und insbesondere die Unterschiede der Korngrößen gleicher Siebklassen auf $n (S_1 - S_2)$ haben.

Der Versuch, theoretisch eine unterste Grenze der Differenz der spezifischen Gewichte und der Korngrößen zu finden, oberhalb deren ein Erfolg des Setzens möglich ist, soll hier nicht gemacht werden in Rücksicht darauf, daß die Grenze für den praktischen Erfolg von Einflüssen wesentlich mit bestimmt wird, die bisher nicht mit berücksichtigt werden konnten; wohl aber mag in Ergänzung des Gesagten eine Regel hier angeführt werden, die Finkey aus mehr qualitativen Grenzbetrachtungen ableiten konnte: „Will man die Gemengteile eines aus zwei Mineralien von verschiedenem spezifischen Gewicht bestehenden Körnergemenges auf der Setzmaschine nach dem spezifischen Gewicht trennen, so kann der Quotient q der zur vorherigen Klassierung dienenden Siebskala ¹⁾, vorausgesetzt, daß δ' größer als δ ist, nach der Formel

$$q = 2 m \sqrt{m}$$

berechnet werden, worin

$$m = \frac{\delta' - 1}{2(\delta - 1)}$$

ist. Besteht das Körnergemenge aus mehr als zwei Mineralien, so ist von den für je zwei Mineralien berechneten Werten von q stets der kleinste Wert zu wählen.“

Aus dem Gesagten ergibt sich unmittelbar, daß man sich nicht grundsätzlich von vornherein bei einer Anlage für das sogenannte deutsche oder englische Setzverfahren entscheiden kann, sondern daß die Wahl von der Beschaffenheit des Materials abhängen muß. Häufig wird das Setzen ohne vorherige Siebklassierung möglich sein (englisches Setzen), insbesondere wenn man mit dem Setzen eine Siebklassierung dadurch verbindet, daß man dem Sieb der Setzmaschinen eine geeignete Lochweite gibt, um das feinkörnige Material so von dem grobkörnigen zu trennen. Häufig wird eine enge vorherige Klassierung notwendig sein

1) Der „Quotient der Siebskala“ ist das Verhältnis der Lochweiten aufeinanderfolgender Siebe.

(deutsches Verfahren), und um so enger wird sie sein müssen, je kleiner in der obigen Beziehung m , also je näher die spezifischen Gewichte der Materialien einander liegen.

Rechnerisch einstweilen schwer zu erfassen sind einige Abweichungen des wirklich ausgeführten Setzprozesses von dem theoretisch behandelten, auf die zum Schluß wenigstens hingewiesen sei.

1. In den Setzkästen befindet sich noch das sogenannte Graupenbett, das aus einer Schicht in das Setzgut eingelagerter, grober Körner (Steine) besteht. Sie scheinen in der Hauptsache die Arbeit des Auflockerns des Setzgutes zu übernehmen, ferner dadurch, daß die Steine die Löcher genügend abschließen, um ein Durchfallen des aufzugebenden Materials zu verhindern, die Benutzung weiterer Löcher des Setzsiebes zu gestatten, so daß dieses dem hindurchtretenden Wasser einen kleineren Widerstand entgegensezt, also die Geschwindigkeit des Wasserstromes und die dadurch bedingte Wirkung auf die Körner verhältnismäßig wenig beeinträchtigt, im Gegenteil, die im allgemeinen günstige Saugwirkung des Wassers bei dem Zusammenfallen der Graupen erhöht (s. a. Punkt 4).

2. Es ist eine dicke Packung von Körnern vorhanden, so daß die Bewegung der einzelnen Körner, die wir betrachtet haben, durchaus und in nicht leicht übersehbarer Weise behindert ist, worauf oben bereits hingewiesen wurde. Daß durch den Faktor ϑ , der aus diesem Grunde dem v_0 beigefügt ist, dem Umstand genügend Rechnung getragen ist, darf man kaum annehmen, wenn es sich bei der Rechnung um mehr als eine qualitative Wiedergabe der Erscheinungen handeln soll. Da bei dem Bewegungsvorgang der Körner eine Auflockerung eintritt, so wird ϑ zu verschiedenen Zeiten des Vorgangs nicht mehr den gleichen Wert haben können. Qualitativ scheint die Bewegung durch Einführung des konstanten Faktors aber einigermaßen richtig wiedergegeben zu werden. Die bemerkenswerte Übereinstimmung der theoretischen Resultate mit dem experimentellen Befund spricht dafür.

3. Wir haben es in Wirklichkeit nicht mit Kugeln zu tun, sondern mit sehr verschiedenartig gestalteten Körnern. Der Widerstand, den diese Körner im Wasser finden, ist vermutlich ein ganz anderer als der der Kugeln, mit dem wir gerechnet haben,

so daß die Übereinstimmung von Theorie und Erfahrung wiederum geradezu verwunderlich ist. Eine Erklärung für diese Übereinstimmung kann vielleicht darin gefunden werden, daß im Mittel der Widerstand der in der verschiedensten Orientierung zum Wasserstrom sich befindenden Körner sich von dem Widerstand, den eine Kugel dem Strom entgegensetzt, nur um einen von der Korngröße nicht merklich abhängenden Faktor unterscheidet.

4. Einen schwer zu erfassenden Einfluß hat endlich die Saugwirkung des Wassers bei der Abwärtsbewegung, die man so überaus deutlich spürt, wenn man die Hand in das auf dem Setzsieb befindliche Material hineinhält. Daß sie auf die Trennung gleichfälligen Materials fördernd wirkt, kann nicht zweifelhaft sein, da das spezifisch schwerere gleichfällige Material, wie wir sahen, wegen der kleineren Masse der Änderung der Bewegung des Wassers schneller folgt und bei dem kleineren Korndurchmesser auch leichter zwischen dem Setzgüt hindurchgesaugt wird.

Man wird im Anschluß an die Betrachtung der Bewegung in den Setzmaschinen sich die Frage vorlegen, ob nicht durch Kombinationen der auf und ab gehenden Wasserbewegung mit einer seitlichen Verschiebung des Setzbettes die Trennung der Körner erleichtert werden kann. Eine Reihe von Möglichkeiten solcher Kombinationen ist im Laufe der Zeit geprüft worden, ohne im allgemeinen zu größeren Erfolgen geführt zu haben, womit freilich nicht gesagt sein soll, daß in der Richtung alles geschehen wäre.

3. Aus der modernen Strömungstheorie.

In Anbetracht der Schwierigkeit, die Bewegungsvorgänge der Teilchen im Wasser ohne tiefere Kenntnis der Reibungs- und Strömungsvorgänge in Flüssigkeiten zu verfolgen, sei es erlaubt, in diesem Zusammenhang einige Worte über die neuere Strömungstheorie einzuschalten, zumal ja bei den Aufbereitungsanlagen wie in den Bergwerken die Verwendung strömenden Wassers und strömender Luft eine besonders große Rolle spielt und häufig mit einer geradezu überraschenden und bedenklichen Energievergeudung verbunden ist. Die Kenntnis und Anwendung der neueren Anschauungen über die Widerstände fester Körper in bewegten Flüssigkeiten und Gasen könnten im Bergbau zwei-

ellos zu einer Energieersparnis führen, weshalb auch mehr und mehr Interesse diesem Gebiete dort entgegengebracht wird.

Das, was bei allen Strömungsvorgängen als das Hauptproblem betrachtet wird, ist die Frage nach den Widerständen, die die festen Körper bei ihrer Bewegung im Wasser oder in einem anderen flüssigen oder gasförmigen Medium erfahren, und die Frage nach dem Druck auf die Wände der Röhren und Gefäße. Wovon hängen Widerstand und Druck ab, und welcher Art ist die Abhängigkeit?

Die zahlreichen Versuche der experimentellen Beantwortung in den vergangenen Jahrhunderten haben zur Kenntnis einer Reihe von Gesetzmäßigkeiten geführt, deren volles Verständnis und einwandfreie theoretische Ableitung erst durch die Prandtl'sche Grenzschicht-Theorie möglich wurde, wenn sie auch mit gutem Erfolg bei der Erledigung vieler Aufgaben der Flüssigkeitsströmung und Reibung, insbesondere der in den letzten Jahrzehnten für die Flugtechnik wichtigen Aufgaben, schon vorher benutzt worden sind. Als für den Widerstand fester Körper wichtigste Resultate des Experiments kann man wohl nennen:

1. Bei gewissen Geschwindigkeiten ist der Druck einer Flüssigkeit auf einen gegen sie in Bewegung befindlichen einfach geformten Körper mit konvexen Begrenzungsflächen proportional dem Quadrat der relativen Geschwindigkeit.

2. Der Druck auf einen einfach geformten Körper mit konvexen Begrenzungsflächen ist bei geometrisch ähnlichen Körpern proportional der Fläche des größten Querschnitts durch den Körper, senkrecht zur Richtung der relativen Bewegung.

3. Der Druck ist unter sonst gleichen Bedingungen proportional der Dichte der Flüssigkeit.

Mit Newton meinte man die Abhängigkeit des Druckes von den Veränderlichen in folgender Weise erklären zu können: Die Teilchen der Flüssigkeit treffen mit der Geschwindigkeit v auf die Fläche F und üben einzeln auf sie einen ihrer kinetischen Energie proportionalen Druck P aus, er wächst also proportional dem Quadrat der relativen Geschwindigkeit, proportional der Dichte δ der Flüssigkeit und proportional der Größe F der Fläche, und zwar der Projektion dieser Fläche auf die zur Bewegungsrichtung senkrechte Ebene. Unbefriedigenderweise ergab die

Newton'sche Theorie den Proportionalitätsfaktor c in der Gleichung des Druckes

$$P = c \cdot v^2 \cdot \delta \cdot F$$

von anderer Größe, als er sich aus der Erfahrung ableiten ließ. Damit war man zwar eine Zeitlang geneigt, sich stillschweigend abzufinden; aber äußerst bedenklich waren die Unstimmigkeiten, die zwischen Theorie und Erfahrung auftraten, als man die Form der Fläche unter Belassung ihrer Größe veränderte. In gleicher Weise aufgestellte, gleich große, ebene Flächen verschiedener Gestalt (z. B. quadratische oder rechteckige) zeigten dem Strom unter sonst gleichen Bedingungen verschiedenen Widerstand. Das Seitenverhältnis einer rechteckigen Fläche war von wesentlichem Einfluß, und — was noch bedenklicher machte — Körper von geometrisch ähnlichem Vorderteil erfuhren einen verschiedenen Druck, wenn der Teil, der sich hinter dem für den Widerstand nach der Newton'schen Theorie als maßgebend gehaltenen, größten Querschnitt befand, verschiedene Form besaß. Die Form der Rückseite konnte in der Newton'schen Theorie ihrer ganzen Grundlage nach keinerlei Berücksichtigung finden, so daß diese sonst so einfache Theorie für die Behandlung tiefer gehender Fragen abgelehnt werden mußte.

Ganz anders als Newton behandelte Euler die Flüssigkeitsströmung, indem er die Flüssigkeit als ein Kontinuum betrachtete und den Verlauf der sogenannten Strömungslinien in der Flüssigkeit verfolgte, Bahnen, auf denen sich die Flüssigkeitsteilchen bewegen und die um den Körper, der in die Flüssigkeit gebracht ist, herumführen. Tritt an irgend einer Stelle in der Strömung ein Zusammendrängen der Stromlinien auf, etwa dadurch, daß die Flüssigkeit durch äußere Begrenzung gezwungen ist, durch einen kleineren Querschnitt zu strömen, so wird die Geschwindigkeit der in den Bahnen sich bewegenden Teilchen zunehmen, so daß z. B. in einer Röhre, die von der Flüssigkeit, den ganzen Querschnitt erfüllend, durchströmt wird, die Strömungsgeschwindigkeit mit Verjüngung des Querschnittes wächst. Eine solche Verjüngung tritt z. B. auch ein, wenn man der Flüssigkeit in einer kalibrischen Röhre irgend einen Körper in den Weg stellt, womit eine Ausbiegung der Stromlinien in der Nähe des

Körpers verbunden ist, so daß eine Geschwindigkeitsänderung eintreten muß (vgl. Abb. 18 und 19). Von einem Widerstand, der an der Wandung der Röhre auftrat, oder den die Flüssigkeit durch den hineingebrachten Körper erfuhr, war in der Theorie nicht die Rede, die nur die Erscheinungen der reibungslosen Flüssigkeiten wiederzugeben vermochte. Mit ihr war also in dieser Form gerade für das uns interessierende Problem der

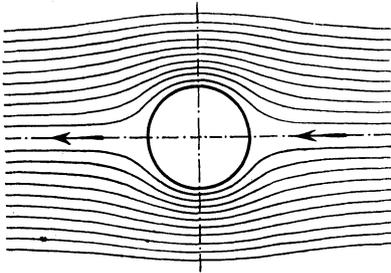


Abb. 18. Strömung um einen Kreiszyylinder.

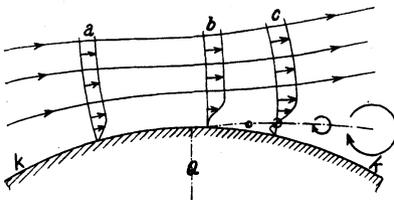


Abb. 20. Zur Theorie der Grenzschicht.

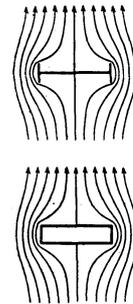
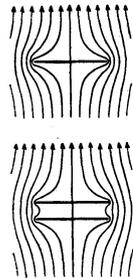


Abb. 19. Strömung um Platten.

Größe des Widerstandes nicht viel anzufangen. Immerhin gibt sie selbst im Hinblick auf das Problem unmittelbar einen Fingerzeig, an welcher Stelle sie vervollständigt werden muß, wenn sie dieses Problem umfassen soll. Wenn man die Flüssigkeitsströmung in unmittelbarer Nähe der Wandung einer Röhre genauer betrachtet, so erkennt man, daß die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsteilchen um so kleiner ist, je näher sie sich der Wandung befinden. Ein Teil der kinetischen Energie wird von der Wandung aufgezehrt und geht der Flüssigkeitsströmung durch die Reibung verloren. Die Teilchen der Flüssigkeit haben nämlich neben der fortschrei-

tenden Bewegung der Flüssigkeitsströmung noch eine unregelmäßige hin und her gehende Bewegung, in der sie mit anderen Teilchen zusammenstoßen und in der sie, wenn sie nur der festen Wand nahe genug sind, an diese anrennen, dabei einen Teil ihrer kinetischen Energie an die Wand abgebend. Man bezeichnet die Schicht, in der in senkrechter Richtung zur Wand eine Geschwindigkeitsänderung zu bemerken ist, in der also die Reibung wirksam wird, als *Grenzschi c h t*, und offenbar kann nur die genaue Behandlung der Erscheinungen in der Grenzschi c h t zu brauchbaren Formeln für die Gesetzmäßigkeiten der Strömung und Reibung führen. Es ist *P r a n d t l s* ¹⁾ Verdienst, durch konsequente Verfolgung der Vorstellungen über die Ausbildung einer solchen Grenzschi c h t diese Vorgänge geklärt zu haben. In Abb. 20 sehen wir das Bild der Strömungslinien einer reibungslosen Flüssigkeit in der Nähe einer zu der Flüssigkeitsströmung relativ bewegten Kugeloberfläche $k - k$; wie in dem Strömungsbild Abb. 18, tritt in der Ebene des größten zur Strömung senkrechten Querschnitts Q eine Zunahme der Dichte der Strömungslinien auf, und die Geschwindigkeit der Strömung muß nach dem oben Gesagten bis zu diesem Querschnitt zu-, dann abnehmen. Es muß — das ist die übliche Betrachtungsweise — der Gegendruck bis zu dem Querschnitt abnehmen (sonst könnte eine Beschleunigung in der Richtung ja nicht entstehen), hinter ihm zunehmen. Dieser von dem Querschnitt an auftretende Gegendruck (man kann statt dessen auch sagen: die Erweiterung des dem Flüssigkeitsvolumen zur Verfügung stehenden Raumes) verursacht, daß die Geschwindigkeit weniger steil in Richtung senkrecht zur Oberfläche abfällt, so daß statt des Geschwindigkeitsprofils a das Profil b sich ausbildet. Die weitere Folge ist die, daß Flüssigkeitsteilchen sich überhaupt aus der Grenzschi c h t entfernen und in das Innere der ungestörten Flüssigkeit begeben, so daß in die Grenzschi c h t von rückwärts der Kugel Flüssigkeitsteilchen einströmen (Profil c) und dadurch eine Wirbelung veranlassen. An dieser Wirbelung, die abgetrennt von der durch die Stromlinien dargestellten Strömung zunächst in der Grenzschi c h t am Körper bleibt, beteiligen sich mehr und mehr

¹⁾ Vgl. L. Hopf, Handb. d. Phys. 7, 91, 1927; ferner A. Beetz, Die Naturwiss. 14, 1228, 1926; L. Prandtl, ebenda 13, 93, 1925; 14, 335, 1926; L. Prandtl und O. Tietjens, ebenda 13, 1050, 1925.

von den in der Strömung ankommenden Flüssigkeitsteilchen, bis der Wirbel einen solchen Umfang angenommen hat, daß der ganze Raum zwischen den Stromlinien, die außerhalb der Grenzschicht verlaufen, mit Wirbeln erfüllt ist. Die Flüssigkeitsmengen, die aus diesem Wirbelgebiet (durch Reibung) mit weggeführt werden, werden immer wieder ersetzt durch Flüssigkeitsteilchen, die, von vorn kommend, in die Wirbel eintreten und immer wieder neue kinetische Energie an das Wirbelgebiet abgeben. Erst in einer gewissen Entfernung vom Körper gehen die beiden Gebiete der Wirbel und der Stromlinien ineinander über, nämlich dort, wo die

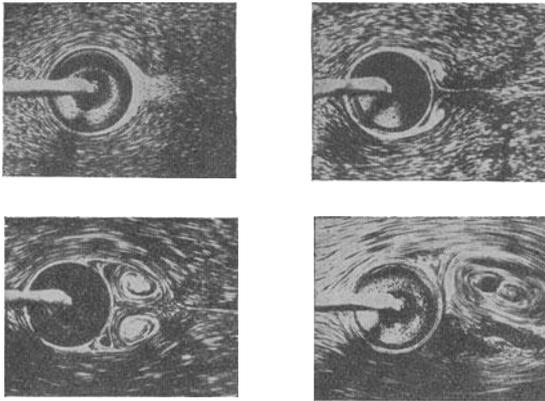


Abb. 21. Wirbelbildung am Zylinder.

Energie der Wirbel durch Reibung aufgezehrt ist. Da der Druck in dem Wirbelgebiet kleiner ist als der außerhalb, so erfährt der Körper einen Zug in dieses Gebiet hinein, der bei der Bewegung des Körpers gegen die Flüssigkeitsströmung überwunden werden muß. Die Energie dieser Bewegung findet sich wieder in der der Wirbel, wie auch eine genaue Berechnung zeigt. Bei kleiner relativer Geschwindigkeit bildet sich nur eine kleine „Wirbelschlepe“ am Ende des Körpers aus, die Wirbel lösen sich an weit zurückliegenden Stellen des Körpers ab. Mit wachsender Geschwindigkeit rückt die Ablösungsstelle weiter nach vorn. Leicht einzusehen ist es bei dieser Betrachtungsweise, daß der Widerstand eines Körpers in einer strömenden Flüssigkeit geringer werden wird, wenn die Form des Körpers so ausgebildet ist, daß sich die

Stromlinien an die Oberfläche gut anschließen können und ein Wirbelgebiet nicht zustande kommen lassen. Der Widerstand, den ein solcher Körper bietet, rührt dann, wenigstens bei Benetzung des Körpers durch die Flüssigkeit, nur noch von der Kraft der inneren Reibung der Flüssigkeit her, die die Geschwindigkeitsänderung der Strömung in der Grenzschicht bestimmt und die

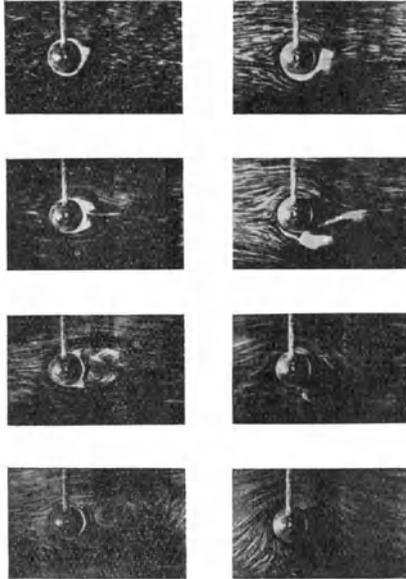


Abb. 22. Wirbelbildung am rotierenden Zylinder.

mit der Begrenzungsfläche zwischen Flüssigkeit und Körper natürlich wächst.

Sehr schön sind die Wirbelgebiete hinter den in eine strömende Flüssigkeit gehaltenen Zylindern in Abb. 21 zu sehen; die vier abgebildeten Fälle unterscheiden sich durch die Geschwindigkeit der Flüssigkeitsströmung. Auch die Abb. 22 zeigen in vorzüglicher Weise die Ablösung der Wirbel. Komplizierter sind die vier rechts stehenden Abbildungen, die gewonnen wurden, als der in relativer Bewegung zur Flüssigkeit befindliche Zylinder um seine Achse rotierte; da die Grenzschicht mitgenommen wird, tritt auf der einen Seite ein Stauen ein und eine Druckvermehrung auf, die den Zylinder senkrecht zur Strömung zu bewegen trachtet.

Diese Strömungsvorgänge sind bekanntlich von Flettner zur Bewegung seines Rotorschiffes benutzt worden.

Man kann die Ausbildung dieser Wirbel, die sich z. B. ebenfalls zeigt, wenn eine Flüssigkeit aus einem engeren Rohr in ein weiteres strömt (sogar auch bei allmählichem Übergang der lichten Weiten), unterdrücken, wenn man in irgend einer Weise dafür sorgt, daß der Druckanstieg an der Erweiterungsstelle nicht zustande kommt. Man kann z. B. an der Erweiterungsstelle durch kleine Öffnungen in der Rohrwand Flüssigkeit absaugen, eine äußerst wichtige Maßregel, die bei der Bewetterung von Berg-



Abb. 23. Strömung
im Kanal.



Abb. 24. Einseitige
Grenzschichtablösung.



Abb. 25. Zweiseitige
Grenzschichtablösung.

werken Anwendung finden kann. Man spricht in diesem Fall vom Absaugen der Grenzschicht. Der Einfluß dieses Absaugens ist deutlich in Abb. 23 bis 25 zu sehen. Abb. 23 zeigt den normalen Verlauf der Strömung an einer Erweiterung eines oben offenen Kanals; Abb. 24 den durch Absaugen der Grenzschicht an der linken Seite veränderten Verlauf; Abb. 25 die fast vollständige Erfüllung des Kanals mit wirbelfrei strömender Flüssigkeit durch Absaugen an beiden Seiten. Oft freilich kann man schon durch besonders geartete Formgebung bei der Erweiterung des Rohres die Ausbildung größerer Drucke und die damit verbundene Wirbelbildung unterdrücken, wenn die Strömungen nicht gar zu hohe Geschwindigkeiten zeigen.

Wie steht es nun — was schließlich für uns das Wichtigste ist — mit der numerischen Berechnung des Widerstandes, den ein Körper in der strömenden Flüssigkeit erfährt, auf Grund dieser Vorstellungen? Der Gesamtwiderstand besteht offenbar aus zwei

Teilen, 1. dem Widerstand infolge der Oberflächenreibung (Oberflächenwiderstand) an der Grenzschicht, der auch bestehen bleiben würde, wenn durch die „Stromlinienform“ des Körpers die Wirbelbildung vermieden würde (völlig läßt sich das nicht erreichen), und 2. dem Widerstand infolge der Wirbelbildung (Formwiderstand). Man ist gewohnt (in Anlehnung an die Newtonsche Formel für den Widerstand und deren annähernde Bestätigung durch das Experiment), aus beiden Teilen den Faktor $v^2 F \delta / 2$ herauszunehmen, wenn v die relative Geschwindigkeit bedeutet, δ die Dichte der Flüssigkeit und F im ersten Fall die flächenhafte Ausdehnung in Richtung der Strömung, im zweiten Fall die senkrecht zur Strömung (z. B. größte Querschnittsfläche). Der Rest ist ein Faktor w_0 , der, wie die Theorie lehrt, noch von v , den Ausmaßen des Körpers und der inneren Reibung μ der Flüssigkeit abhängt, aber bei geometrisch ähnlichen Körpern völlig bestimmt wird von dem Verhältnis der bei dem speziellen Fall auftretenden Reibungs- und Trägheitskräfte, also einer Zahl, die proportional ist $\frac{\delta v l}{\mu} = R$, indem die Reibungskräfte proportional $\mu \frac{v}{l}$, wenn l eine die Größe des Körpers kennzeichnende Länge ist (es handelt sich ja um geometrisch ähnliche Körper), und die Trägheitskräfte proportional $\delta \frac{v^2}{l}$ gesetzt werden können. Man hat diese Zahl R nach dem, der ihre Bedeutung, allerdings bei anderen Strömungsproblemen, zuerst erkannte, Reynoldsche Zahl genannt. Dieser restliche Faktor w_0 im Ausdruck des Formwiderstandes — und dieser spielt bei nicht gar zu kleiner Geschwindigkeit v , und wenn die Ausdehnung des Körpers in zur Strömung senkrechten Richtung wenigstens von der Größenordnung der Ausdehnung in Richtung der Strömung ist, die Hauptrolle — ist bei kleinen Zahlen R nahezu proportional $1/R$, bei höheren Zahlen (in sehr weitem Bereich) konstant, und nimmt bei noch erheblich höheren, bei denen infolge des großen v und kleinen μ die Ablösungsstelle in Richtung der Strömung mitgerissen wird, ziemlich plötzlich ab, um dann bei weiterem Wachsen von R wieder einigermaßen konstant zu sein. Man hat die Abhängigkeit des w_0 von R für einige Körperformen experimentell bestimmt und

ist so in der Lage, zuverlässige Angaben über die Größe des Widerstandes fester Körper solcher Form in Flüssigkeiten zu machen.

In die Formeln des vorigen Abschnitts ging durch die Größe v_0 (Endgeschwindigkeit) der Reibungswiderstand des Materials ein. Wir erkennen aus den Ausführungen des vorliegenden Abschnittes, daß er durchaus nicht allein von der durch die Siebe bestimmten Korngröße abhängt, sondern auch von der äußeren Form. Es ist daher nicht verwunderlich, daß für C in dem Ausdruck

$$v_0 = C \sqrt{d(\delta - 1)}$$

je nach der Form des Materials experimentell verschiedene Werte gefunden worden sind. Finkey gibt für kugelige Körner an: $C = 29,7$, für flache 21,2, was bei Bestimmung der Gleichfälligkeit natürlich zu beachten wäre. (v_0 in cm/sec).

Daß die Grenzschichtvorgänge bei allen naßmechanischen Aufbereitungsmethoden, bei denen insbesondere von der verschiedenen Reibung fester Teilchen in Flüssigkeiten Gebrauch gemacht wird (neben den Setzmaschinen kommen in Betracht z. B. die Herd- und die Schwimmaufbereitung), eine Rolle spielen werden, ist selbstverständlich. Eine nicht geringere Bedeutung haben (wie schon eingangs hervorgehoben) die moderne Strömungslehre und die vielen ihr zugrunde liegenden Versuche für die in der Praxis so häufig vorkommende Luft- und Wasserströmung in Röhren und Gängen (Bewetterung, Führung der Strömung zu und von Elektrofiltern und dergleichen mehr). Es handelt sich, um dieses Gebiet zum Schluß noch kurz zu streifen, da es für Aufbereitungsanlagen von Wichtigkeit ist, dabei einmal auch wieder um die Frage nach dem Widerstand, diesmal dem Widerstand des flüssigen oder gasförmigen Mediums in glatten oder rauhen Röhren, und dann um die Verschiedenheit der Geschwindigkeit an verschiedenen Stellen des Querschnitts. 1. Was den Widerstand in Röhren betrifft, so wurde schon gezeigt, daß Ecken und Winkel und plötzliche Querschnittsveränderungen durch die dabei auftretenden Wirbel als Energieverlustquellen vermieden werden müssen. Als Druckverlust längs eines Rohres konstanten Querschnitts ergibt sich ein Ausdruck, der wieder dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist und als Proportionalitätsfaktor

einen von der Reynoldschen Zahl, außerdem von der Rauheit der Wandung des Rohres abhängigen Koeffizienten besitzt. Beobachtungen haben gezeigt, daß dieser Koeffizient einer Potenz von $1/R$ recht genau proportional ist, die aber bemerkenswerterweise unterhalb eines gewissen „kritischen“ Wertes von R ¹⁾ eine andere (höhere, nämlich 1) ist als oberhalb dieses Wertes [wo sie 0,25 bis 0,27 beträgt] ²⁾. Diese Eigentümlichkeit hängt damit zusammen, daß es zwei verschiedene Arten von Strömungen in Röhren gibt, eine „laminare“ und eine „turbulente“. Die erstere verläuft ruhig, mit einer Geschwindigkeit, deren Größe in parabolischer Abhängigkeit von der Stelle des Querschnitts ist, und die mit Hilfe des sogenannten Poiseuilleschen Gesetzes berechnet werden kann. Bei der turbulenten Strömung gilt dieses Gesetz nicht mehr; der Strömungswiderstand wird größer, die Strömung selbst unruhiger; Flüssigkeitsfäden lassen sich nicht mehr in ihr erhalten, was man leicht dadurch zeigen kann, daß man in die Flüssigkeit einen Farbfaden einbringt, der sich bei der „laminaren“ Strömung sehr schön in der Mitte hält, bei der „turbulenten“ aber sofort über den ganzen Querschnitt zerteilt. — 2. Von nicht geringerer Wichtigkeit als die Kenntnis des Widerstandes in Rohren ist für die Praxis unter Umständen die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt und die Möglich-

1) Diese kritische Zahl $R = \frac{\delta \cdot v \cdot l}{\mu}$, in der in diesem Fall l den sogenannten Profilradius des Rohres bedeutet und $= \frac{2F}{U}$ mit der Querschnittsfläche F und dem Umfang U des Querschnitts ist, hat den Wert rund 2000 und wird bei Wasser von 10° in einem Rohr von 1 cm Durchmesser bereits bei einer Geschwindigkeit = 26 cm, sec erreicht; bei höherer Geschwindigkeit hat man es in dem Fall also mit Turbulenz zu tun.

2) Dann ist der Druckverlust

$$\Delta p = \frac{0,0791}{\sqrt{2R}} \cdot \delta \frac{L}{l} v^2,$$

mit der empirisch gefundenen Konstanten 0,0791, dem Profilradius l cm, der Rohrlänge L cm und der Dichte der Flüssigkeit δ g/cm³. Im Wetterlaboratorium der Bergakademie Clausthal wurde die Formel von Herrn Trommsdorff an einer verzinkten Blechlutenleitung von 30 cm Durchmesser und 300 cm Länge bei einer Wettergeschwindigkeit $v = 546$ cm/sec nachgeprüft; dabei ergab sich experimentell

$$\Delta p = 0,29 \text{ mm H}_2\text{O-Säule},$$

während er in guter Übereinstimmung damit durch Rechnung 0,31 fand. (Glückauf 1927, S. 374.)

keit, sie gleichmäßiger zu machen. Bei der turbulenten Strömung scheint sie gleichmäßiger zu sein und in der Nähe der Wand weit schneller zu Null abzufallen als bei der laminaren. Es ist ein viel behandeltes Problem, die Verteilung durch besondere Vorkehrungen zu verbessern. Ich erinnere an die Schwierigkeiten, die es lange Zeit machte, die starken Differenzen der Geschwindigkeit im Querschnitt eines Brüdenstromes in Elektrofiltern (s. u.) mit

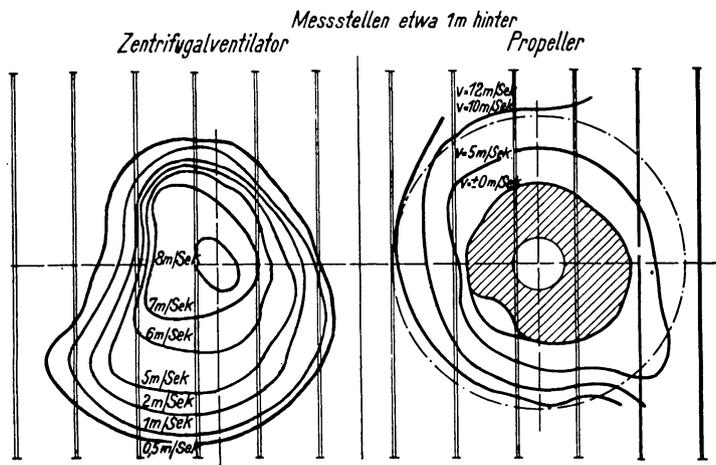


Abb. 26. Verteilung des Brüdenstromes in Elektrofiltern mit künstlichem Zug.

künstlichem Zug zu verkleinern, was nur durch geeignete Düsen für den Eintritt in die Filteranordnung gelang. Wie groß diese Differenzen ohne besondere Maßnahmen sein können, lassen die Abb. 26 erkennen, in denen die Verteilung über den rechteckigen Querschnitt der gezeichneten Ausdehnung angegeben ist ¹⁾.

4. Die Herdarbeit.

Die Herde sind Apparate, bei denen zur Trennung von der Reibung des Materials auf der Unterlage ein wichtiger Gebrauch gemacht wird und die daher anregen, diese Reibung genauer zu studieren. Die Einrichtung eines Herdes, wie er in den Aufbereitungen zu sehen ist, zeigt Abb. 27. Man erkennt deutlich: 1. die

¹⁾ Voigt, Braunkohle. ZS. f. Gew. u. Verw. d. Br. 25, 435 ff. (insbes. S. 448), 1927.

jeder Herdfläche g eigene Neigung gegen die Horizontale von in der Praxis höchstens 8° , die dem Trübestrom, der von geringer Höhe über dem Herd an der einen oberen Ecke auf den Herd herunterfällt, eine Komponente der Bewegung erteilt, und 2. die Vorrichtung zur Querbewegung des Herdes, die dem Strom, insbesondere den festen, darin enthaltenen Teilchen eine zur erstgenannten senkrechte Komponente aufdrückt. Je nach spezifischem Gewicht und Korngröße folgen die Teilchen mehr oder

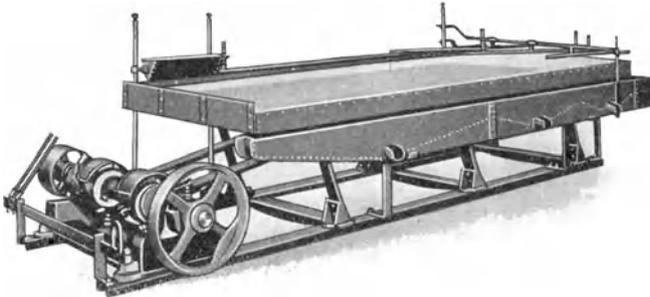


Abb. 27. Herd-Bauart Grusonwerk.

weniger diesen Bewegungen (Richtung p und ε) des Stromes, so daß er sich in mehrere Streifen (von $a_1 a_2$ nach $b_1 b_2$, $c_1 c_2$ usw.) auflöst (Abb. 28), die schräg über die Herdfläche sich hinbewegen und getrennt abgefangen werden können. Der Strom ist von sehr geringer Tiefe, so daß die Bewegung der Teilchen als ein durch die strömende Flüssigkeit hervorgerufenen Wälzen über die Herdfläche anzusehen ist, für das die Reibung der Teilchen auf der Unterlage maßgebend sein muß.

Um den Einfluß der Reibung zahlen- und formelmäßig erfassen zu können, werden wir die beiden Komponenten der Bewegung der Teilchen zunächst getrennt bestimmen müssen, was keine Schwierigkeiten macht.

Sehen wir von der Querbewegung des Herdes ab, so findet man leicht, daß ein Mineralkorn von der Korngröße d , dem spezifischen Gewicht δ und der Endgeschwindigkeit v_0 auf der Herdfläche in kürzester Zeit eine konstante Geschwindigkeit in Richtung der Neigung ε annimmt von dem Wert

$$v = \frac{w d}{H} \left(2 - \frac{d}{H} \right) - v_0 \sqrt{g - \sin \varepsilon} \dots \dots \dots (1)$$

wenn w die mittlere Geschwindigkeit des Wassers, H die (geringe) Tiefe des Wasserstromes, ε die Herdneigung und ρ die Reibungskonstante des Materials auf der Herdfläche bedeutet. Eine besondere Rechnung zeigt, daß man setzen kann

$$w = \frac{\lambda \cdot H \sqrt{\text{tg } \varepsilon}}{\xi + \sqrt{H}} \dots (2)$$

mit den empirisch bestimmbaren Konstanten λ und ξ .

Es ist dabei vorausgesetzt, daß die Endgeschwindigkeit v_0 größer ist als die kritische Geschwindigkeit, die wir früher kennengelernt haben. Ist das nicht der Fall, so nimmt die konstante Geschwindigkeit v den folgenden Wert an:

$$v = \frac{w d}{H} \left(2 - \frac{d}{H} \right) - v_0 (\rho - \sin \varepsilon). (3)$$

Zunächst müssen wir hier aber ein Wort über die Reibungskonstante ρ einschalten und genauer mitteilen, was darunter zu verstehen

ist, und ob man sie etwa bestimmen kann. Die Formeln sind unter der Annahme abgeleitet, daß die Mineralkörner bei der Bewegung über die Unterlage (Herdfläche) im Wasser eine der Bewegung widerstehende Kraft (Reibung) erfahren, die, wie das bei den Vorgängen der trockenen Reibung zweier Körper oft beobachtet worden ist, proportional dem Normaldruck der sich berührenden Körper (also in unserem Falle dem Korngewicht) zu setzen sein wird mit dem Proportionalitätsfaktor ρ , den man als Reibungskonstante in Tabellen angegeben findet. Daß es sich bei den kleinen, für die Setzarbeit in Frage kommenden Korngrößen ($d < 2 \text{ mm}$) um die gleitende, nicht die rollende Reibung handelt, konnte Finkey entgegen der Ansicht von Rittering er und v. Sparre wahrscheinlich machen. Als Wert mag man nach Finkey mit Rücksicht darauf, daß die Bewegung im Wasser stattfindet, in den praktisch vorkommenden Fällen 0,2

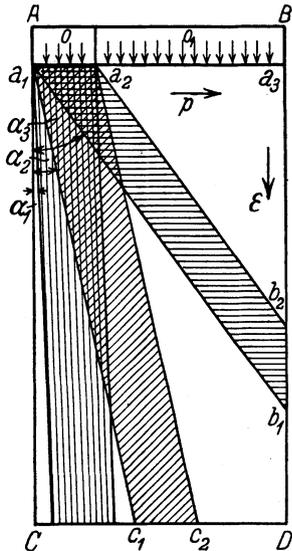


Abb. 28.

Zur Trennung auf dem Herd.

(bis 0,3) benutzen. Die Resultate, die auf dieser Annahme beruhen, werden von der Erfahrung zweifellos recht befriedigend bestätigt. Trotzdem kann man aber doch sehr beachtliche Bedenken gegen diese Annahme über ρ nicht unterdrücken, die wohl so lange aufrechtzuerhalten sein werden, als es nicht gelingt, die Reibung der kleinen Mineralkörper auf der Unterlage im Wasser wirklich zu messen; man hat es offenbar nicht eigentlich mit der „trockenen“ Reibung zu tun, sondern mit Flüssigkeitsreibung, da Herdoberfläche und Mineralkörner mit Wasser überzogen sind, und diese wird in ganz anderer Weise von Normaldruck, Oberfläche usw. beeinflußt als die trockene Reibung. Im allgemeinen ist 1):

„Trockene“ Reibung	Flüssigkeitsreibung	
Proportional dem,	Unabhängig von dem	Normaldruck
Unabhängig von der,	Proportional der	Geschwindigkeit
Unabhängig von der,	Proportional der	Größe der Gleitfläche
Abhängig von der,	Unabhängig von der	Rauhigkeit der Gleitfläche
Größer als für die weitere Bewegung;	Null	bei Beginn der Bewegung

Besonders unübersichtlich und einer Theorie schwer zugänglich sind aber die Verhältnisse noch deshalb, weil gerade Wasser sich unter Umständen ganz anders verhalten kann wie die als Schmiermittel bekannten Flüssigkeiten, für die die angegebenen Regeln einigermmaßen gelten. Auf die Durchrechnung der Theorie mit der Annahme, daß die Reibungskraft sich ähnlich der in der Flüssigkeit bemerkbaren Reibung verhalte, die, wie es scheint, auf nicht ganz leicht übersehbare Resultate führt, kann hier noch nicht eingegangen werden. Zweckmäßig wäre es, bei der Kompliziertheit des Problems und bei besonderen Annahmen über den Vorgang der Reibung zunächst ihre direkte Bestimmung in Fällen, die der Praxis entsprechen, zu versuchen, was bisher noch in keiner Weise gelungen ist. Insbesondere würde es sich darum handeln, auch die Reibung auf einer Herdoberfläche mit wellenförmigem Profil zu bestimmen bzw. die Einflüsse der Rauheit der Oberfläche und der Größe des Kornes auf die Reibung; vermutlich verursacht hier der

1) Th. Pöschl, Handb. d. Phys. 5, 486, 1927.

Wasserstrom eine wälzende Bewegung der Körner, die eine andere Art von Widerstand erfahren wird als die gleitende. Mit solcher wälzenden Bewegung haben wir es ohne Zweifel zu tun bei den Rinnenwäschen, auf die wir zum Schluß dieses Abschnitts kurz eingehen wollen.

Offenbar können wir die Neigung der Herdfläche so wählen, daß $\sin \varepsilon = \varrho$ ist; nach Formel (1) kommt dann dem größeren Korn die größere Geschwindigkeit zu, und, falls wir es mit gleichfälligem Material zu tun haben, wird das spezifisch schwerere Material hinter dem leichteren zurückbleiben. Eine Anreicherung wäre prinzipiell möglich; aber wie leicht erkannt werden kann, nur in geringem Maße. — Man könnte die Neigung auch so wählen, daß die Geschwindigkeit v des einen Materials 0 wird, während die des anderen von größerem Korn (bei Gleichfälligkeit die des spezifisch leichteren) einen positiven Wert besitzt, so daß sich diese Körner abfangen lassen. In der Praxis ist es auch so nicht möglich, eine Trennung des schwereren vom leichteren Material durchzuführen, denn wie die Erfahrung lehrt, reißen in diesem Fall die größeren, leichteren Körnchen die kleineren, schwereren mit sich. Unabhängig von der Wahl der Neigung, nur vorausgesetzt, daß $\sin \varepsilon < \varrho$ ist, gilt ferner ganz allgemein bei Gleichfälligkeit, daß das spezifisch schwerere Material hinter dem leichteren zurückbleibt; Abweichungen von dieser Regel treten freilich in der Praxis dadurch auf, daß in Wirklichkeit v_0 zwischen zwei Grenzen schwankt, so daß unter Umständen einige schwerere Körner ein größeres d besitzen als einige leichtere, die nach der Gleichfälligkeit sortiert sind, was besonders bei der feinsten Trübesorte bemerkbar wird.

Versetzen wir nun den geneigten Herd in eine solche stoßartige Querbewegung, daß die Körner in dieser Richtung mit der Geschwindigkeit c fortgestoßen werden (Abb. 29), so wird sich das schwerere Material, da es in Richtung der Neigung zurückbleibt, in einer Richtung über die Herdfläche bewegen, die zu der Neigungsrichtung ε einen größeren Winkel α bildet als die, in der sich das leichtere Korn bewegt (Winkel β). Diese seitliche Bewegung der Körner wird bei den Stoßherden durch folgende Einrichtungen erzwungen, die auch in Abb. 30 ersichtlich ist. Der Herd erfährt zunächst einen Ausschub durch eine Daumenscheibe D , während-

Verhältnis der Reibungsbeschleunigung p des Mineralkorns zu der Beschleunigung γ der Herdfläche im ersten Augenblick des Rückstoßes, und diese beiden Beschleunigungen findet man durch folgende Überlegung: die Reibungskraft ist der Druck auf die Unterlage, multipliziert mit der Reibungskonstante, also $= m g_0 \varrho$; die Reibungsbeschleunigung also $= g_0 \varrho$. Die Herdbeschleunigung ist die Federkraft am Ende des Ausschubes, dividiert durch die Herdmasse M , also $= \gamma = \beta a/M$, wenn a die Dehnung der Feder ist und β ein Proportionalitätsfaktor. Für die mittlere Geschwindigkeit c in horizontaler Richtung, die sich mit v zur Resultierenden zusammensetzt, findet man aus s , wenn die Periode eines Herdstoßes die Zeit T hindurch dauert: $c = \frac{s}{T} = \frac{s \cdot n}{60}$, wenn n die Stoßzahl des Herdes in der Minute bedeutet. T besteht aus den drei vorhin charakterisierten Teilen der Herdbewegung, deren erster (Ausschub) $= a/u$ ist bei der Geschwindigkeit u des Ausschubes, und deren zweiter und dritter sich zu $\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{az}{g_0 \varrho}}$ ergibt, wenn, was in der Praxis die Regel, $z \leq \frac{2}{\pi}$.

Aus der Formel für den Weg des Mineralkorns während einer Sekunde ersehen wir die Abhängigkeit des Weges von dem spezifischen Gewicht und — was besonders wichtig und interessant ist — daß er allein durch das spezifische Gewicht, nicht durch die Korngröße des Materials, bestimmt wird, vorausgesetzt, daß den Körnern die gleiche Reibungskonstante zukommt. Denn es hängt c , wie sich verfolgen läßt, nur von z ab, und dies wieder ist durch g_0 des Kornes, also durch δ völlig festgelegt (es ist $z_1 : z_2 = g_{01} : g_{02}$). Es ergibt sich, daß c für das spezifisch schwerste am größten ist, ferner, daß der Geschwindigkeitsunterschied zweier verschieden schwerer Körner den größten Wert annimmt, wenn der Beschleunigungs-Koeffizient z des spezifisch schwereren Mineralkorns $z = \frac{2}{\pi}$ ist. Daraus ergibt sich weiter, daß die Trennung am vollkommensten durchgeführt werden kann, wenn die Anfangsbeschleunigung des Herdes das $\pi/2 = 1,57$ fache von der Reibungsbeschleunigung des spezifisch schwersten Mineralkorns ist. Da die beiden Bewegungen c und v so zusammenwirken sollen,

daß die Resultierende einen endlichen Winkel α oder β (Abb. 29) für die verschiedenen Materialien zur Neigungsrichtung bildet, müssen sie von gleicher Größenordnung sein, und die Forderung, daß der Winkel γ zwischen den beiden Richtungen, in denen die spezifisch verschieden schweren Mineralien wandern, möglichst groß sein soll, läßt sich zur Ableitung einer Beziehung zwischen c und den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 der beiden Körnersorten benutzen, bei deren Gültigkeit die Trennung am günstigsten ist. Sie lautet $c = \sqrt{v_1 \cdot v_2}$. Durch sie ist man weiter in der Lage, c und damit n , bzw. u , festzulegen. Kleine Werte von v_1 und v_2 (d. h. kleines d , feine Trübe) bedingen danach ein kleines c , kleines a und um so höheres n .

Bei der Trennung durch dieses Verfahren spielt offenbar die Reibung, die wir der Einfachheit halber als gleich vorausgesetzt haben, was sicher nicht richtig ist, die Hauptrolle, und man kann sagen, daß die Erfolge des Stoßherdes geradezu davon abhängen, ob man die Reibung richtig gewählt hat, der man durch geeignete Wahl der Herdoberflächenbeschaffenheit einen gewünschten Wert wird geben können.

Prinzipiell nicht wesentlich verschieden von den Stoßherden verhalten sich die Schüttelherde; die Durchrechnung ist allerdings dadurch etwas komplizierter, daß die Reibungsbeschleunigung im Gegensatz zu der bei den Stoßherden zeitlich veränderlich ist. Für die Größe des Verhältnisses der Anfangsbeschleunigung des Herdes zu der Reibungsbeschleunigung des spezifisch schwereren Mineralkorns ergibt sich infolgedessen auch eine etwas andere Bedingung, wenn eine vollständige Trennung erzielt werden soll. Man sollte hier der Frage weiter nachgehen, ob man durch geeignete Stoß- und Schüttelbewegungen der Herde die Mineralkörner nicht zu Bewegungen veranlassen kann, die zu einer leichteren Trennung führen. In jedem Fall hat man es durch die Art der Bewegung der Herde und die Wahl der Oberfläche weitgehend in der Hand, den Körnern bestimmte seitliche Impulse zu erteilen, die für eine Trennung vorteilhaft sein können.

Es liegt nahe, im Anschluß an die Ausführungen über die Herdarbeit einige Worte über die Rinnen- und Rheowäsche der Kohlenaufbereitung zu sagen, Verfahren der Trennung, die sich auch die Reibungskräfte zunutze machen, denen die Körner ver-

schiedenen spezifischen Gewichts in verschiedenem Maße ausgesetzt sind ¹⁾). Ein horizontal in einer weiten Rinne fließender Wasserstrom nimmt Kohle und Berge, die sich am Boden der Rinne befinden, mit. Bei dem Vorwärtswälzen der Körner wühlen sich die spezifisch schwereren immer tiefer ein, während die leichteren in dem Strom allmählich die obere Schicht bilden. Die Wirkungsweise ist aus Abb. 32 leicht ersichtlich. Eine

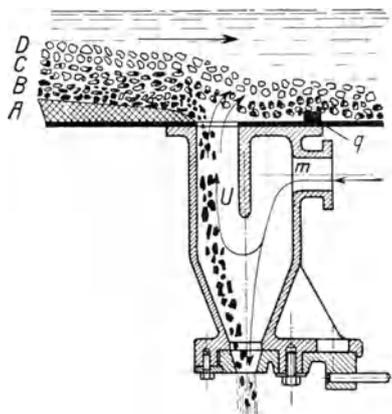


Abb. 32. Wirkungsweise eines Feinkohlen-Rheoapparates.

schwerste Schicht *A* wird von dem Strom überhaupt nicht mitgenommen; die etwas leichteren Körner in Schicht *B* wälzen sich langsam bis zu der Öffnung des Troges *U* vorwärts; die nächsten Schichten *C* und *D* werden über diese Öffnung dadurch hinübergebracht, daß aus der Öffnung ein schwacher, von *m* herkommender Strom nach oben austritt, der sich außerhalb des Kastens *U* mit dem horizontalen Strom vereinigt. Die Strömung und die Bewegung der Körner werden durch den Querriegel *q* reguliert, der vor- oder zurückgeschoben werden kann und die Stärke des Stromes am Grunde der Rinne beeinflußt. Offenbar erfährt bei einer solchen Vorrichtung ein Teilchen durch den horizontalen Strom einen Anstoß *p*, der um so größer sein wird, je größer die Geschwindigkeit *v* des Wassers und je größer die Angriffsfläche *F* (etwa die Projektion des Kornes auf eine zur relativen Bewegung

¹⁾ R. Karlik, Rheowaschen. Montan: Rundschau 1926, Nr. 22. (Dort auch frühere Literatur.)

senkrechte Ebene) ist. Vielleicht kann man angenähert setzen: $p \sim v^2 F$. Diesem Anstoß wird das Teilchen folgen, wenn der Widerstand, auf den es beim Weiterwälzen stößt, nicht zu groß ist. Wenn wir in Betracht ziehen, daß dieses Vorwärtswälzen auf der unregelmäßigen Unterlage nur dadurch zustande kommen kann, daß das Teilchen ein wenig angehoben wird, um über ein davorliegendes Teilchen hinweg in die nächste Vertiefung fallen zu können, so werden wir den Widerstand, der zu überwinden ist, der im Wasser wirksamen Masse des Teilchens proportional setzen können, d. h. wenn V das Volumen, δ das spezifische Gewicht ist, proportional $V(\delta - 1)$ mit einem Proportionalitätsfaktor ϱ , der die Bedeutung einer Reibungskonstante hat. Soll eine Bewegung zustande kommen, so muß also

$$p (\sim F \cdot v^2) > \varrho \cdot V (\delta - 1)$$

sein. Je größer δ , um so größer müßte v sein, oder wir können auch sagen, am ehesten werden die spezifisch leichtesten Körner mitgenommen werden.

Die Proportionalitätskonstante, die man als Reibungskoeffizient betrachten kann, wird von der Form der Körner abhängen und kann daher im Fall der Kohlenwäsche für Kohle und Berge verschieden sein und ist zu 0,4 und 0,6 gefunden worden.

Interessant ist es, daß diese Rheowäschen für die verschiedensten Körnergrößen zu gebrauchen sind, wenn die Apparaturen natürlich auch für die Grobkornwäschen (8 bis 80 oder 100 mm) etwas anders ausgeführt sind als für die Feinkohlen- und „Schmand“wäschen, mit denen bis auf 0,05 mm Korngröße gewaschen werden kann. In der Praxis wird eine größere Anzahl von Waschapparaten hintereinander durchlaufen und der Rohkohle das Mittelprodukt oftmals wieder zugesetzt, wodurch ein besseres schichtenweises Absetzen, eine Selbstregulierung und ein sehr gutes Endmittelprodukt erzielt werden.

5. Flotation (Schwimmaufbereitung).

Es ist ein häufig gezeigter Versuch, wenn man eine Nähnadel auf einer Wasseroberfläche schwimmen läßt; trotz des größeren spezifischen Gewichts sinkt sie nicht unter, und man hat den Ein-

druck, als könne sie nicht durch die Oberfläche des Wassers eindringen, weil die Oberfläche eine feste Haut bilde. Man kann dabei bemerken, daß die Oberfläche von der Nadel etwas deformiert wird, so daß ein Schnitt durch die Nadel und Oberfläche senkrecht zur Nadelachse stark vergrößert ein Aussehen hat, wie es die Abb. 33 zeigt. Wir erklären diese Erscheinung, indem wir sagen, die Nadel wird von dem Wasser nicht benetzt, weil sie ein wenig gefettet ist; sie drückt dabei die Oberfläche etwas ein, wodurch allerdings im ganzen so viel Wasser verdrängt wird, daß das Gewicht des verdrängten Wassers dem der Nadel vergleichbar wird; außerdem wirkt gegen das Eindringen der Nadel in die Flüssigkeit das Bestreben der Flüssigkeitsoberfläche, infolge der

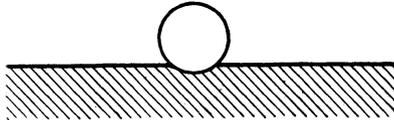


Abb. 33. Nadel auf Wasser (Schnitt).

Oberflächenspannung sich einer Vergrößerung zu widersetzen, die vor dem Zerreißen der Oberfläche eintreten müßte. Ein ähnlicher Vorlesungsversuch ist das Schwimmenlassen von Bleiglanz auf Wasser. Die Verschiedenartigkeit in dem Verhalten der Stoffe dem Wasser gegenüber in der Benetzbarkeit, die Fähigkeit einzelner Stoffe mit einer Dichte, die größer als 1 ist, auf dem Wasser zu schwimmen, wird jetzt häufig und mit wachsendem Erfolg zur Trennung der Stoffe verwendet. Man nennt dieses Verfahren Schwimmverfahren oder Flotation, und es beruht ohne Zweifel auf der Ausnutzung der molekularen Kräfte zwischen verschiedenartigen Stoffen, der Kräfte, die man auch als Adhäsionskräfte zu bezeichnen pflegt. Je nachdem es bei der praktischen Ausführung auf eine Wechselwirkung der Oberfläche eines festen Körpers entweder 1. mit der Oberfläche einer Flüssigkeit, oder 2. mit der Oberfläche einer Flüssigkeit und von Gasblasen, oder 3. mit der Oberfläche zweier nicht mischbarer Flüssigkeiten, oder 4. endlich mit der Oberfläche zweier nicht mischbarer Flüssigkeiten und von Gasblasen ankommt, haben wir es 1. mit dem Verfahren von Macquisten und Wood, oder 2. mit dem von

Potter-Deprat, oder 3. mit dem älteren Elm ore - Prozeß, oder 4. mit der modernen Flotation zu tun ¹⁾).

Die großen Erfolge der Flotationstechnik beruhen hauptsächlich auf empirischen Grundlagen. Eine vollständige Theorie der Erscheinungen gibt es noch nicht, wenn man auch jetzt wohl in der Lage ist, in vielen Fällen sich ein einigermaßen zutreffendes Bild von den Vorgängen zu machen. Man muß, soweit ich sehe, drei Abschnitte bei den Vorgängen dieses Verfahrens voneinander trennen:

1. Adsorption von Öl an der Oberfläche von Erzteilchen,
2. Bildung von Gasbläschen,
3. Vereinigung der Bläschen mit den Erzteilchen und dadurch bedingter Auftrieb;

und der Gesamtvorgang spielt sich wohl etwa folgendermaßen ab: Das der Trübe beigemischte Öl — man bezeichnet es als Kollektor oder Sammler, im Gegensatz zu dem zur Bildung des Schaumes

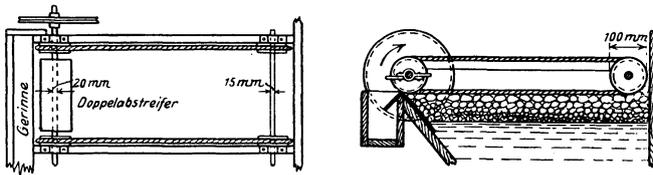


Abb. 34. Schaumabstreifer.

notwendigen Öl, dem Schaumbildner — setzt sich an der Oberfläche der Erzteilchen fest, die vom Wasser nicht benetzt ist, schützt sie also auch weiter vor Wasser, während die nassen Gangteilchen vom Öl frei bleiben. Gerät die Trübe in das nun mit dem Schaumbildner versehene Wasser, in das in Form von Bläschen nach oben steigende Luft oder Gas eingepreßt wird, so schließen sich die geölten Erzteilchen an die von einer Ölhaut umgebenen Gasbläschen an und werden durch sie mit an die Oberfläche des Wasser-Trübe-Gemisches gebracht, von der sie leicht mit dem Schaum abgeschöpft werden können (Abb. 34). Ich glaube, daß diese Vorstellungen, die von der Zerlegung des Vorganges in drei

¹⁾ Eingehend behandelt dieses Verfahren C. Bruchhold, *Der Flotations-Prozeß*. Berlin, Verlag J. Springer, 1927 und P. Vageler, *Die Schwimmaufbereitung der Erze*. Leipzig, Verlag Steinkopf, 1921.

Teilprozesse Gebrauch machen, einigermaßen einleuchtend sind, und man wird versuchen, zu prüfen, ob sie sich im einzelnen auch durch das Experiment stützen lassen; jeder der drei Teilabschnitte enthält überdies Probleme genug.

Kann man, das soll die erste Frage sein, einen Parallelismus zwischen Adsorption und Schwimmvermögen nachweisen? Das wäre zweifellos zu fordern, wenn unsere skizzierten Anschauungen berechtigt sein sollen. Eine Reihe von Arbeiten darüber ist erschienen, die nicht zu eindeutigen Resultaten geführt haben. Trotzdem darf man heute aber wohl diesen Parallelismus als erwiesen betrachten. Bei der Schwierigkeit, die Adsorption von Öl oder Fett an der Oberfläche direkt nachzuweisen, hat man sich zunächst mit indirekten Methoden begnügen müssen, von denen ich als die wichtigste die der Randwinkelmessung nennen möchte, die bereits 1914 im physikalischen Institut der Bergakademie Clausthal¹⁾ und in einer Reihe amerikanischer Institute erprobt worden

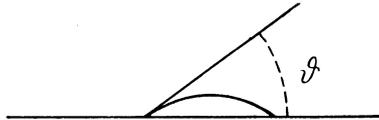


Abb. 35. Randwinkel.

ist. Bringt man einen Tropfen einer beliebigen Flüssigkeit auf die ebene horizontale Fläche eines festen Körpers, so können sich folgende drei verschiedenen Erscheinungen zeigen. Es kann der Tropfen in mehr oder weniger vollkommener Kugelform auf der Platte liegenbleiben, wie Quecksilber auf Glas, oder es tritt vollkommene Benetzung ein, indem der Tropfen auseinanderfließt, oder der Tropfen breitet sich nur über einen mehr oder weniger großen Teil der Fläche aus, mit der die Tangentialebene in der Umrandungslinie an den Tropfen einen ganz bestimmten Winkel θ , den Randwinkel, bildet (vgl. Abb. 35), der um so kleiner ist, je größer die Benetzbarkeit der Fläche durch die Flüssigkeit oder die Adhäsionswirkung ist. Die Überlegung, die es aussichtsreich erscheinen ließ, aus den Randwinkeln auf das Adsorptionsvermögen zu schließen, war nun die: Je nach der Größe des Öladsorptionsver-

¹⁾ S. Valentiner, Physik. ZS. 15, 425, 1914 und Metall und Erz 11, 455, 1914. — H. Schranz, Metall u. Erz 11, 462, 1914.

mögens an der Oberfläche von Erzen und Gesteinen wird das Material mehr oder weniger Öl auf der Oberfläche angesammelt und festgehalten haben, das sich ohne Zweifel in geringen Spuren in der Natur im Gestein findet, bzw. auf dem Weg bis zum Schwimmenlassen des zerkleinerten Materials mit dem Erz in Berührung gekommen ist; eine Oberfläche aber, die Öl oder Fett adsorbiert hat und daher Wasser abstößt, wird mit Wasser einen meßbaren Randwinkel bilden, und einen um so größeren, je stärker der Einfluß des Öls sich geltend machen kann, also je mehr sich an der Oberfläche angesammelt hat. Der Nachweis des Parallelismus zwischen Adsorption und Schwimmvermögen kam also darauf hinaus, wahrscheinlich zu machen, daß ein Material ein gutes Schwimmvermögen zeigen müsse, wenn an ihm Wasser einen großen Randwinkel bildet. Theoretisch kann dies leicht geschehen, wie früher (l. c.) gezeigt worden ist; daß es auch experimentell sich nachweisen läßt, zeigen die in Tabelle 1 aufgenommenen Resultate von Randwinkelmessungen, die auszuführen an sich keine Schwierigkeiten macht, und Messungen des Schwimmvermögens, als dessen Maß die Menge des auf einer Wasseroberfläche schwimmenden Materials bestimmter Korngröße in Prozenten der auf die Wasseroberfläche aufgegebenen Menge betrachtet wurde. Es ist später zuweilen den Randwinkelmessungen die Bedeutung für die Erklärung der Flotationserscheinungen abgesprochen und gegen die Schlüsse eingewandt worden, daß man bei diesen Randwinkelmessungen keine reinen Verhältnisse habe, und daß in der Praxis das Schwimmen nicht auf Oberflächen reinen oder angesäuerten Wassers erfolge, sondern, wenigstens bei der modernen Flotation, unter Benutzung von Schaumbildung. Die Einwände in dieser Form beruhen auf einem Mißverständnis dessen, was beabsichtigt war, und scheinen mir nicht berechtigt; denn einmal mußte es, was das Material anlangt, gerade das Bestreben sein, sich an die Verhältnisse der Praxis anzulehnen (daher: Mineralien verschiedener Herkunft und verschiedener Oberflächenbeschaffenheit, nicht etwa peinlichst gereinigte Oberflächen); und dann kam es darauf an, mit irgend einer Flüssigkeit (daher: reines oder angesäuertes Wasser) einen Parallelismus zwischen Schwimmvermögen und Randwinkel nachzuweisen, der weiter zur Erklärung der Flotation herangezogen

Tabelle 1.
Gegenüberstellung von Randwinkel und Schwimmvermögen.

Material	Fundort	s	θ°	Schwimmvermögen bei der Korngröße		
				0,1—0,65 mm	0,6—1,5 mm	1,5—2,5 mm
Bleiglanz . . .	Clausthal	7,5	71	99%	52%	0%
	Lautenthal			99		
	Michailowitsch			99		
	Umba			99		
Zinkblende .	Untereschbach	4,0	75	99	54	8
	Clausthal			95	49	7
	Untereschbach			71	98	63
Drusenblende .	"		69	93		
Flußspat . . .	Hagenbach a. Z.	3,2	70	97		
	Sarntal			98		
Schwefelkies .	Piemont	5,1	73	99		
	Rammelsberg			58	89	
Meliertes Erz .	"	> 4	59	92		
Quarz	Clausthal	2,7	28	58	78	37
	Ratlinghausen			55	79	
	St. Gotthard ¹⁾			21		
Kalkspat ²⁾ . . .	Clausthal	2,7	etwa 45	56	23	11
	Michailowitsch			" 45	11	
	Umba			" 45	27	
Gips	Dörnten	2,3	25	4		
Muskovit	D.-O.-Afrika	2,9	20	1		
Tonschiefer . . .	Clausthal	2,8	13	6	2	1
	Rammelsberg			10	3	
Grauwacke . . .	Clausthal	2,7	0	8	2	0
Quarzige						
Gangmasse . . .	Untereschbach	2,7	0	2	1	0
Sandstein	"	2,3	0	1	1	0

werden sollte. Äußerst erfreulich ist es natürlich, daß man seitdem gelernt hat, das Adsorptionsvermögen der Mineralkörner zu Öl mit direkteren Methoden zu bestimmen, wodurch andererseits auch der damals nur geahnte Zusammenhang jener Randwinkelmessungen mit dem Adsorptionsvermögen deutlicher hervorgetreten ist. Besonders wertvoll in dieser Richtung ist die Arbeit von K e l l e r m a n n und P e e t z, die im chemischen Institut der Bergakademie ausgeführt wurde, über die im Jahre 1927 auf einer

1) Der Quarz vom St. Gotthard war völlig klar im Gegensatz zu dem von Clausthal und von Ratlinghausen.

2) Bei Kalkspat stellt sich anfangs ein größerer Randwinkel ein, der nach etwa 10 Minuten bis auf etwa 45° sinkt. Ähnlich verhalten sich Muskovit und Gips.

Tagung der D. Metallhütten- und Bergleute zuerst berichtet worden ist. Einwandfrei hat diese Arbeit zunächst für die Systeme Bleiglanz und Quarz mit Caprylsäure ergeben, daß entsprechend dem guten Schwimmvermögen von Bleiglanz und dem schlechten von Quarz auf Wasser Bleiglanz ein bedeutend besseres Adsorptionsvermögen gegenüber der Caprylsäure zeigt als Quarz. Setzt man also z. B. dem Wasser Caprylsäure (übrigens in kleinen Mengen) zu, so wird diese sich an der Oberfläche der in das Wasser gebrachten Bleiglanzkörner festsetzen, nicht aber an der von Quarzteilchen. Enthält das Wasser außerdem einen öligen Schaum, so wird beim Umrühren das geölte Erzteilchen mit den Schaumblasen zusammenkommen, festgehalten und mit dem Schaum an die Oberfläche der Trübe steigen, vorausgesetzt, daß das im Schaum die Luftblasen einhüllende, mit Öl versetzte Wasser eine Adhäsion zu der Caprylsäure zeigt. Man kann nach diesen Beobachtungen erwarten, daß es auch andere Öle gibt, die von den Erzteilchen an der Oberfläche festgehalten werden und die damit die Sammelwirkung ausüben und den Erzteilchen zum Schwimmen verhelfen.

Auffallend war das Resultat insofern, als einige Beobachtungen vorlagen, die zu gegenteiligen Schlüssen Anlaß gaben, z. B. von T r a u b e und seinen Mitarbeitern. Die Clausthaler Herren konnten zeigen, daß diese Schlüsse nicht ganz gerechtfertigt waren, da bei der von T r a u b e angewandten Methode durch nicht-beachtete Sekundärprozesse die eigentlichen Adsorptionsvorgänge verdeckt worden waren. Zu dieser Feststellung konnten die Clausthaler Herren dadurch kommen, daß sie auf vier verschiedene, zum Teil indirekte Weisen die Prüfung auf Adsorption vornahmen. Es wurde die Konzentrationsänderung des mit Caprylsäure versetzten Wassers bei Einbringen von reinem Bleiglanz und von reinem Quarz, eine Änderung, die nur auf die Adsorption zurückzuführen war, gemessen durch Bestimmung 1. der Oberflächenspannung (mittels Stagonometers), 2. des Brechungsquotienten (mittels Interferometers), 3. der elektrischen Leitfähigkeit (nach K o h l r a u s c h s Methode) und 4. der Wasserstoffionenkonzentration (mittels Chinhydronelektrode).

Äußerst reizvoll ist es, der Frage nachzugehen, wie man sich eigentlich diese Adsorption der Flüssigkeit am festen Körper

vorstellen soll, besonders auch im Hinblick auf die Erscheinungen, die man als selektive Flotation bezeichnet. Wie findet sich die Caprylsäure zu den Bleiglanzteilchen hin, warum wird Zinkblende zunächst, solange Bleiglanzteilchen vorhanden sind, durch Caprylsäure nicht gehoben, wohl aber, wenn der Bleiglanz aus der Trübe herausgeschafft ist? Es ist, als ob die Caprylsäure ein Bewußtsein von der Existenz des Bleiglanzes hätte. Wohl wäre dieser Vorgang zu verstehen, wenn Bleiglanz und Zinkblende auf weite Entfernungen Kräfte verschiedener Stärke auf die Caprylsäure ausüben könnten; dann könnte etwa das Bleiglanzteilchen dem Zinkblendeteilchen die Caprylsäure, die sich bereits mit der Zinkblende verbunden hat, wieder abringen. Solche Kräfte bestehen aber keinesfalls, man hat es hier sicher mit molekularen Kräften zu tun, die nur in molekularen Entfernungen wirksam sind.

Es gibt zwei Möglichkeiten der Auffassung über die Vorgänge der Adsorption, ich möchte sie die statische und die dynamische Anschauungsweise nennen. Von ihnen hat in den Diskussionen bisher fast nur die erste eine Rolle gespielt, während wohl doch der zweiten der Vorzug gegeben werden sollte, da die statische nicht ohne sehr gekünstelte Spezialannahmen durchgeführt werden kann. Es handelt sich um folgendes:

Man könnte sich vorstellen — und das wäre die statische Auffassung —, daß ein Bleiglanzteilchen die infolge der molekularen Bewegung an das Teilchen anstoßenden Caprylsäureteilchen festhält, mit vielen solchen Teilchen zusammenstößt und sich auf diese Weise mit einer festen Caprylsäureoberflächenhaut überzieht. Das gleiche sehen wir bei der Zinkblende. Außerdem stoßen nun aber auch Zinkblende und Bleiglanzteilchen zusammen, und dabei nimmt der Bleiglanz infolge seiner größeren und, wie man dann annehmen muß, weiterreichenden Anziehungskraft auf Caprylsäure der Zinkblende die Caprylsäure wieder ab, wodurch die selektive Flotation zustande kommen könnte. Die Beobachtungen von K e l l e r m a n n und P e e t z haben nun weiter ergeben, daß, wenn man diese Betrachtungsweise sich zu eigen macht, Bleiglanz sich mit einer Haut umgeben kann, die bis zu 15—20 Molekellagen dick ist. Das ist eine auffallend dicke Schicht, wenn man an Beobachtungen anderer Adsorptionsschichtenbildungen denkt, indem nämlich mit viel Wahrscheinlichkeit bisher an-

genommen werden konnte, daß Adsorptionsschichten nur aus einer Moleküllage bestehen und die molekularen Anziehungskräfte nicht sehr viel darüber hinausreichen, wie man es auch bei Zinkblende annehmen müßte, um den für die selektive Flotation notwendigen Erfolg im Kampf um den Besitz der Caprylsäure zwischen Bleiglanz und Zinkblende verstehen zu können.

Im Gegensatz dazu stellt man sich bei der dynamischen Auffassung vor, daß die Moleküle des Adsorbendums auch an der Oberfläche des Adsorbens in lebhafter thermischer Bewegung sich befinden und zu einem Teil, wenn sie den Molekülen des Adsorbens sehr nahe kommen, auch an ihnen ganz oder zeitweise haften bleiben, zeitweise, indem sie sich bei dem Aufprall neuer Ölmoleküle wieder ablösen, wofür an anderen Stellen sich andere Moleküle wieder festsetzen. In kurzer Zeit wird sich ein stationärer Zustand einstellen, derart, daß ebensoviel Moleküle der Oberfläche zustreben, wie von ihr sich entfernen, und unter dem Einfluß der Anziehungskräfte der zwei Arten von Molekülen (des Adsorbens und des Adsorbendums) werden sich nun jedenfalls in einem Raumelement dicht an der Oberfläche des adsorbierenden Körpers wesentlich mehr Moleküle des Adsorbendums befinden, als in den entfernteren Raumteilen. Beobachtbar ist ja nur die Verarmung der Lösung an Ölmolekülen infolge dieser Anhäufung von Molekülen in unmittelbarer Nähe der Körperoberfläche, und so ist auch die errechnete Schichtdicke von 15—20 Molekülen eher verständlich ¹⁾.

An der Zinkblendeoberfläche wird nun die Anreicherung viel geringer sein, als an der Bleiglanzoberfläche, die Kräfte werden sehr verschieden groß sein. Sobald der Bleiglanz aus der Trübe herausgeschafft ist, kann die Zinkblende sich mit Ölmolekülen vollsaugen. Man kann sich die Erscheinung auch so vorstellen: der dichteren Packung an der Bleiglanzoberfläche entspricht eine bestimmte Dichte der Ölmoleküle im freien Raum, bei der sich andererseits an der Zinkblendeoberfläche zwar eine ebenfalls

¹⁾ Es kann nicht geleugnet werden, daß auch bei dieser Betrachtungsweise die errechnete Schichtdicke nach den bisherigen Erfahrungen bei Adsorptionsschichtdicken der Vorstellung Schwierigkeiten bereitet, so daß man gern geneigt sein wird, noch andere Einflüsse (vielleicht elektrische) als die der reinen, von andern Stoffsystemen her bekannten Adsorptionskräfte zur Erklärung heranzuziehen. Vgl. d. Bem. i. Vorwort.

dichtere Packung einstellt, die aber lange nicht so dicht ist, wie die am Bleiglanz. Bei dieser Betrachtungsweise wird man verstehen können, daß zunächst nur der Bleiglanz gehoben wird, wenn nicht ein großer Überschuß an Ölmolekülen vorhanden ist, der vermieden werden muß, wenn man Bleiglanz selektiv flotieren will. Nach der Entfernung des Bleiglances wird es nicht weiter schwer sein, mit geringem weiterem Ölzusatz auch die Zinkblende zu heben. Es läßt sich auch vermuten und wird von der Erfahrung bestätigt, daß es Chemikalien gibt, die die Anziehungskräfte zwischen Zinkblende und Ölmolekülen herabsetzen, wenigstens auf einige Zeit. Ich nenne von solchen Hilfsmitteln Schwefel-Natrium oder Cyan-Natrium in Verbindung mit Zinksulfat.

Fragen wir nun nach den Fortschritten, die die Arbeit der Herren K e l l e r m a n n und P e e t z für die Technik darstellt, so wird man zugestehen müssen, daß der Nachweis des Parallelismus von Adsorptionsvermögen und Schwimmvermögen äußerst wertvoll ist. Eine der wichtigsten Bedingungen für die Flotation ist danach zweifellos die Adsorption des Erzteilchens von Öl, und es wäre von Bedeutung, nun experimentell für die verschiedensten Erze Öle zu finden, die von ihnen adsorbiert werden. Gewisse Anhaltspunkte könnte der Chemiker finden, wenn er in der Lage wäre, die an den Erzteilchen im natürlichen Zustand adsorbierten Moleküle ihrer Art nach zu erkennen; leider ist es bisher nicht gelungen, die äußerst dünnen, den Erzteilchen anhaftenden Oberflächenhäute zu analysieren, was besonders wichtig wäre bei einem Material, das als sehr gut schwimmfähig erkannt worden ist. Ohne diese oder ähnliche Anhaltspunkte ist die genannte Aufgabe äußerst umfangreich. Von der Praxis ist sie, freilich rein empirisch, in erfolgreicher Weise bereits angegriffen worden, indem durch praktische Versuche in der Technik eine Reihe von geeigneten Ölen erkannt worden ist. Sehr förderlich wäre es, wenn die wissenschaftlichen Institute, die sich mit der Lösung der Frage beschäftigen, von den Firmen, die in bezug auf die Eigenschaften der Öle und Erze bereits reiche Erfahrung gesammelt haben, durch Zurverfügungstellen dieser Erfahrungen unterstützt würden. Bei noch nicht untersuchten, unbekanntem Systemen von Öl und Erzteilchen wird man jedenfalls nach der durch die Arbeit von K e l l e r m a n n und P e e t z sichergestellten Erkenntnis

gut tun, vor der Verwendung des betreffenden Öles zur Flotation im großen Betrieb die Adsorption der Teile des Systems zu prüfen, wozu die Methoden in der genannten Arbeit ausprobiert und genau mitgeteilt sind. Ergibt die Prüfung eine Adsorption, so darf man annehmen, daß das Material zum Schwimmen gebracht werden kann, vorausgesetzt allerdings, daß das betreffende Öl sich nicht oder nur schwer mit Wasser mischt.

Bevor ich zu der Besprechung der beiden oben genannten weiteren Abschnitte im Flotationsprozeß übergehe, möchte ich von

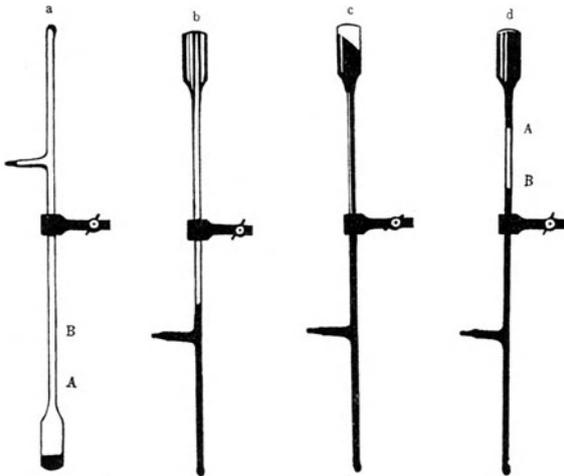


Abb. 36. Adsorption der Kohle.

der Kraft, mit der adsorbierte Teilchen an einer Oberfläche festgehalten werden, durch Hinweis auf ein Beispiel aus dem Gebiet der Adsorption von Gasen an festen Wänden einen Begriff geben, einer Adsorption, die sich allerdings vielleicht (Anm. S. 58) von der vorhin betrachteten etwas unterscheidet ¹⁾. Es ist außerordentlich schwer, von Glaswänden anhaftende Luftschichten zu vertreiben; insbesondere haftet Wasserdampf sehr hartnäckig an Glaswänden, und erst bei der Temperatur von etwa 300° C und scharfem Evakuieren kann man ein Glasgefäß von dieser an der inneren Oberfläche befindlichen Wasserhaut befreien; berühmt ist auch die Adsorptionsfähigkeit der Holzkohle gegenüber Gasen. Man kann nun

¹⁾ S. Valentiner, Elster u. Geitel-Festschrift 1915, S. 284.

durch einen kleinen Versuch sehr schön den Kampf der Kohle und der Glaswand um den Besitz der letzten Reste von Wasserdampf oder Luft vorführen: Das Rohr *a* (Abb. 36) ist unter Erwärmen der Glaswand und der im Gefäß befindlichen pulverförmigen Kohle weitgehend evakuiert und dann zugeschmolzen worden; erwärmt man die Kohle in dem Rohr von außen und kehrt das Rohr nach dem Erwärmen um, so daß die Kohle an der Glaswand herunterfallen muß, so bleibt sie zum Teil an der Glaswand hängen (Rohr *c*); bei dem Erwärmen hat die Luft oder der Wasserdampf, der sich trotz des Evakuierens noch in der Kohle befand, die Kohle verlassen und sich an der Glaswand abgesetzt; bei dem Daranvorbeistreichen der Kohle infolge des Umkehrens des Rohres sind die Kohleteilchen in dem Bestreben, die an der Glaswand haftende Luft zu adsorbieren, selbst an der Glaswand hängengeblieben; vertreibt man vor dem Umkehren an irgend einer Stelle *A — B* des Rohres durch Erwärmen die Luft, so wird auch ein nachheriges Haftenbleiben der Kohleteilchen an dieser Stelle nicht möglich sein (Rohr *d*). (Rohr *b* zeigt das Resultat bei Umkehr ohne vorheriges Erwärmen.)

Der zweite Abschnitt des Flotationsprozesses ist die Erzeugung von Gasbläschen in der Flüssigkeit. Es gibt verschiedene Methoden, um solche Luftblasen entstehen zu lassen. Die Luft wird entweder als Druckluft von unten eingeblasen oder durch ein Rührwerk hineingebracht. Auf diese technischen Einzelheiten möchte ich hier nicht eingehen; es sei aber auf ein noch nicht gelöstes Problem hingewiesen, nämlich auf die Frage, ob für den Erfolg der Flotation die Gasart, die man erzeugt, von Bedeutung ist. Es ist sehr wohl denkbar und von verschiedenen Seiten auch behauptet worden, daß hier elektrische Kräfte (vgl. die Anm. S. 58) ins Spiel treten können, daß sich das eine Gas bei dem Eintreten in die Flüssigkeit mehr als das andere elektrisch auflädt und diese Ladung zu dem Zusammenschluß der Gasbläschen mit den „geölten“ Erzteilchen notwendig ist. Auch chemische Kräfte könnten vielleicht hier ins Spiel treten. Es sind auch in der Richtung in Clausthal Untersuchungen im Gange.

Die dritte Bedingung zur Flotierung ist die Schaumbildung, die in der Regel durch irgend ein Öl hervorgerufen wird. Als typischen Schaumbildner nennt man in der Regel das Kiefernöl

Die Aufgabe des Schaumbildners ist die, eine große Oberfläche herzustellen, auf der sich die Erzteilchen ansammeln können. Die Luftbläschen, die von unten aufsteigen, würden an der Wasseroberfläche, falls die Begrenzungsflüssigkeit des Luftbläschens reines Wasser wäre, sofort zerplatzen, so daß die mit dem Luftbläschen heraufgebrachten Erzteilchen wieder herunterfallen. Man sagt in der Regel, es wird die Oberflächenspannung des Wassers durch den Schaumbildner herabgesetzt, und das sei der Grund der voluminösen Schaumbildung. Es besteht daran freilich kein Zweifel, daß die Oberflächenspannung des Wassers durch den Zusatz geringer wird; man braucht sich nur eine Tabelle der Oberflächenspannungen verschiedener Flüssigkeiten anzusehen, um sich davon zu überzeugen; und doch glaube ich, daß diese Herabsetzung der Oberflächenspannung für den hier betrachteten Vorgang nicht das Wesentliche ist, denn auch Alkohol wirkt in derselben Weise und gibt doch keinen Anlaß zur Schaumbildung. Es ist hier wohl eine andere Eigenschaft des Schaumbildners von Bedeutung, die wir im einzelnen noch nicht genau kennen, die mit folgender Erscheinung zusammenhängt. Es gibt Öle und Fette, die einen, wie man sagt, armen Schaum liefern, der aber zäh und dauerhaft ist, und andere, die einen sehr voluminösen, unter Umständen weniger dauerhaften Schaum bilden. Es lassen sich also die einen in dünnere Häute ausbreiten, während die anderen bei dem Versuch der Dehnung leichter zerplatzen. Man kann vermuten, daß bei den ersten die molekularen Kräfte, die zu dem Zusammenhang notwendig sind, in anderer Weise von der Entfernung abhängig sind, als bei den zweiten. Die Reichweite molekularer Kräfte und ihrer Abhängigkeit von der Entfernung aber zu bestimmen, haben wir noch nicht gelernt, und infolgedessen kennen wir auch erst recht noch nicht den Zusammenhang der Reichweite mit der chemischen Konstitution.

6. Magnetische Aufbereitung.

Die magnetische Aufbereitung beruht auf der Eigentümlichkeit vieler Substanzen, von einem Magnet mehr oder weniger stark angezogen zu werden. Den Versuch zu machen, auf Grund

dieser Eigenschaft Stoffe voneinander zu trennen, liegt auf der Hand, und es ist nicht schwer, sich Konstruktionen dafür geeigneter Maschinen auszudenken. In der Abb. 37 sehen wir einige Magnetscheider abgebildet, die vielfach im Gebrauch sind und deren Wirkungsweise ohne viel Worte verständlich ist.

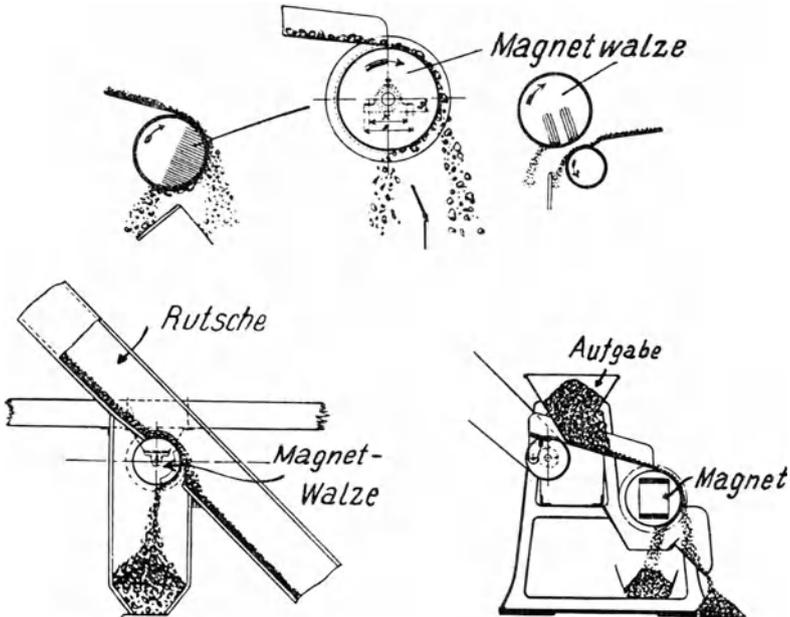


Abb. 37. Magnetscheider.

Wenn man nicht rein empirisch den Erfolg solcher magnetischer Aufbereitungsmaschinen ausprobieren will, muß man sich 1. auf eine gewisse Kenntnis der magnetischen Eigenschaften der Stoffe stützen können und 2. die magnetischen Kräfte kennen, die sich um die Pole der Magnete selbst ausbilden, die in den Maschinen Verwendung finden, Kräfte, deren Raumabhängigkeit häufig durch Eisenfeilspäne festgestellt worden ist (Abb. 38, 39).

Von größter Bedeutung wäre es natürlich, wenn man die Frage: Was ist Magnetismus? beantworten könnte. Die Elektronentheorie, die uns von der Elektrizitätsleitung und anderen elektrischen Vorgängen Rechenschaft zu geben versucht, ist auch dazu herangezogen worden, die magnetischen Kräfte, ihre Ent-

stehung und ihre Veränderlichkeit zu beschreiben. Über mehr oder weniger weitgehende Versuche ist man aber bei dieser Beschreibung nicht hinausgekommen. Man ist noch nicht einmal soweit, sagen zu können, was der tiefere Grund ist, daß diese Eigenschaft z. B. beim Eisen in so sehr verschiedener Weise in die Erscheinung treten kann, wenn das Eisen eine verschiedene Vor-

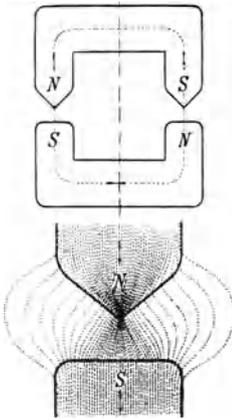


Abb. 38. Feldlinien.

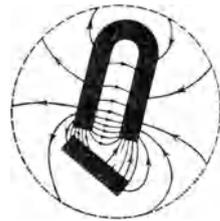
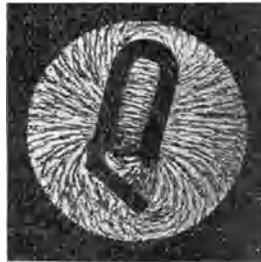
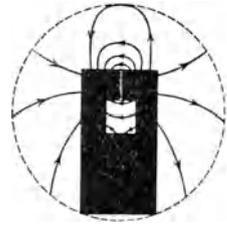
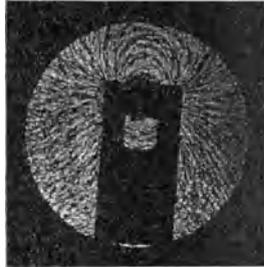


Abb. 39. Feldlinienbilder.

geschichte hat. Viel weniger ist man in der Lage, die Frage nach der Beziehung magnetischer Eigenschaften und der Struktur des Materials beantworten zu können, so sehr man auch bemüht ist, hier weiter zu kommen. In letzter Zeit hat man insbesondere von der Röntgenstrahlanalyse dazu Gebrauch zu machen versucht, da man vermutete, daß den Änderungen magnetischer Eigenschaften Änderungen in der Kristallstruktur parallel gehen, was aber bisher nicht hat erwiesen werden können.

Die Eigenschaften selbst werden sich am leichtesten an den Stoffen untersuchen lassen, die sie besonders intensiv zeigen, das sind die ferromagnetischen Körper, wie die Elemente Eisen, Nickel usw., und einige Legierungen von an sich wenig magnetischen Komponenten, z. B. die Heuslerschen Legierungen.

Charakterisiert werden die Stoffe in bezug auf ihre magnetischen Eigenschaften in erster Linie durch die folgenden wichtigen, physikalisch streng definierbaren Größen: Magnetische Induktion, Remanenz, Koerzitivkraft, Permeabilität, Größen, auf deren Bedeutung ich kurz eingehen muß.

Es ist bekannt (nach dem ersten Maxwellschen Grundgesetz der Elektrodynamik), daß um eine von einem elektrischen Strom durchflossene Spule und in ihr ein magnetisches Feld, wie es von einem geeigneten Magnetstab ausgehen kann, existiert, und daß die Stärke des Feldes an einer bestimmten Stelle des Raumes um so größer ist, je größer die Windungszahl der Spule pro Zentimeter Länge und je größer die Stromstärke in der Spule ist. Ist die Spule gleichmäßig gewickelt (gleichviel und gleichweite Windungen pro Zentimeter) und unendlich lang, so ist die Feldstärke außerhalb der Spule 0 und nur in der Spule von endlichem Wert, der überdies an jeder Stelle des beliebig großen Querschnitts die gleiche Größe besitzt. Die Stärke des magnetischen Feldes ist also im Innern einer solchen Spule durch Angabe der Stromstärke in der Spule und der Windungszahl/Zentimeter eindeutig und vollständig festgelegt und kann dem Produkt der beiden Größen gleichgesetzt, d. h. in Ampere-Wind./Zentimeter (Technische Einheit der magnetischen Feldstärke) gemessen werden. Wollte man diese Einheit zur Angabe der Stärke des magnetischen Feldes, das an irgend einer Stelle des Raumes einem Raumelement von irgendwelchen magnetischen Massen herrührt, benutzen, so müßte man bestimmen, wie groß die Ampere-Wind./Zentimeter in einer unendlich langen, das betreffende Raumelement umschließenden Spule sein müßte, um, an irgendwelchen Wirkungen gemessen, die gleiche Stärke in dem Raumelement zu geben. Das kann rechnerisch geschehen, so daß die der Vorstellung über die Entstehungsmöglichkeit des magnetischen Feldes entsprechende Einheit für die magnetische Feldstärke praktisch gut verwendbar ist. Man hat die Feldstärke ihrer Größe und Richtung nach von früh an anschaulich durch Dichte und Richtung von Stromlinien graphisch dargestellt, indem man der Feldstärke n die Anzahl n Stromlinien pro Quadratcentimeter zuordnete. Man kann dies tun, wie man ein jedes Gefälle durch Strom- besser Gefällelinien darstellen kann. Wir wollen uns aber von vornherein darüber

klar sein, daß wir es bei der magnetischen Feldstärke mit einer dem Gefälle eines Stromes vergleichbaren Größe zu tun haben, während dem Strom selbst (der durch den Querschnitt strömenden Wassermenge) der sogenannte „magnetische Fluß“ entspricht, der durch die Feldstärke in dem die Spule umgebenden Medium hervorgerufen wird. Ein Raumteil wird demnach ein homogenes magnetisches Feld besitzen, wenn die Feldlinien äquidistant und gleichgerichtet durch den Raumteil hindurchlaufen, wie es z. B. in einer unendlich langen, gleichmäßig gewickelten Spule der Fall

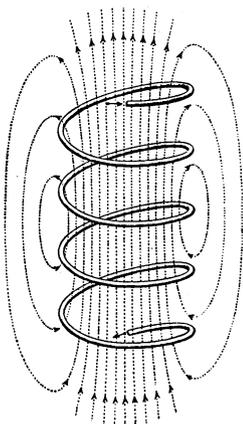


Abb. 40.
Feldlinien in einer Spule.

ist. Ist die Spule nicht sehr lang, so verlaufen die das magnetische Gefälle darstellenden magnetischen Feldlinien im Innern der Spule bis ziemlich dicht an die Enden parallel der Mittellinie der Spule, freilich nicht ganz äquidistant, indem nach der Mitte des Querschnitts zu die Dichte wächst; an den Enden divergieren die Feldlinien und schließen sich außerhalb der Spule ungefähr in einer Weise, wie sie aus der Abb. 40 ersichtlich ist. Das gesamte magnetische Gefälle, das durch eine solche Spule hervorgerufen wird, können wir natürlich nur finden, wenn wir die einzelnen Gefälle-Elemente dH der Spule von Anfang bis Ende der Spule zusammenaddieren, wenn wir also die Summe der Ampere-Wind/Zentimeter über die ganze Spule bilden oder die Ampere-Windungen der ganzen Spule zählen. Der durch dieses Gesamtgefälle erzeugte oder „in Bewegung gesetzte“ magnetische Strom oder Fluß wird im Vakuum um so stärker sein, je größer das Gefälle ist. Strom und Gefälle sind im Vakuum proportional, und wegen dieser Proportionalität und gleichen Richtung können im Vakuum (ebenso in dem vom Vakuum in magnetischer Beziehung wenig verschiedenen Luftraum) die Gefällelinien geradezu auch als Strom- oder Flußlinien betrachtet werden. Die Frage ist freilich, ob und wie wir den magnetischen Fluß getrennt vom magnetischen Gefälle messen können. Man benutzt (dem zweiten Maxwell'schen Grundgesetz der Elektrodynamik folgend) dazu die

elektromagnetische Induktion, die die Änderungen des magnetischen Feldes begleitet, und verfährt bei der Messung folgendermaßen. Man läßt den Fluß durch eine z. B. von einem Kupferdraht umschlossene Fläche treten, dessen Enden an einen elektrischen Spannungsmesser angeschlossen sind. In dem Augenblick des Eintretens (oder Austretens) des Flusses in die Drahtschleife zeigt der Spannungsmesser eine elektrische Spannung an von um so größerem Betrag, je größer die Änderung des magnetischen Flusses durch die Fläche ist; bei jeder Änderung, also auch bei Zunahme oder Abnahme des magnetischen Flusses durch die Fläche beobachtet man an den Enden der Drahtschleife eine Spannungsdifferenz. Sie verschwindet, wenn ein stationärer Zustand eingetreten ist, also der magnetische Strom unverändert hindurchfließt. Das plötzliche Eintreten des magnetischen Flusses in die Kupferdrahtschleife kann dadurch eingeleitet werden, daß man die Kupferdrahtschleife, deren Ebene zuerst parallel der Strömungsrichtung des magnetischen Flusses gehalten wird, um 90° dreht, so daß sie nun senkrecht zur Strömungsrichtung zu liegen kommt. Je schneller die Drehung erfolgt, je plötzlicher also der magnetische Fluß in die Drahtschleife eintritt, um so größer wird die momentane Spannungsanzeige sein, aber auch um so kürzer wird sie dauern. Das Produkt aus erzeugter elektrischer Spannung und Zeitdauer, während der sie auftritt, ist bei dem gleichen magnetischen Fluß konstant, so daß dieses Produkt als Maß für den magnetischen Fluß — statt dessen sagt man auch „magnetische Induktion“ — gelten kann. Wir nennen die Einheit des magnetischen Flusses „Voltsekunden“ und bezeichnen weiter den auf die Flächeneinheit der Drahtschleife bezogenen magnetischen Fluß als den „spezifischen“ magnetischen Fluß mit der Einheit „Voltsekunden/Quadratcentimeter“. In Anlehnung an das bekannte Ohm'sche Gesetz des elektrischen Stromes und in sinngemäßer Fortführung der Vorstellung der Strömung nennt man den Proportionalitätsfaktor zwischen der gesamten magnetischen Feldstärke oder magnetomotorischen Kraft H (gemessen in Ampere-Windungen) und der Stärke des durch sie hervorgerufenen gesamten magnetischen Flusses B (gemessen in Voltsekunden) den magnetischen Widerstand W , so daß man schreiben kann:

$$H = W \cdot B.$$

Man kann nun beobachten, daß der magnetische Fluß unter sonst gleichen Bedingungen wesentlich größer ist, wenn in der Spule sich ein weiches Eisenstück befindet, als wenn die Spule nur von Luft erfüllt ist. (Man denke an die kräftigen magnetischen Wirkungen der Elektromagnete.) Der Widerstand, den das weiche Eisenstück dem magnetischen Fluß entgegensetzt, ist also offenbar viel kleiner als der, den wir bei Luft oder im Vakuum beobachten können. Der Gesamtwiderstand W , den der Fluß findet, wenn er

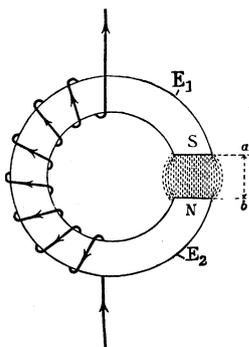


Abb. 41.

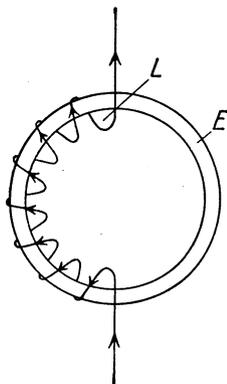


Abb. 42.

Zur Theorie des magnetischen Flusses.

durch verschiedene Materialien hindurchfließen muß, wird sich aus den Widerständen der einzelnen Materialien zusammensetzen, und zwar in leicht übersehbarer Weise: 1. Muß der Fluß z. B. durch ein Stück Eisen E_1 , auf das die Spule aufgewickelt ist, hindurch und dann über einen Luftspalt $a - b$ wieder in ein Stück Eisen E_2 eintreten, wie das in Abb. 41 gezeigt ist, so ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Widerstände, die der Fluß im Eisen und in der Luft findet ($W = w_1 + w_2$), 2. Umschließt die Spule, wie in Abb. 42 mit einem gewissen Spielraum den geschlossenen Eisenkern E , so verläuft ein Teil des Flusses (freilich nur ein sehr kleiner) im Luftraum L zwischen Spule und Eisenkern, und der Gesamtwiderstand W berechnet sich nach dem Satz, daß die Summe der reziproken Widerstände der Luft und des Eisens gleich dem reziproken Gesamtwiderstand ist ($1/W = 1/w_1 + 1/w_2$). Der Widerstand, den ein Material dem magnetischen

Fluß entgegengesetzt, hängt danach offenbar vom Querschnitt und der durchlaufenen Länge des Materials ab und überdies von einer Materialkonstante, die man „spezifischen“ magnetischen Widerstand nennt, dessen reziproker Wert unter dem Namen „Permeabilität“ bekannt ist. Leicht übersehbar sind die magnetischen Stromverhältnisse in einem gleichmäßig eng bewickelten Kreisring vom Querschnitt q und der Länge l der Mittellinie; der elektrische Strom, der durch die Spulenwicklung fließt, habe die Stärke J Amp.; die Zahl der Windungen pro Zentimeter sei n . Dann ist die gesamte den magnetischen Strom treibende magnetische Kraft $H = J \cdot n \cdot l$; der Fluß pro Quadratcentimeter des Querschnitts sei B_0 , der Gesamtfluß also $B = B_0 \cdot q$; dann ist der Widerstand

$$W = \frac{H}{B} = \frac{J \cdot n \cdot l}{B_0 \cdot q} = W_s \frac{l}{q} = \frac{1}{M} \frac{l}{q},$$

wenn W_s den spezifischen Widerstand, M die Permeabilität des Materials bedeutet. Der Versuch mit einer Spule, die nicht auf einen festen Kern gewickelt ist, sondern ein Vakuum umschließt, hat gelehrt, daß die Permeabilität des Vakuums $M_0 = 4\pi \cdot 10^9$ ist. Statt des absoluten Wertes M der Permeabilität wird in der Regel das Verhältnis der Permeabilität des Materials zu der des Vakuums angegeben, das man als relative Permeabilität mit dem Buchstaben $M/M_0 = \mu$ belegt hat. Sie wäre demnach das Verhältnis des Leitvermögens des Materials, in dem der magnetische Fluß erzeugt wird, zu dem Leitvermögen, das an dieser Stelle das Vakuum zeigen würde. Je größer μ , um so kleiner ist also der magnetische Widerstand. Es gibt eine große Anzahl von Substanzen, deren Permeabilität nur wenig größer als 1 ist, das sind die sogenannten paramagnetischen Stoffe, es gibt auch einige mit einer Permeabilität, die kleiner als 1 ist, das sind die diamagnetischen Körper; diejenigen, bei denen die Permeabilität sehr viel größer als 1 ist (bis 100 oder 1000 oder noch größer), werden ferromagnetische Körper genannt. Bei diesen letzteren ist die Permeabilität keine Konstante, sondern hängt bemerkenswerterweise von der magnetischen Feldstärke H ab; es nimmt der magnetische Fluß bei wachsender Feldstärke anfangs dieser proportional zu, dann aber weniger schnell, und zeigt schließlich einen konstanten Wert, auch wenn die Feldstärke immer weiter

wächst. Diesen konstanten Wert bezeichnet man als Sättigungswert. Der Abhängigkeit des magnetischen Flusses von der magnetischen Feldstärke entspricht eine anfängliche Zunahme und eine spätere Abnahme der Permeabilität mit wachsender Feldstärke. Bei den ferromagnetischen Substanzen ist ferner die Permeabilität nicht einmal eindeutig durch die Feldstärke bestimmt. Vielmehr zeigt μ bei einer bestimmten Feldstärke einen höheren Wert, wenn sie von höherer Feldstärke aus erreicht wurde, einen niedrigeren Wert, wenn man sich ihr von niedrigerer

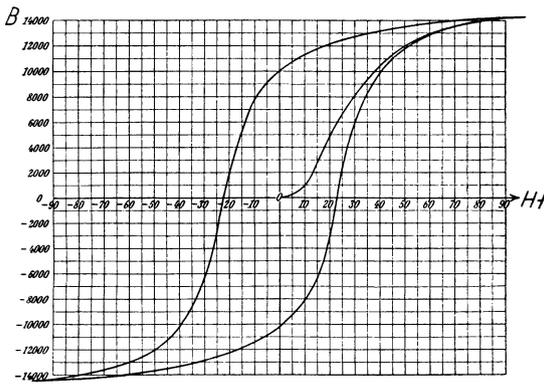


Abb. 43. Hysteresisschleife von Stahl.

Feldstärke aus näherte. Deutlich zeigt das die auf Stahl bezügliche Abb. 43, in der als Abszisse die Feldstärke H , als Ordinate die Induktion B aufgetragen ist. Gehen wir von einer hohen Feldstärke aus, bei der Sättigung vorhanden, und lassen sie abnehmen, so ändert sich B entsprechend dem oberen Zweig der geschlossenen Kurve, bis wieder Sättigung bei einer gewissen Feldstärke entgegengesetzten Vorzeichens eintritt; läßt man von da die Feldstärke wieder zunehmen, so wächst B entsprechend dem unteren Zweig. Diese Nachwirkungserscheinung nennt man Hysterisis, die geschlossene Kurve Hysteresisschleife. (Ihr Flächeninhalt ist ein Maß der bei einem solchen Ummagnetisierungszyklus in dem ferromagnetischen Material durch innere Reibungsvorgänge verbrauchten Energie.) Ein ähnliches (schematisches) Bild gibt Abb. 44, in der als Abszisse wieder H , als Ordinate die sogenannte

„Intensität der Magnetisierung“ J aufgetragen ist, die mit B und H durch die Beziehung

$$B = 4\pi J + H$$

zusammenhängt; man nennt diese Kurve Magnetisierungskurve; war das Material einem magnetischen Feld noch nicht ausgesetzt gewesen, so ändert sich B bzw. J entsprechend der vom Nullpunkt ausgehenden Neukurve (jungfräuliche Kurve I) mit H . Den Wert der Magnetisierung, den das Material noch aufweist, wenn

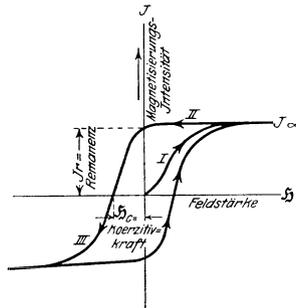


Abb. 44. Magnetisierungskurven eines ferromagnetischen Körpers.

die Feldstärke, von der Sättigungsfeldstärke kommend, bis zu 0 abnimmt, nennt man Remanenz. Es ist in der Abb. 44 das Stück J_r , welches auf der Ordinatenachse durch die Magnetisierungsschleife abgeschnitten wird. Die Feldstärke, die angewendet werden muß, um die Magnetisierung zu Null zu machen, in der graphischen Darstellung der Abschnitt H_c auf der Abszissenachse, nennt man die Koerzitivkraft. Es ist leicht zu sehen, daß magnetisches Material nicht immer den vollen remanenten Magnetismus zeigen kann; es besitzt ihn nur, wenn es vorher einer genügend hohen Feldstärke (der Sättigungsfeldstärke) ausgesetzt war. Das Material kann also, je nach der Vorgeschichte, eine verschiedene Permeabilität zeigen, und wenn man von der Permeabilität bei solchem Material spricht, so muß man nähere Angaben machen über die Bedingungen, die man als vorliegend annimmt. Unter Permeabilität des Materials schlechthin bei einer bestimmten Feldstärke versteht man immer den Wert, den die „jungfräuliche“ Kurve zu dem H -Wert anzeigt. Man erkennt weiter unmittelbar, daß die Permeabilität eines solchen Materials beim Bewegen

desselben in Gebieten verschiedener Feldstärke sich ändern kann, und ferner, daß Änderungen der Induktion (des magnetischen Flusses) im umgebenden Raum eintreten müssen, wenn wir Material anderer Permeabilität hineinbringen. Das ist der Grund, warum unter Umständen Eisenfeilspäne das Bild des Feldverlaufs fälschen können. An Stelle der Permeabilität findet man in Tabellen oft die „Suszeptibilität“ k angegeben, die mit der Permeabilität durch die Gleichung zusammenhängt: $k = \frac{\mu - 1}{4\pi}$. Wie verschieden die Werte der Permeabilität sein können, ersieht man aus der Tabelle 2.

Tabelle 2.

a) Werte der um 1 verminderten Permeabilität verschiedener Substanzen ($\mu - 1$).

Luft	0
Zinn	$3,8 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$23 \cdot 10^{-6}$
Eisenchloridlösung, 28 % ig	$384 \cdot 10^{-6}$
48 % ig	$805 \cdot 10^{-6}$
Eisensulfat, krist.	$1000 \cdot 10^{-6}$
Nickelsulfat, krist.	$200 \cdot 10^{-6}$
Magnetit	etwa 5—10
Eisen	100—1000 und mehr

b) Permeabilität μ von Erzproben mit Magnetitgehalt aus dem Anomaliegebiet von Kursk¹⁾.

H	8	20	40	80	120	300	500	1000 Gauß ²⁾
μ	3,8	4,2	4,5	4,4	4,1	3,2	2,7	2,1

Für die Größe der anziehenden Wirkung eines Magnets auf irgend ein Material ist nun dieses μ von ausschlaggebender Bedeutung, wie die folgende Betrachtung lehrt: Man beobachtet, daß Körper mit einem μ größer als dem der Umgebung in einem nicht homogenen Feld stets nach Stellen größeren Gefälles gezogen werden. Es wird dabei offenbar der Widerstand, den der magnetische Fluß findet, etwas verkleinert. Umgekehrt müssen wir gegen die bewegenden Kräfte des magnetischen Feldes, die Anziehungskräfte, wie wir gewohnt sind zu sagen, eine Arbeit leisten, wenn wir den Körper zu Stellen kleineren Feldgefälles bringen

1) Berechnet aus den Messungen von Stschodro (Moskau), Gerlands Beitr. z. Geophysik 17, 148, 1927.

2) „Gauß“ ist eine früher ausschließlich und jetzt noch sehr häufig gebrauchte Einheit der magnetischen Feldstärke; 1 „Amp. - Wind./cm“ $= 4\pi/10$ „Gauß“.

wollen. Sie ist, wenn wir einen Körper um das kleine Wegstück ds in der Richtung nach dem kleineren Gefälle verschieben, $= ds \cdot$ Kraft. Die Arbeit kann nach dem Prinzip der Erhaltung der Energie nicht verloren gehen, sie muß sich also in der Änderung des Feldes wiederfinden. Daraus schließen wir, daß die Energie des Raumes infolge des magnetischen Feldes um so größer ist, je kleiner die Permeabilität des Raumteils. In der Tat läßt sich auch leicht streng ableiten, daß die Energie im magnetischen Feld

$$E = \frac{H \cdot B}{2} = \frac{B^2}{2M} \text{ Joule/cm}^3$$

ist.

Auf Grund dieser Kenntnis können wir leicht die Kraft berechnen, von der ein Teilchen der spezifischen Permeabilität μ an einer Stelle des luftgefüllten Raumes (Permeabilität M_1 bzw. μ_1) in einer bestimmten Richtung (nämlich zu höheren Werten des Flusses) getrieben wird. Das Volumen des Teilchens sei $v = q \cdot ds$, worin die Längsausdehnung in Richtung des größten Gefälles ds , der dazu senkrechte Querschnitt q sein soll. Die Änderung des Flusses längs ds sei dB ; dann tritt bei einer Verschiebung des Teilchens um ds eine Änderung der Energie im magnetischen Feld ein:

$$dE = v \frac{dB^2}{2 ds} ds \left(\frac{1}{M_1} - \frac{1}{M} \right) = v B \frac{dB}{ds} ds \frac{1}{M_0} \left(\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu} \right).$$

Die Kraft, die bei dieser Bewegung, um ds die Arbeit leistet, ist also:

$$v \cdot B \frac{dB}{ds} \frac{1}{M_0} \left(\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu} \right).$$

Dieser Ausdruck ist um so größer, je näher $1/\mu$ der Null, d. h. je größer μ ist, ändert sich aber nicht mehr wesentlich, wenn μ einen gewissen Wert überschreitet. Insbesondere wächst der Ausdruck, wenn dB/ds zunimmt, also mit wachsender Inhomogenität des Feldes, und ist überdies proportional dem Fluß B selbst. In diesen Regeln stecken die Grundlagen der Wirkung der Magnetscheider.

Der Vollständigkeit halber wollen wir noch überlegen, welche Erscheinungen eintreten müssen, wenn μ kleiner als das der Umgebung ist, also z. B. bei diamagnetischem Material in Luft. Offenbar muß ein Teilchen mit solchem μ im inhomogenen Feld in

Richtung abnehmenden Flusses gestoßen werden, wie z. B. bei Wismut leicht festzustellen ist. Der Kraftfluß in einem diamagnetischen Stäbchen findet einen größeren Widerstand als in der Luft; der Fluß ist daher, wie die Stromlinien zeigen, im Stäbchen schwächer als in Luft (vgl. Abb. 45).

Bei der Wichtigkeit der Größe μ ein kurzes Wort über die Möglichkeit ihrer Bestimmung! Bei ferromagnetischen Materialien, Metallen, die man in Ringform leicht beschaffen kann, bestimmt man in der Regel an einem Ring, der mit einer stromdurchflossenen Drahtspule umwickelt ist, die magnetische Induktion B zu verschiedenen Feldstärken H , indem man die induzierte Spannung

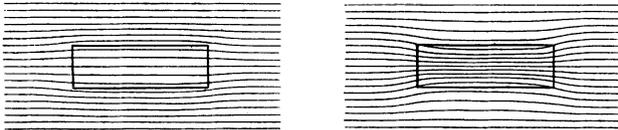


Abb. 45. Fluß im dia- und paramagnetischen Stäbchen.

an den Enden einer zweiten über die Stromspule geschobenen „Induktionsspule“ mißt (Abb. 46), die beim Ein- und Ausschalten des Feldes entsteht. Mittels der obigen Gleichungen berechnet man daraus und aus den geometrischen Abmessungen μ . Bei der Aufbereitung handelt es sich nun aber in der Regel um die Kenntnis der meist sehr geringen Permeabilität von Mineralkörnern, bei denen die Bestimmung der Induktion auf die angegebene Weise nicht möglich ist. Man verfährt dann häufig so: man bettet das Material in eine Flüssigkeit ein, deren Permeabilität als Funktion von der Konzentration bekannt oder leicht zu ermitteln ist, und beobachtet mit dem Mikroskop, ob bei Einschalten eines Feldes Richtkräfte auf das Mineralkorn bemerkbar werden, was nur möglich ist, wenn die Permeabilität des Materials von der der Flüssigkeit abweicht; ist das der Fall, so ändert man die Konzentration der Flüssigkeit, bis keine Richtkräfte mehr auftreten, und setzt dann die Permeabilität des Minerals der der Flüssigkeit gleich. Die Permeabilität der Flüssigkeit kann nachträglich durch das Hineinziehen derselben in ein bekanntes magnetisches Feld leicht ermittelt werden.

Nachdem wir nun die Möglichkeit, die magnetischen Eigenschaften der Stoffe zu charakterisieren, kennengelernt haben, wollen wir uns der zweiten Frage zuwenden: „Wie ist die Kräfteverteilung um die Pole der Magneten in den Scheidern beschaffen und wie ist sie zu bestimmen“. Wenn das an den Magnetpolen (auf einem Transportband oder im freien Fall) vorbeigebrachte Material an die Pole herangezogen werden soll, so muß, da an der Materie nichts zu ändern ist, B und dB/ds möglichst stark variiert werden können; denn wir müssen, je nach der Materialbeschaffen-

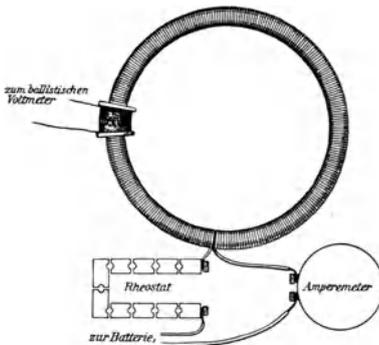


Abb. 46. Messung der Permeabilität eines Eisenringes.

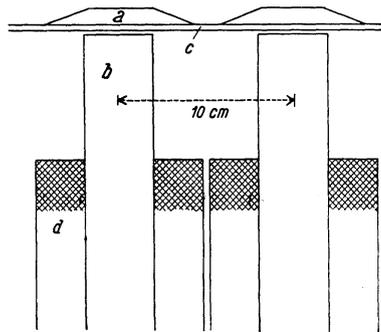


Abb. 47. Schematischer Schnitt durch einen Magnetscheider von Humboldt.

heit, starke oder weniger starke Magnete verwenden mit größerer oder kleinerer Feldinhomogenität. Das erstere wird durch Verwendung von Elektromagneten in befriedigendem Maße erreicht, das zweite sucht man dadurch zu erzwingen, daß man den Polen verschiedene Formen gibt oder sie von dem Raum, in dem sich die Körner bewegen, durch Zwischenschalten von Messingplatten trennt oder auch von Eisenplatten, durch die dieser Raum vor der magnetischen Wirkung der Pole abgeschirmt wird. Vergleiche dazu z. B. die Abb. 47, die einen schematischen Schnitt durch einen Magnetscheider von Humboldt längs der horizontal liegenden Achse der rotierenden Trommel c aus Messing oder Eisen darstellt, auf die das aufzubereitende Material von oben herabfällt, und an der das magnetische, durch das Feld der Pole b gehalten, haften bleibt; bei d sind die Spulen der Elektromagnete angedeutet; a sind Eisenringe, die um die Trommel gelegt sind, zwischen denen die Körner festgehalten werden; unten, außerhalb der Reichweite

der Polwirkungen, wird das magnetische Material von der Trommel abgestrichen und aufgefangen.

Vor allem ist zur Messung des Feldes ein empfindliches Meßinstrument wichtig, mit dem man die Größen B und dB/ds , und zwar innerhalb kleinster Raumelemente des Feldes, ausmessen kann. Unter verschiedenen Methoden eignet sich besonders gut dafür die, bei der die Messung durch Induktionsspulen vorgenommen wird und man sich also an das oben geschilderte Kupferschleifen-Experiment anschließt; denn einer solchen Induktionsspule (oder Kupferschleife) kann man, wenn man etwas Sorgfalt auf die Herstellung verwendet, sehr kleine Ausmaße geben, so daß bei der Drehung derselben um 90° oder 180° nur ein sehr kleines Raumelement überstrichen wird; und die modernen Galvanometer sind empfindlich genug, um auch noch sehr kleine Induktionsströme recht genau messen zu lassen. Bei Feldmessungen¹⁾ in der Nähe der Pole eines kräftigen Elektromagnets in einer Aufstellung, die den Verhältnissen bei den Magnetscheidern nachgebildet ist, wurde von den Herren Dr. Becker und Dr. Rössiger im Physikalischen Institut der Bergakademie Clausthal eine Spule verwendet, bei deren Drehung ein Raum von nur etwa 8 mm^3 zur Wirkung kam; sie war angeschlossen an ein sehr empfindliches Galvanometer, so daß merkliche Ausschläge bei Drehung der Spule auch noch in einiger Entfernung von den Polen erhalten wurden. Da die eigens zur Orientierung über die Felder an Magnetscheidern ausgeführten Versuche Resultate ergaben, die einige Schlüsse für den Bau der Magnetscheider gestatten, und da außerdem die Versuche anderwärts zur Messung von Feldern auf Grund unserer Angaben leicht wiederholt und erweitert werden können, sei es gestattet, auf die Untersuchung etwas näher einzugehen.

Die kleine Spule war in geeigneter Weise an dem einen Ende eines geraden Glasrohres festgekittet, durch das die Zuleitungsdrähte geführt waren und das in einer Metallfassung um 180° um seine Längsachse gedreht werden konnte. Die Metallfassung wurde von einer Metallstange gehalten, deren anderes Ende auf dem in der Höhe und seitlich nach zwei Richtungen hin meßbar

1) Bisher noch nicht veröffentlicht.

beweglichen Schlitten einer Fräsbank befestigt war, so daß die Induktionsspule an beliebige Stellen des magnetischen Feldes gebracht werden konnte.

Zunächst wurde die Richtung des Feldes in dem Raumelement der Spule festgelegt, indem die Stellung aufgesucht wurde, von der aus eine Drehung um 180° einen maximalen Induktionsstrom (Ausschlag im Galvanometer) ergab. Die Stellung konnte an

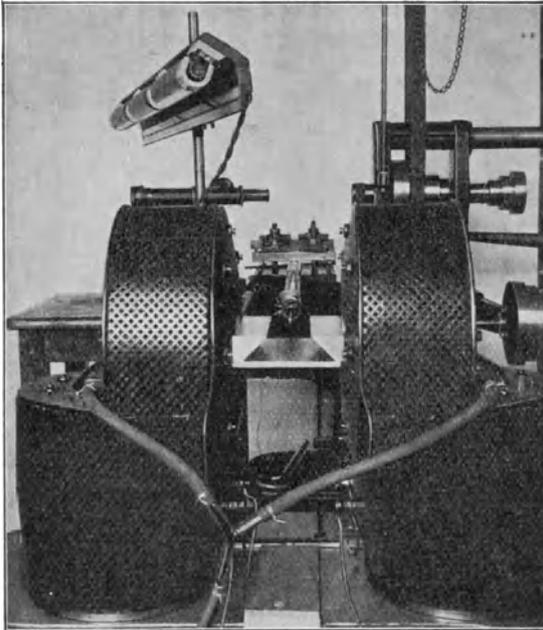


Abb. 48. Versuchsanordnung zur Messung magnetischer Felder.

einem Index, der an der Spulenfassung angebracht war und über einer Kreisteilung an der Metallstange spielte, abgelesen werden. Die Größe des Galvanometerausschlages bei Drehung um 180° aus dieser Stellung war ein Maß für die Stärke des Magnetfeldes.

In Abb. 48 sieht man die Anordnung in dem Fall der Benutzung eines großen Elektromagnets von Hartmann und Braun zur Herstellung sehr starker Felder; man sieht auf dem Bilde die beiden mit Drahtnetz überzogenen Holme des Elektromagnets, an welche horizontal gelegte Schienen mit -förmigem Querschnitt als Polschuhe angesetzt sind; man sieht auch unter den

Polschuhen die sie verbindende Eisenplatte, die bei einigen Versuchsreihen in dieser Lage oder über den Polschuhen eingeschoben war und eine Art magnetischen Nebenschluß zum äußeren Feld bildete. Die Metallstange mit der kleinen Induktionsspule an der

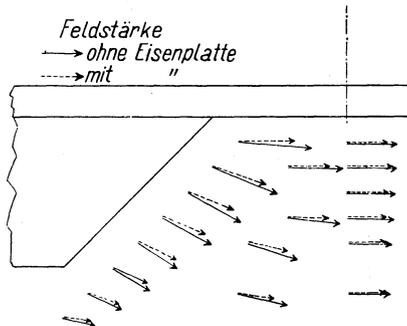
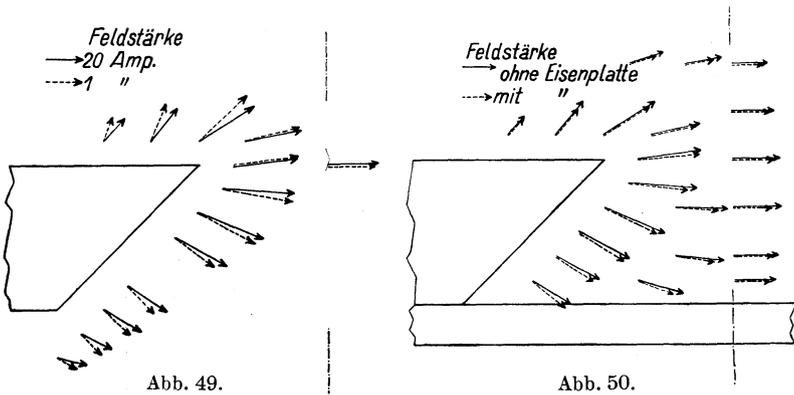


Abb. 51.

Darstellung der Meßresultate.

Spitze und der Einspannvorrichtung auf der Fräsbank am anderen Ende ist in der Mitte (von hinten nach vorn laufend), das auf ein nicht sichtbares Galvanometer gerichtete Fernrohr mit Skala und Beleuchtung über dem linken Holm des Elektromagnets zu erkennen. Die im Vordergrund von dem Magnet fortführenden Schlauchleitungen dienen zur Wasserkühlung des Elektromagnets bei hoher Belastung.

An Stelle des großen Magnets wurde bei einigen Versuchsreihen auch ein kleinerer Elektromagnet benutzt, von einfacher U-Form, dessen Schenkel mit Stromspulen versehen waren und Polschuhe von der Form  trugen.

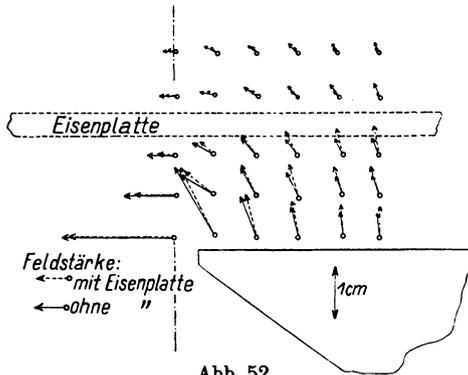


Abb. 52.

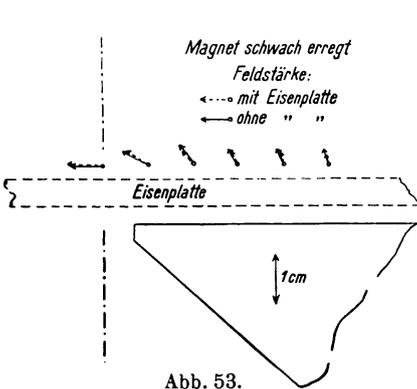


Abb. 53.

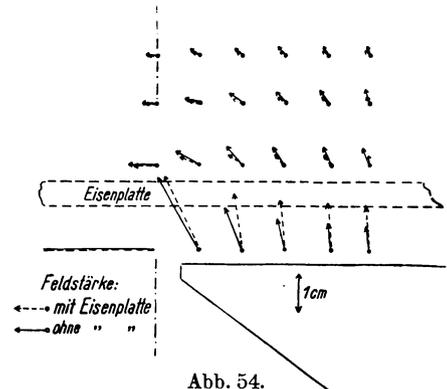


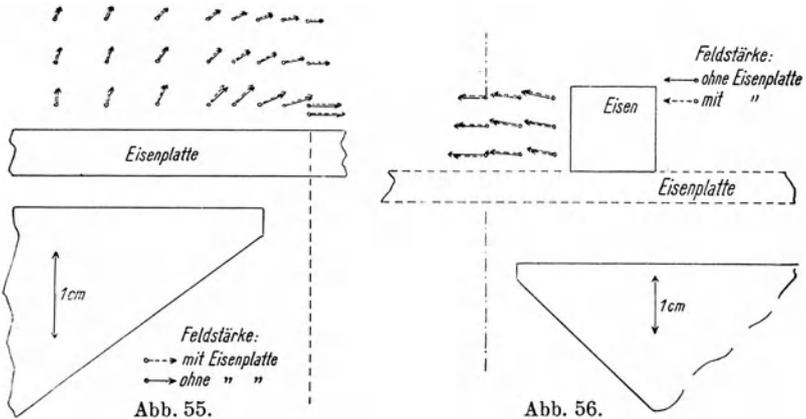
Abb. 54.

Darstellung der Meßresultate.

Die Abb. 49 bis 51 beziehen sich auf Messungen mit dem großen, die Abb. 52 bis 56 auf die mit dem kleineren Magnet; man erkennt auf ihnen den Schnitt des Endes des einen Polschuhs; die strichpunktierte Linie kennzeichnet die Mitte zwischen den beiden Polen. Die eingezeichneten Pfeile geben nach Größe und Richtung maßstäblich in willkürlichen Einheiten das Feld am Ausgangspunkt des Pfeiles an. Man entnimmt aus ihnen folgendes:

a) Abb. 49 zeigt, daß die „Pol“lage von der Stärke des magnetisierenden Stromes abhängt, der den Grad der Sättigung bestimmt; je vollkommener die Sättigung, um so weiter rücken die „Pole“ von der Kante (in Abb. 49: die Spitze) weg, um so weniger scheinen die Pfeile von der Kante herzukommen.

b) Nach Abb. 50 und 51 ändert ein Eisennebenschluß in Form einer an die Polschuhe von oben oder von unten angelegten, die Polschuhe verbindenden Eisenplatte Stärke und Richtung des Feldes zwischen den Polschuhen nicht wesentlich; es ist etwas weniger inhomogen, insbesondere in der Nähe der Platte, als wenn der Nebenschluß nicht vorhanden ist.



Darstellung der Meßresultate.

c) Bringt man in eine mehr oder weniger große Entfernung über die Polschuhe eine Eisenplatte, wie Abb. 52 bis 55 zeigt, so verändert man das Feld in verschiedener Weise. In 2,5 cm Abstand von den Polschuhen (Abb. 52) schirmt die Eisenplatte den Raum auf der Außenseite der Eisenplatte recht gut ab; die Folge davon ist: schwaches Feld im Außenraum mit gleicher Richtung wie ohne Platte, aber wesentlich weniger homogen; zwischen Polschuhen und Platte infolge der Platte geringe Richtungsänderung und homogeneres Feld. Ähnliche Verhältnisse können wir außerhalb der Eisenplatte beobachten, auch wenn die Platte den Polschuhen näher liegt, vorausgesetzt, daß die magnetisierende Feldstärke gering ist (vgl. Abb. 53), in beiden Fällen ist die

Eisenplatte nicht gesättigt und schirmt den Außenraum ab. Anders ist es, wenn die Platte den Polschuhen so nahe liegt und die magnetisierende Feldstärke so hoch gewählt wird, daß die Platte gesättigt oder nahezu gesättigt ist; dann ist im Außenraum der Platte in der Nähe der Enden der Polschuhe keine allzu große Änderung von Größe und Richtung des Feldes zu beobachten, wenn auch in seitlich davon gelegenen Raumteilen (infolge der dortigen geringeren Sättigung der Platte) die Stärke des Feldes merklich geschwächt wird (Abb. 54). Nahezu völlig unverändert zeigt sich das Feld in Abb. 55, die Versuchsreihen wiedergibt, bei denen für völlige Sättigung der Eisenplatte auch in größerer Entfernung von der Mitte zwischen den Polschuhen gesorgt war.

d) Bringt man in das Feld über den Polschuhen, wie in Abb. 56 gezeichnet, parallel zur Kante der Polschuhe je eine Eisenschiene (z. B. von quadratischem Querschnitt), so wird durch das Anlegen einer wieder einen Nebenschluß bildenden, gesättigten Eisenplatte an den Eisenschienen das Feld zwischen den beiden Schienen nicht wesentlich verändert.

Wir können aus diesen Beobachtungen folgende Schlüsse ziehen: Das Einbringen einer Eisenplatte zwischen Polschuhe des Magnets einerseits und aufzubereitendes Material andererseits kann das Feld in dem Raum, in dem das aufzubereitende Material sich befindet, ändern, sowohl in bezug auf Größe und Richtung, wie auch in bezug auf den Gradienten dB/ds , vorausgesetzt, daß die Platte ungesättigt ist, und es ist nicht wahrscheinlich, daß etwa gleiche Feldänderungen dadurch hervorgerufen werden können, daß man nur die magnetisierende Stromstärke ändert, ohne eine Eisenplatte einzuschalten. Falls freilich die Eisenplatte so dicht an den Polschuhen liegt und die magnetisierende Feldstärke so groß ist, daß die Platte gesättigt ist, so ist eine wesentliche Beeinflussung der Feldverteilung in dem in Betracht kommenden Gebiet des Außenraums durch die Eisenplatte (oder den Eisenmantel) nicht zu erwarten. Dann tritt auch, wie bei unseren Versuchen, in einem Gebiet zwischen Eisenschienen oder -bändern mit einer zur Verbindung der Pole senkrechten Ausdehnung durch Einschieben einer Eisenplatte als Nebenschluß eine merkliche Änderung des Feldes nicht ein.

In einigen Fällen wurde versucht, die Feldverteilung auch durch Eisenfeilspäne festzulegen; es wurde zu dem Zweck der Elektromagnet umgelegt, so daß die Polschienen vertikal standen, und ein geeignet zugeschnittener Karton in die zu den Polschienen senkrechte Mittelebene gelegt, auf die die Eisenfeilspäne vor Erregung des Feldes gestreut wurden. Nach Erregen ordneten sie sich in die in der Abb. 57 fixierte Lage und gaben so ein ungefähres Bild des Feldes in der einen Ebene.

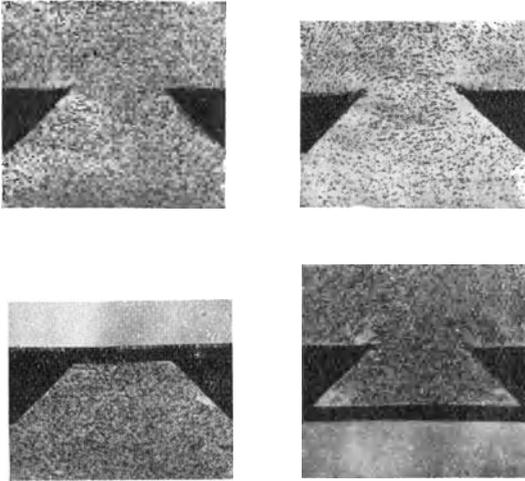


Abb. 57. Darstellung der Resultate durch Eisenfeilspäne.

Häufig hört man im Zusammenhang mit den magnetischen Wirkungen der Magnetscheider von einer „Klebkraft“ sprechen, die die Eisenflächen, die sich in der Reichweite der Wirkung der Pole befinden, auf magnetische Teilchen ausüben. Es ist das eine treffende Bezeichnung für eine Erscheinung, die man beobachten kann, wenn man z. B. auf eine die Polschienen überbrückende Eisenplatte ein Stück Eisen mit einer ebenen Fläche auflegt und abzuheben versucht. Der Widerstand, den man gegen das Aufheben fühlt, ist ungleich viel größer, wenn das Eisenstück fest aufliegt, als wenn eine kleine Luftschicht das Eisenstück von der Unterlage trennt. Das hängt mit der starken Änderung, die die Feldlinien bei völligem magnetischen Schluß zwischen Platte

und Eisenstück erfahren, zusammen, wobei eine große zur Berührungsfläche senkrechte Flußkomponente auftritt, die dagegen nur klein bleibt, wenn eine Luftschicht dem Flusse senkrecht zur Fläche einen erheblichen Widerstand entgegengesetzt. Dieser Überlegung zufolge kann solche Klebkraft nur bei Material großer Permeabilität bemerkbar werden, was die Erfahrung bestätigt.

Ich kann es mir nicht versagen, zum Schluß dieses Abschnittes noch einmal auf die anfangs aufgeworfene Frage: „Was ist Magnetismus?“ zurückzukommen. Die in diesem Kapitel erworbenen Kenntnisse der elektromagnetischen Eigenschaften des Raumes und der Stoffe genügen, um wenigstens den Weg verstehen zu können, auf dem man, von der modernen Atomtheorie ausgehend, zu einer Beantwortung der Frage zu kommen sucht.

Ein um einen positiv elektrisch geladenen Kern in einer K e p l e r s c h e n Bahn herumlaufendes Elektron (negativ elektrisch geladenes Teilchen) wirkt nach außen, wie ein diese Bahn durchfließender elektrischer Strom, erzeugt also um sich ein elektromagnetisches Feld. In einem Atom eines jeden Elementes kreisen nun eine ganze Anzahl solcher Elektronen, so daß das Atom einem kleinen Magnet mit einem kleinen magnetischen Moment — als solches bezeichnet man bei einem Stabmagnet das Produkt aus Polstärke und Abstand der beiden Pole voneinander — gleicht. In einem aus ungeheuer vielen Atomen zusammengesetzten Körper sind diese kleinen Elementarmagnete normalerweise verschieden gerichtet, so daß nach außen hin eine magnetische Wirkung nicht zu verspüren ist, und diese Unordnung wird durch die Wärmebewegung (auch im festen Körper) aufrechterhalten. Auch wenn wir das Stück in ein magnetisches Feld bringen, tritt keine Ordnung auf, da nämlich — wie die Kreiseltheorie lehrt — das Feld den durch das herumlaufende Elektron gebildeten Elementarmagnet, dessen Achsenrichtung gegen die Feldrichtung um den Winkel α geneigt sei, zu einer Präzessionsbewegung veranlaßt, d. h. die Achse des Magnets den Mantel eines Kegels mit dem Öffnungswinkel 2α um die Feldrichtung als Achse beschreiben läßt. Das Elektron führt aber daher außer der ursprünglichen Bahnbewegung noch eine vom Feld erzwungene kreisende Bewegung um die Feldrichtung aus, so daß eine kleine Komponente einer magnetischen Feldstärke in Richtung des erzeugenden Magnetfeldes von

dem kreisenden Elektron ausgeht, die aber — wie sich zeigen läßt — dem erzeugenden Feld entgegenwirkt. Diese Bewegung, die also in allen Elementen auftreten muß, führt danach zu Erscheinungen, die wir als diamagnetische bezeichnet haben. — Außer diesen um den Kern herumlaufenden Elektronen gibt es nun aber auch im Kern selbst Elektronen, und zwar kreisen diese um die Mitte des Kerns mit außerordentlich großer Geschwindigkeit, wodurch sie dem Kern selbst ein magnetisches Moment erteilen, wie die äußeren Elektronen dem Atom (und zwar von einer Größenordnung, wie sie die Beobachtung fordert). Endlich beherbergt der Kern noch positiv geladene Teilchen (Protonen), die in entgegengesetzter Richtung wie die Elektronen um die Mitte herumlaufen¹⁾. Dadurch, daß Teilchen in entgegengesetzten Richtungen im Kern rotieren, kommt eine Kreiselwirkung, die die Rotations- oder Kreiselachse zu erhalten sucht, nur in geringem Maße zustande, so daß nun ein äußeres magnetisches Feld die Kerne und damit die Atome zu richten vermag. Ist eine solche Kreiselwirkung gar nicht vorhanden, heben sich mit anderen Worten die Drehimpulse im Kern, die von Elektronen und Protonen stammen, auf, so haben wir offenbar ferromagnetisches Material vor uns; hat der resultierende Drehimpuls einen endlichen Wert, so daß eine richtende Wirkung von außen wegen der nun bemerkbaren Kreiselwirkung nur noch im geringen Maße zu verspüren ist, so ist der Stoff paramagnetisch; und besitzt endlich der Drehimpuls einen sehr großen Wert, so daß eine Richtung nicht mehr möglich ist, also eine Magnetisierung nicht wahrnehmbar und die diamagnetische Wirkung der äußeren Elektronen übrigbleibt, so ist der Stoff diamagnetisch. Die genauere theoretische Verfolgung dieser Vorstellungen führt zu Resultaten, die den Beobachtungen, wie es scheint, nicht widersprechen und zum Teil sogar von den Beobachtungen direkt gestützt werden. Im einzelnen näher darauf einzugehen, ist nicht möglich; man kann aber doch aus diesen

1) Um einen Begriff der Größenverhältnisse zu geben, sei bemerkt: Als magnetisches Moment M des Eisenatoms ergab sich experimentell der Wert $2,02 \cdot 10^{-20}$ in CGS-Einheiten; rechnet man mit einer Geschwindigkeit $v = 2 \cdot 10^{10}$ cm/sec der Elektronen in einer Bahn mit dem Radius $r = 5 \cdot 10^{-12}$ cm, so ergibt sich aus $M = \frac{1}{2} n \cdot e \cdot r \cdot v$ mit der Ladung $e = 1,58 \cdot 10^{-20}$ CGS-Einheiten und der Zahl $n = 26$ der Elektronen für M der Wert $2,07 \cdot 10^{-20}$. (Vgl. Kotarô Honda, ZS. f. Phys. 47, 691, 1928.)

wenigen Andeutungen erkennen, daß solche Annahmen die verschiedenartigen Eigenschaften der Elemente in magnetischer Beziehung verständlich zu machen vermögen. Nicht ganz befriedigend ist es freilich, daß diese Annahmen nicht genügend durch Beobachtungen auf anderen Gebieten begründet sind und also zum Teil den Charakter der ad hoc gemachten Hypothesen besitzen. Es scheint durchaus möglich, daß den Elektronen selbst besondere Eigenschaften zukommen, die die magnetischen Erscheinungen bedingen; in dieser Richtung sind in letzter Zeit tiefgehende Betrachtungen und Rechnungen von Frenkel¹⁾, Iwanenko und Landau²⁾ angestellt worden.

7. Die elektrostatische Aufbereitung und die Elektrofilter.

Daß die elektrostatische Aufbereitung verhältnismäßig selten Anwendung findet, hat seinen Grund in der Hauptsache wohl darin, daß das aufzubereitende Material vor allem gut trocken sein muß. Außerdem wird meist Staubfreiheit gefordert werden müssen, sobald es sich nicht direkt um elektrische Entstaubungsanlagen handelt, die auch zu den Methoden der elektrostatischen Aufbereitung gezählt werden müssen. Es ist allerdings die Frage, ob nicht dieses Stadium spärlicher Anwendungsmöglichkeit in absehbarer Zeit überwunden und einem anderen weichen wird, nämlich dann, wenn die vielen Erfahrungen, die man bei der elektrischen Entstaubung gemacht hat, und die sorgfältigere theoretische Behandlung der Aufbereitungsanlagen zu Verbesserungen auch dieser anderen Methoden geführt haben werden. Wir werden uns daher in diesem Abschnitt hauptsächlich der elektrischen Entstaubung widmen und nur einige Bemerkungen über die früheren Methoden der elektrischen Aufbereitung von Material der Korngrößen 2 bis 0,5 mm vorausschicken, um diesen Vorgang wenigstens in physikalischer Beziehung zu charakterisieren.

Die Abb. 58 zeigt das Schema einer Versuchsanlage, deren Wirkungsweise qualitativ leicht verständlich ist. Das Material wird bei *C* aufgegeben und fällt auf die Verteiler *D* und von diesen

¹⁾ J. Frenkel, ZS. f. Phys. 49, 31, 1928.

²⁾ B. Iwanenko und L. Landau, ebenda 48, 340, 1928.

in die Ecken E ; von hier gelangt das Gemisch auf die elektrisch geladenen Metallplatten F , von denen sie je nach ihrer Natur mehr oder weniger Ladung aufnehmen und infolgedessen mehr oder weniger stark abgestoßen werden, so daß ein Auffangen in verschiedenen Behältern möglich ist. In der abgebildeten Anlage gelangen die wenig oder gar nicht geladenen Teilchen auf die Platte H und von dort auf eine zweite wie F geladene Platte F' , die das leichter elektrisierbare Material auf G' treibt, so daß es sich mit dem von G kommenden in einem Kasten sammelt. Einer genauen theoretischen Behandlung ist die an sich übersichtliche

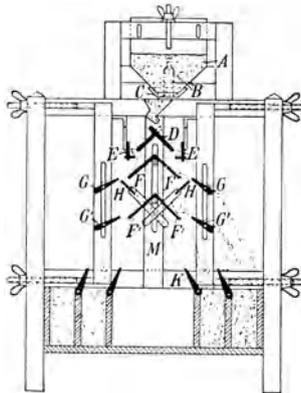


Abb. 58. Elektrostatischer Erzscheider. Schematische Skizze.

Versuchsanlage nicht zugänglich. Man erkennt, daß um F herum ein elektrostatisches Feld, das bis $D E G$ gewiß merkbar sein wird, sich ausbildet, das mit dem Schwerkraftfeld der Erde zu den Bewegungen der geladenen und nicht geladenen Teilchen Anlaß gibt. Infolge der komplizierten Konfiguration der leitenden Teile aber ist dieses Feld auch nicht annähernd bekannt. Wie bei den in den früheren Kapiteln behandelten Aufbereitungsanlagen kann man aber eine rohe, schematische Behandlung durchführen, die wenigstens erkennen läßt, welche Kräfte hier wirksam sind und welche Parameter, welche Materialkonstanten die durch die Kräfte verursachten Bewegungen der Teilchen bestimmen.

Wenn ein Teilchen von geringer Höhe auf die Platte F fällt, so gibt es sich damit in das elektrische Feld zwischen F und G und wird, da es nicht völlig ungeladen oder unpolarisiert bleibt,

eine Bewegung ausführen, die von der unter dem alleinigen Einfluß der Schwere verlaufenden abweicht. Ist das Teilchen elektrisch leitend — dazu kann man bei diesen Vorgängen die gediegenen Metalle, ferner Pyrit, Bleiglanz, Molybdän, Kupferglanz, Silberglanz rechnen —, so wird es bei der Berührung mit F eine Ladung annehmen, die, wie sich zeigen läßt, ungefähr dem Quadrat des Korndurchmessers proportional und um so größer ist, je größer die Ladungsdichte der Platte F ; der Proportionalitätsfaktor wird von der Form des Korns und der Oberflächenbeschaffenheit und Reinheit abhängen. Infolge der aufgenommenen Ladung wird das Teilchen von der Platte F senkrecht zur Platte einen Impuls in Richtung auf G zu erhalten, der proportional der Ladung der Platte F und der Ladung des Teilchens sein wird. Solange das Teilchen sich in dem homogenen Teil des Feldes FG befindet, wird die vom Feld herrührende Kraft von der augenblicklichen Entfernung des Teilchens von F unabhängig sein. Außer dieser Kraft wirkt natürlich noch die Schwerkraft, die der Masse proportional ist, also bei gleichem Material der dritten Potenz des Korndurchmessers und bei verschiedenem Material von gleicher Größe dem spezifischen Gewicht. Den bewegenden Kräften entgegen wirkt die Reibung, die dem Quadrat des Korndurchmessers im allgemeinen proportional gesetzt werden kann und von der Geschwindigkeit abhängt. Leitende Körner gleichen Korndurchmessers, die also gleiche Reibung erfahren und mit etwa der gleichen Geschwindigkeit auf F auffallen, müssen sich danach offenbar nach dem spezifischen Gewicht trennen lassen, oder bei gleichem spezifischen Gewicht, aber verschiedener Größe nach der Größe. Freilich ist es wahrscheinlich, daß die Körner im allgemeinen nicht mit gleicher Geschwindigkeit auf F auftreffen, indem sie schon eine elektrische Ladung mitbringen, die sie durch Reibung an anderen Teilchen oder bei irgendwelchen anderen Vorgängen aufgenommen haben, und durch die sie infolge der anziehenden oder abstoßenden Wirkung von F in ihrer Bewegung beschleunigt oder verzögert werden. Beeinflußt wird ferner die Bewegung, und zwar leider bisher völlig unkontrollierbar, durch Adsorptionskräfte zwischen Platte und Teilchen, sogenannte Haftkräfte, die man häufig beobachtet und noch nicht genauer kennt, und ferner durch die Möglichkeit der Zusammenballung oder des

Ladungsaustausches zusammenstoßender Teilchen, die auf F zu- oder von F fortfliegen.

Die schlechtleitenden Teilchen verhalten sich ganz anders. In ihnen wird — was freilich auch bei den leitenden Teilchen der Fall ist — eine Ladung schon bei dem Herannahen an F influenziert, die zunächst im Gegensatz zu den leitenden Teilchen zu einem Anhaften an F führt. Während des Haftens wird in kürzerer oder längerer Zeit ein Teil der influenzierten Ladung an F abgegeben, so daß bald eine abstoßende Wirkung bemerkbar werden muß. Dann bewegt sich das Teilchen ebenso, wie wenn es ein leitendes Teilchen wäre, auf G zu, freilich wird nur selten die Ladung so groß sein, wie die leitender Teilchen gleicher Korngröße, weshalb häufig ein Abrutschen von der Platte infolge der Wirkung der Schwere eintreten wird, wie die Beobachtung auch zeigt. Als solches schlecht leitendes Material gelten nach Richards die Gangarten, Sandstein, Granit, Flußspat, Monazit, Zinkblende. In Wirklichkeit sind die Vorgänge aber noch dadurch wesentlich kompliziert, daß wir vor F (in Richtung nach E und G) kein auch nur annähernd homogenes Feld haben. Die leitenden Teilchen werden infolge der Verschiedenheit des Feldes an verschiedenen Stellen ihrer Bahn sich anders bewegen, als im homogenen Feld. Und gar die nicht leitenden Teilchen, die als elektrische Dipole den kleinen Magnetchen der Eisenfeilspäne vergleichbar sind, werden im inhomogenen Feld eine schwer übersehbare Bahn beschreiben. Sie stellen sich so ein, daß die Energie des elektrostatischen Feldes möglichst klein sein wird, sie werden an Stellen größerer Feldstärke gezogen, wenn die als Dielektrizitätskonstante bezeichnete Materialgröße größer ist als die des umgebenden Mediums, und bewegen sich infolgedessen nach Stellen größerer Feldstärke mit einem um so größeren Impuls, je größer die Dielektrizitätskonstante ist. Man erinnere sich bei diesen Erscheinungen an die ähnlichen oben besprochenen, die die paramagnetischen Körper mit der Permeabilität μ zeigen. Die hier wirksame Kraft mag man Gradientkraft nennen, während man die Anziehung infolge der Ladung Coulombsche Kraft nennt. Bei den nicht leitenden Teilchen spielen offenbar beide Kräfte eine Rolle, und da, wie sich nachweisen läßt, die Gradientkraft mit der dritten Potenz der Korngröße wächst, überwiegt sie sehr bald

die C o u l o m b s c h e, wenn die Korngröße größer und größer genommen wird ¹⁾).

Besonders bei größeren Teilchen werden also die Vorgänge undurchsichtig, zumal die Teilchen dann meist nicht völlig rein aus leitender Substanz bestehen. Die Undefiniertheit der größeren Teilchen in elektrischer Beziehung ist offenbar auch der Grund dafür, daß, wie die Praxis gelehrt hat, ein Durchmesser von 2 mm ungefähr schon die obere Grenze der elektrischen Aufbereitbarkeit

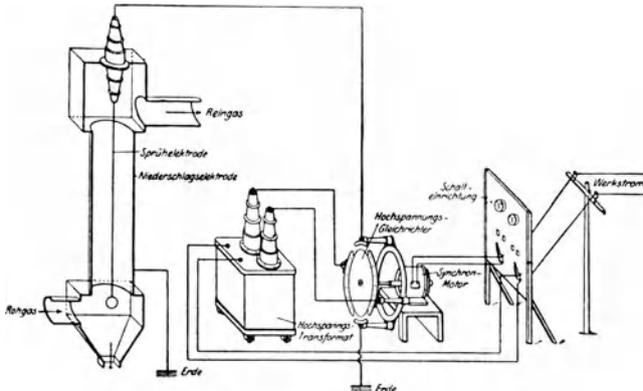


Abb. 59. Schema einer elektrischen Entstaubungsanlage.

darstellt. Material von 1 bis 2 mm Korngröße ist noch schwierig aufzubereiten, solches von 0,5 bis 1 mm ist gut verarbeitbar, Staub schlecht.

Die Überlegungen lassen deutlich erkennen, daß die elektrostatischen Trennverfahren in verschiedenen Richtungen weiter ausgearbeitet werden können und Aussichten größerer Anwendbarkeit vorhanden sind, besonders wenn es gelingt, nicht vollkommen getrocknetes Material in einem Strom voneinander getrennter Körner auf die elektrisch geladenen Platten zu bringen.

Wesentlich anderer Art sind die Kräfte und Erscheinungen, die auftreten, wenn die Spannungen zwischen F und G so hoch werden, daß eine elektrische Entladung eintritt. Das ist der Fall bei den Entstaubungsanlagen, den sogenannten Elektrofiltern, die jetzt in vielen Industrien Anwendung gefunden haben. Das Schema einer solchen Filter- oder Gasreinigungsanlage sehen

¹⁾ R. Seeliger, ZS. f. techn. Phys. 7, 49, 1926.

wir in Abb. 59, die ohne Beschreibung verständlich ist. In den links gezeichneten Zylinder, der mit Erde leitend verbunden ist, ist gut isoliert ein auf hoher Spannung (Größenordnung 50 000 Volt) befindlicher Draht eingeführt, der als Sprühelektrode bezeichnet wird. Das z. B. mit Kohlenstaub verunreinigte Gas tritt von unten ein, wird in dem starken elektrischen Feld von den kleinen Kohlenpartikelchen befreit, die sich an der Niederschlagselektrode absetzen und tritt gereinigt oben aus. Der abgeschiedene Staub fällt von der Niederschlagselektrode in den unten eingesetzten Trichter und wird dort gesammelt. Bei dieser Trennung des Staubes vom Gas treten wesentlich andere Erscheinungen ins Spiel, insofern hier durch die bei der hohen Spannung auftretende Entladung Ionen erzeugt werden, elektrisch geladene Atome oder Moleküle, die von den Staubteilchen eingefangen werden und die Staubteilchen mit Ladungen versehen. Auch diese Vorgänge sind quantitativ nicht genau geklärt, qualitativ lassen sie sich einigermassen übersehen ¹⁾.

Es handelt sich bei diesen Entladungen um eine der sogenannten selbständigen Entladungsformen, zu denen es bei hohen Spannungen infolge des **Ionenstoßes** kommt. Im Gas befinden sich, wenn es elektrisch geladene Körper umströmt, immer elektrisch geladene Atome oder Moleküle oder Molekülteile, die Ionen, indem ein Elektron, die kleinste elektrische Ladungseinheit mit negativem Vorzeichen, dem Atom oder Molekül fehlt oder von ihm aufgenommen ist. Meist findet man solche Ionen auch ohne geladene Körper im Gas, da sie leicht durch verschiedene Strahlungen, die als „Ionisatoren“ wirken, erzeugt werden können. Z. B. werden durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht Elektronen von den Atomen und Molekülen abgespalten, es wird, wie man sagt, eine Ionisation hervorgerufen; Röntgen- und Radiumstrahlung tun dasselbe, auch durch Flammen und glühende Drähte kann eine Ionisation bewirkt werden. Ferner treten aus Spitzen geladener Körper infolge der hohen Ladungsdichte Ladungen auf die Gasmoleküle, diese ionisierend und abtreibend.

¹⁾ W. Deutsch, Metall u. Erz **24**, 356, 1927; ZS. f. techn. Phys. **6**, 423, 1925; Ann. d. Phys. **76**, 729, 1925. — J. Stark und W. Friedrichs, Wiss. Veröff. a. d. Siemens-Konz. **2**, 208, 1922. — H. Rohmann, ZS. f. Phys. **17**, 253, 1923.

Befindet sich das Gas in einem elektrischen Feld, das z. B. durch Anlegen einer Spannungsdifferenz an zwei im Gas befindliche Metallplatten (Elektroden) erzeugt ist, so werden die positiven und negativen Ionen einen Antrieb in der Richtung und gegen die Richtung des Feldes erfahren, dem sie folgen. Die Ionen finden aber in dem gasförmigen Medium einen Widerstand, eine Reibung; die Gasmoleküle lassen also eine sehr schnelle Bewegung der Ionen nur zu, wenn die Feldstärke, d. i. die in gewissen Einheiten gemessene Kraft, die auf die Elektrizitätsmenge 1 wirkt,

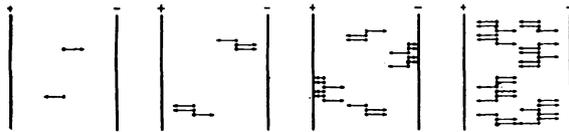


Abb. 60. Entstehung einer „Ionenlawine“.

an der Stelle sehr hoch ist. Dann aber kann es kommen, daß beim Aufprall eines Ions auf ein Gasatom oder Molekül eine erneute Elektronabspaltung stattfindet, d. h. ein neues Ion gebildet wird, das sich nun infolge des herrschenden Feldes gerade so benimmt und weitere Ionenbildung einleitet. Man spricht in dem Fall von der Entstehung einer Ionenlawine, indem mehr und mehr Ionen in Richtung der Bewegung des ersten Ions erzeugt werden, wie das in den vier schematischen, nebeneinanderstehenden, zeitlich aufeinanderfolgenden Bildern der Abb. 60 angedeutet ist. Mit diesen in einer Richtung sich bewegenden Ionen wird Elektrizität transportiert, d. h., falls sie die andere Elektrode erreichen, ein elektrischer Strom geschaffen. Diese Stoßionisation beginnt bei einer ganz bestimmten Feldstärke, die vom Druck und der Art des Gases abhängig ist und an einzelnen Teilen des Raumes oder auch im ganzen Raum zwischen den beiden Elektroden auftreten kann, wenn diese eine geeignete Spannungsdifferenz besitzen. Sind die Elektroden zwei parallele, im Vergleich zu ihrer Entfernung ausgedehnte Platten, so hat, abgesehen von den Randpartien dieser Elektroden, die Feldstärke an allen Stellen zwischen den Elektroden den gleichen Wert, der gleich ist der Spannungsdifferenz dividiert durch die Entfernung. Bestehen die beiden Elektroden stattdessen aus zwei konzentrischen Zylindern, z. B. aus einem

Hohlzylinder und einem in der Achse desselben befindlichen Draht, so ist die Feldstärke in der Nähe der Drahtoberfläche viel größer, als in der Nähe des umgebenden Zylinders (Zylinderkondensator). In Abb. 61 ist die Feldverteilung in einem geladenen Platten- und einem geladenen Zylinderkondensator wiedergegeben; die Feldintensität an einer Stelle des Raumes ist dem Abstand der gezeichneten Feldkraftlinien an der Stelle proportional und aus den nebenstehenden Diagrammen zu entnehmen. Bei dem Zylinder-

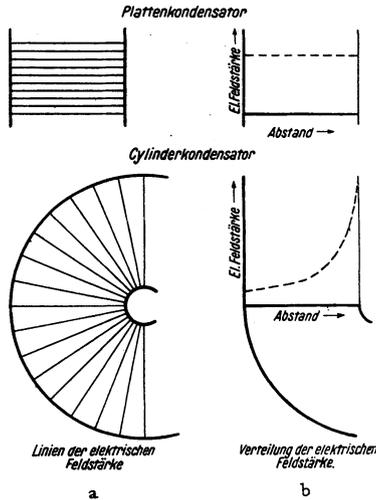


Abb. 61. Darstellung der elektrischen Feldstärke.

kondensator kann es sich ereignen, daß in der Nähe des Drahtes Stoßionisation auftritt, die sich aber nicht in größere Entfernung vom Draht hin fortsetzt, und es bildet sich eine Ionenwolke aus, eine Raumladung. Die gebildeten Ionen werden sich dann zum Teil freilich auch bis zur Zylinderwand bewegen und so einen elektrischen Strom herstellen; zum Teil werden sie sich indessen mit entgegengesetzt geladenen Teilen wieder vereinigen und als Ionen ausscheiden. Durch die Stoßionisation und insbesondere durch die Raumladung tritt in der Regel allerdings auch eine Änderung der Feldverteilung ein, so daß unter Umständen eine in der Nähe des Drahtes begonnene Stoßionisation doch weiter in das Innere des Mediums hinein sich fortpflanzt. Es hängt dies wesentlich von der Beschaffenheit der Elektroden und ihrer Entfernung ab. Der

elektrische Strom, der sich bei dieser Erscheinung ausbildet, stellt eine elektrische Entladung dar, die man „Korona“ nennt, eine meist ganz geräuschlose, zuweilen leise summende Lichterscheinung in Form einer Strahlenaureole oder Lichthaut um die Elektroden (häufig nur um die eine, nämlich die mit dem kleineren Krümmungsradius der Oberfläche). Zuweilen, und zwar wenn der Strom über einen bestimmten Wert anwächst, tritt statt dieses stetigen Stromes eine diskontinuierliche Entladung ein, die man als Funken bezeichnet und meist mit starkem Geräusch verbunden ist. Bei diesen Entladungsformen, wie auch bei der Bogenentladung, die wir in der Bogenlampe beobachten können, haben wir es mit selbständigen Entladungen im Gegensatz zu den unselbständigen zu tun, die nur durch einen Ionisator unterhalten werden können, welcher immer wieder neue Ionen schafft, die sich infolge der geringen Stärke des Feldes nur so langsam bewegen, daß ihr Anprall an umgebende Atome oder Moleküle nicht zu einer Ionisation derselben führt.

Bei der elektrischen Entstaubung, Elektrofilterung, Brüdenentstaubung handelt es sich um die als Korona bezeichnete Entladung¹⁾. Das Überschlagen eines Funkens von der in der Mitte des Zylinders befindlichen Sprühelektrode muß aus verschiedenen Gründen vermieden werden. Erstens sinkt im Augenblick des Funkenüberganges die Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden merklich und infolge des sich im Funken ausbildenden Stromes werden erhebliche Mengen elektrischer Energie in Wärmeenergie umgewandelt, die dem eigentlichen Arbeitsvorgang verloren geht. Zweitens treten bei den gewaltsamen Überschlägen und Wärmeentwicklungen leicht Zerstörungen auf. Weiter werden die Stoßionisationen in der Umgebung der Funkenbahn geschwächt und damit auch die Entstaubung, und endlich erfolgt bei der Braunkohlenentstaubung durch Funken leicht eine Zündung und Explosion. Die Beobachtung hat gelehrt, daß bei positiver elektrischer Ladung des Sprühdrahtes die Funkenbildung leichter eintritt, als bei negativer Ladung, insbesondere, wenn elektrische Schwingungen infolge der Benutzung eines Gleichrichters bei

¹⁾ Vgl. u. a. Voigt, ZS. f. Gew. u. Verwertung d. Braunkohle 25, 435, 469, 1926. — G. Franke, ebenda 25, 249, 590, 1926; 23, 745, 1925. — K. Ehring, ebenda 24, 813, 836, 1926.

Erzeugung der hohen Spannung aus Wechselstrom auftreten. Man verwendet daher in der Technik bei der elektrischen Gasreinigung und Kohlenentstaubung nur eine negativ geladene Sprühelektrode.

Bei der Koronaentladung stoßen die Ionen, insbesondere die negativ geladenen, von der negativen Sprühelektrode wegwandernden Ionen im Gasraum auf Staubteilchen und laden diese negativ auf, so daß sie ebenfalls einen Antrieb zur umgebenden Sammelelektrode erfahren. Da sie im Vergleich zu den Ionen sehr groß sind, so werden sie sich, auch wenn sie mehrere Ionen aufgesammelt haben, nur langsam in Richtung des Feldes bewegen, so daß das Reinigungsrohr (die Sammelelektrode) eine gewisse Länge haben muß, wenn die Teilchen bei dem Durchströmen des Zylinders die Wandung noch erreichen sollen. Je mehr Ladung das Teilchen aufnimmt, um so schneller wird es natürlich wandern. Daß die Ladung aber über einen gewissen Betrag hinaus nicht steigen kann, ist selbstverständlich, denn bei einer bestimmten Ladung wird das Teilchen neu ankommende Ionen abstoßen, auch wenn sie mit einer großen Geschwindigkeit sich dem Teilchen nähern; freilich je größer das Teilchen ist, um so größer wird die Ladung sein können, die es überhaupt aufzunehmen vermag. D e u t s c h ¹⁾ hat nachgerechnet, daß man auf Grund dieser Betrachtungen die unter gewissen bekannten Bedingungen in einer Reinigungsanlage abgeschiedene Menge von Staubteilchen voll erklären kann. Er findet für die Wanderungsgeschwindigkeit von Teilchen verschiedener Größe mit den von ihm berechneten Grenzladungen die in der Tabelle 3 verzeichneten Werte. Zum Vergleich sind die entsprechenden Werte für ein Ion mit einer einzigen Ladung in der letzten Spalte angegeben. Die berechneten Geschwindigkeiten stimmen gut überein mit denen, die man aus der beobachteten Abscheidung von Teilchen ableiten kann. Z. B. erhielt A n d e r s o n , wie D e u t s c h mitteilt, in einer Zementfabrik, in der Pottasche gewonnen wurde, als Geschwindigkeit des Teilchens, bezogen auf die Einheit der Feldstärke, 0,53 cm/sec, für Röstofengase 0,32 cm/sec.

Von wesentlicher Bedeutung für die Wanderungsgeschwindigkeit der Staubpartikelchen ist die Größe der inneren Reibung

1) D e u t s c h , l. c.

Tabelle 3.

Wanderungsgeschwindigkeit c von Staubteilchen.					
Radius in Zentimeter	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	$6 \cdot 10^{-8}$ (Ion)
Zahl der Elementarladungen	4640	376	28	2	1
c in cm/sec im Feld 1 egs . . .	0,69	0,56	0,42	0,35	4,50

des Gases, wie die Überlegung leicht ergibt, und die Erfahrung es bestätigt. Dementsprechend ist sie viel größer in Wasserstoff als in Luft. Es muß daher die Länge des zylindrischen Rohres, an dem die Partikelchen sich abscheiden sollen, je nach dem Gas verschieden gewählt werden. In Übereinstimmung damit wird auch der Reinigungsgrad η eines Apparates, das ist das Verhältnis der niedergeschlagenen Menge zur Gesamtmenge, wesentlich von L , der Länge des Rohres, mit bestimmt. Man findet $\eta = 1 - e^{-kL}$, wenn k von der Geschwindigkeit des Gasstromes und der elektrischen Feldstärke zwischen den Elektroden abhängt, für ein und dasselbe Gas aber im übrigen eine Konstante ist. Die Richtigkeit kann man leicht durch Hintereinanderschalten mehrerer Reinigungszyylinder gleicher Länge prüfen und erweisen. Der Druck des Gases bleibt infolge der Unabhängigkeit der inneren Reibung und der Wärmeenergie vom Druck ohne merklichen Einfluß.

Zur Brüdenentstaubung ¹⁾ bei Brikettfabriken, zur Gewinnung des feinen Kohlenstaubes solcher Anlagen, diese elektrische Methode zu verwenden, die zur Abscheidung kleiner Staubpartikelchen aus einem Gase, sei es nun, um die Gase zu reinigen, sei es, um die Staubpartikelchen als wertvolles Material zu sammeln, heute in so vielen Anlagen der Technik Anwendung findet und vielfach recht vollkommen durchgebildet ist, stößt auf gewisse Schwierigkeiten durch die leichte Entzündbarkeit des mit dem Sauerstoff der Luft gemischten, feinen Kohlenstaubes bei Funkenüberschlag, so daß sich ihre Verwendbarkeit, von der man heute überzeugt ist, erst nach einer Reihe von Fehlschlägen erweisen ließ.

Die mit Recht gefürchteten Staubexplosionen ²⁾, das sind solche Verbrennungsvorgänge, die mit großer Heftigkeit in kürzester Zeit

¹⁾ „Brüden“ nennt man das bei der Trocknung von Material (z. B. Braunkohle) abströmende Wasserdampf-Luft-Gemisch; es enthält mehr oder weniger Staubmenge des zu trocknenden Materials, über das es geströmt ist.

²⁾ Beyerndorffer, Staubexplosionen, 1925. Steinkopff, Dresden und Leipzig.

verlaufen, können nur zustande kommen, wenn der Staub – wie das bei der Kohle der Fall ist – brennbar und in richtiger Verteilung vorhanden ist, wenn genügend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht und dazu eine auslösende Energie, die meist eine Wärmeenergie oder elektrische Energie ist. Systematische Untersuchungen, über die z. B. Fischer¹⁾, Bergwerksdirektor auf der Grube Ilse, berichtet, haben gelehrt, daß als auslösende Energie für eine Braunkohlenstaubexplosion ein Glimmen von

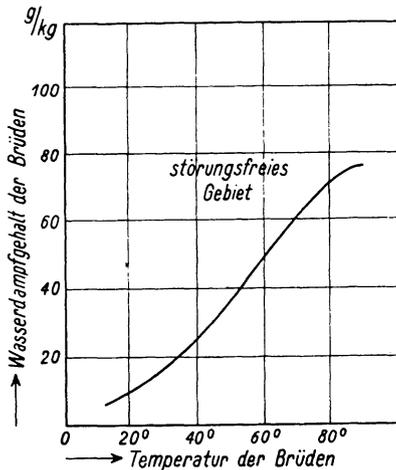


Abb. 62. Grenze des Störungsgebietes bei der Brüdenreinigung.

Kohlenteilchen an den Sprühelektroden oder ein Kurzschlußfunken oder Überschlag infolge von Kettenbildung in größeren Mengen aufgewirbelten Staubes genügt, vorausgesetzt, daß eine ausreichende Menge Staub in der Luft vorhanden, der Feuchtigkeitsgehalt des Staubes nicht zu hoch und die Temperatur nicht zu niedrig ist. Sie haben überdies zur Kenntnis kritischer Werte der Menge, der Feuchtigkeit und der Temperatur geführt, Werte, die freilich von der Kohlensorte und der elektrischen Feldstärke, d. h. bei gegebener Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden von der Konfiguration der Elektroden abhängig sind. Sie lassen erkennen, was einleuchtet, daß die Explosionsgefahr mit abnehmender Feuchtigkeit und zunehmender Temperatur zunimmt, und daß

¹⁾ Fischer, ZS. V. D. I. 70, 253, 1926.

die Grenzlinie, oberhalb der eine Gefahr nicht besteht, in einem Diagramm mit dem Wasserdampfgehalt als Ordinate, der Temperatur als Abszisse ungefähr den in Abb. 62 gezeichneten Verlauf nimmt. Die relative Feuchtigkeit kann, da verhältnismäßig niedrigen Werten bei höheren Temperaturen schon ein beträchtlicher Wasserdampfgehalt der Brüden entspricht, um so niedrigere Werte zeigen, je höher die Temperatur; daher der Abfall der Grenzlinie mit wachsender Temperatur in Abb. 63. Die leichte Entzünd-

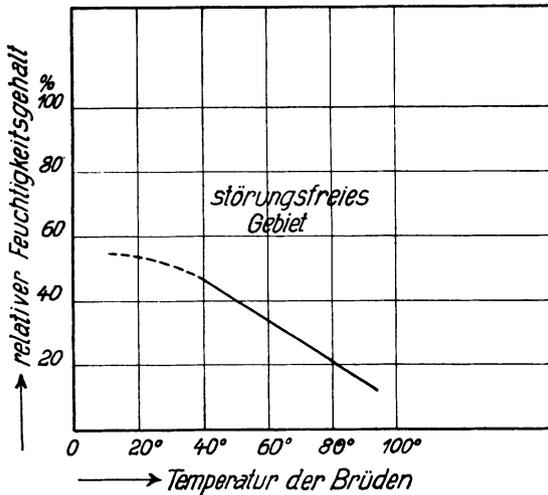


Abb. 63. Grenze des Störungsgebietes bei der Brüdenreinigung.

barkeit und die Größe der Explosionsgefahr bei größerer Trockenheit hat ihren Grund in der leichten Erhitzbarkeit des trockenen Staubes im Sauerstoff gegenüber der des feuchten; auch nimmt die Oxydierbarkeit des Kohlenstaubes mit der Temperatur merklich zu. Das Einhalten der Bedingungen, unter denen ein sicheres Arbeiten möglich ist, macht nun hauptsächlich deshalb Schwierigkeiten, weil sie an einen sehr regelmäßigen Zustrom des Wasserdampf-Luft-Kohlenstaubgemisches gebunden sind. Zerkleinerte Braunkohle mag z. B. aus *a* durch das Füllrohr *b* (Abb. 64) in die Röhren eines Trockners *c* gelangen, von dem aus sie in die Schnecke *f* zum Weitertrocknen fällt. Der über der Kohle im Trockner aus *d* vorbeistreichende Luftstrom zum Trocknen der Kohle führt den Kohlenstaub mit sich fort und wird

mit gutem Erfolg durch einen elektrischen Reiniger geleitet, wie er z. B. in Abb. 65 ersichtlich ist, der direkt an den Röhrentrockner *c* geschaltet wird. [Ohne einen solchen Elektrofilterapparat kann man, freilich viel unvollkommener, diesen Staub rein mechanisch etwa in der Weise abfangen, daß man den Dampfstrom (vgl. Abb. 64) durch die Kammern *g, h, i, k*, in den Schlot gelangen läßt und den nicht in den Kammern an den Wänden abgesetzten Staub durch Brausen bei *m* und *l* zurückzuhalten sucht; aus dem

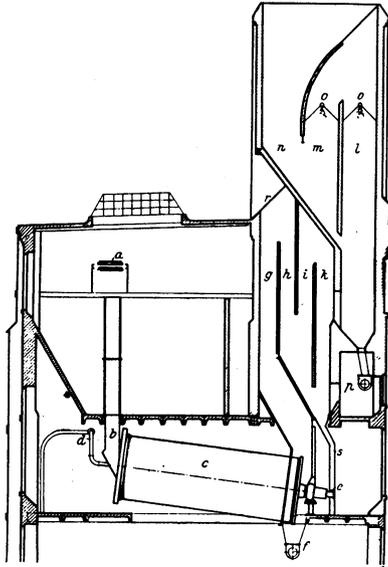


Abb. 64. Kohlenentstaubungsanlage.

Wasser wird der Staub durch Filteranlagen herausgezogen.] Stockt aus irgend einem Grunde (z. B. schon bei Abstellen der Anlage) die Kohlezufuhr zum Trockner, so bleibt der Luftstrom trockner und es können Verhältnisse eintreten, die zur Explosion führen. Man sucht daher eine Anlage in erster Linie dadurch zu sichern, daß man für diesen regelmäßigen Zustrom sorgt, oder dafür, daß zur rechten Zeit Unregelmäßigkeiten desselben erkannt werden. In verschiedener Weise kann die Kohlezufuhr bzw. der Trockendampfverbrauch registriert und mit der Registriervorrichtung eine Sicherung verbunden werden, die die elektrische Anlage außer Tätigkeit setzt, wenn gefahrdrohende Veränderungen eintreten.

Die Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit lassen sich sehr schön erkennen beim völligen Abstellen oder beim Anstellen des Kohlezustromes. Abb.66 zeigt die Änderung des Wasser-

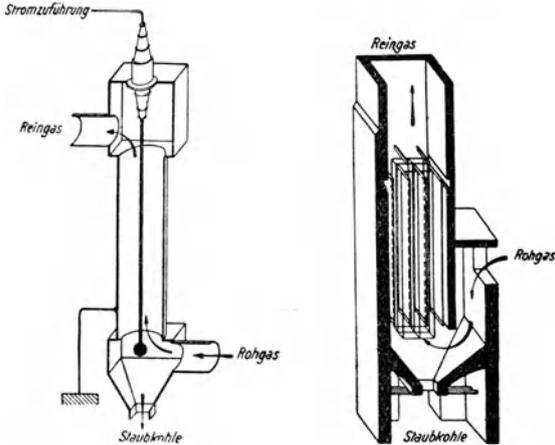


Abb. 65. Führung des Brüdenstromes bei Vertikalfiltern.

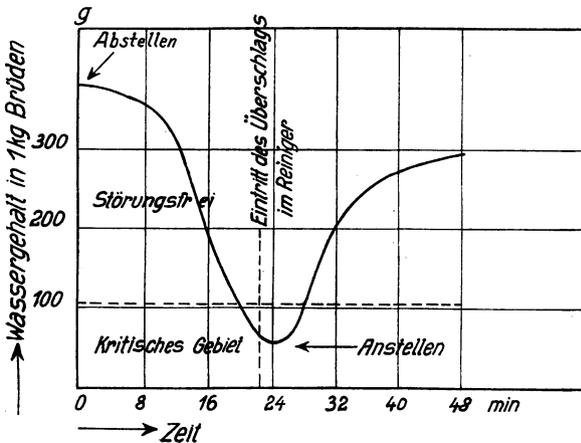


Abb. 66. Änderung des Wassergehaltes bei Ab- und Anstellen des Kohlezustromes.

gehalts in einem Kilogramm Brüden beim Abstellen und Wiederanstellen der Kohlezufuhr zum Röhrentrockner. Die im kritischen Gebiet beobachteten Verpuffungen beweisen, daß man sich in der Gefahrzone befindet. Eine zu große Feuchtigkeit

(Unterschreitung des Taupunktes) muß ebenfalls vermieden werden, da dann die Brüden leitend werden und Überschläge auftreten. Zu vermeiden sind, und das kann durch den Bau der Anlage geschehen, ferner Kohlenstaubansammlungen und Aufwirbelungen in unmittelbarer Nähe der Entladungen und der Elektroden überhaupt. Lange Zeit hat man aus dem Grunde den horizontalen Strom dem vertikalen vorgezogen, da in vertikalen von unten der herunterrieselnde Staub leicht mit herauf-

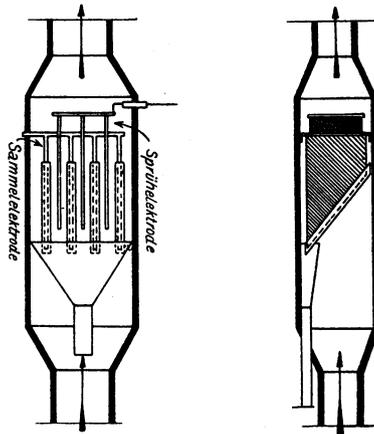


Abb. 67. Ableitung des Filterstaubes in Elektrofiltern.

gewirbelt wird. Ein geeignetes Abfangen des von den Sammel-elektroden herunterfallenden Staubes, derart, daß er von dem von unten eintretenden Dampf nicht erfaßt werden kann, hat aber auch die vertikale Richtung des Stromes verwendbar gemacht. Abb. 67 zeigt eine geeignete Anordnung.

Endlich ist darauf zu achten, daß der Staub den Querschnitt des Rohres möglichst gleichmäßig erfüllt, was durch besondere Ventilatoren erreicht werden muß. Welche gewaltigen Unterschiede der Geschwindigkeit in einem Querschnitt vorhanden sein können, zeigen die Abb. 26 des Abschnittes 3.

Wegen der größeren Trockenheit und größeren Feinheit des Staubes und wegen der damit verbundenen größeren Oberfläche und Sauerstoffadsorption macht die *I n n e n* entstaubung z. B. von Brikettfabriken mit elektrischer Hochspannung wesentlich größere

Schwierigkeiten, wenn auch die Temperatur des Staubes hier in der Regel niedriger ist. Künstliche Erhöhung des Feuchtigkeits- oder Verminderung des Sauerstoffgehaltes durch Zumischen von Rauchgasen ist in der Regel ein wirksames Mittel zum Schutz gegen Explosionen, wenn es in genügend hohem Maße angewandt wird, wodurch die Wirtschaftlichkeit allerdings in Frage gestellt ist. Auch Kohlenkühlung wird mit Vorteil angewandt. Insbesondere muß bei diesen Anlagen darauf geachtet werden, daß die Elektroden

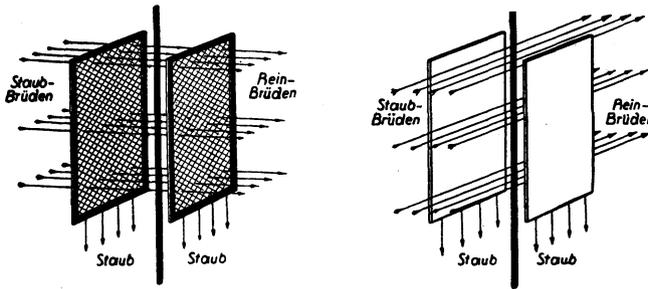


Abb. 68. Verschiedene Führung des Brüdenstromes.

sich nicht mit Staub vollsetzen, weshalb die Querstellung der Sammlerelektroden nur mit Vorsicht angewandt werden darf. (Vgl. Abb. 68.)

Die Ausbildung der Korona erfordert nur wenig Energie, und so sind die elektrischen Entstaubungsanlagen in der Regel ungleich viel vorteilhafter als andere. Bei einer brauchbaren Anlage beträgt die Spannung zwischen 25 und 60 Kilovolt bei 5 bis 20 Milliampere. Es ist zweckmäßig, wenn auch nicht unbedingt notwendig, hochgespannten Gleichstrom zu verwenden, indem bei Wechselstrom nur etwa 60 % der Wirkung des Gleichstromes erzielt wird. In der Regel wird der Gleichstrom aus einem Wechselstromtransformator mit Glühventilen entnommen unter Zuschaltung von Kondensatoren, um eine geringe Fluktuation zu erhalten. Die Entfernung zwischen Sprühelektrode und Sammelektrode beträgt etwa 20 bis 30 cm und wird von den Firmen je nach der Elektrodenanordnung etwas verschieden gewählt. Besondere Beachtung erfordert die Zuführung der Hochspannung zu der Sprühelektrode. Befinden sich die Isolatoren im geschlossenen

Raum, mag er nun von dem eigentlichen Filter abgetrennt sein oder nicht, so wird ihre Oberfläche durch den sich absetzenden Staub und die Feuchtigkeit leitend; infolge der Erwärmung bei Inbetriebsetzung des Trockners verschwindet zwar meist die Wasserhaut, aber doch nur langsam, so daß zu Anfang starke Spannungs- und Stromschwankungen auftreten, die sich nun auch in vermindertem Maße bei jeder neuen Spannungserhöhung wieder zeigen. Abb. 69 gibt diese inkonstanten Verhältnisse nach dem

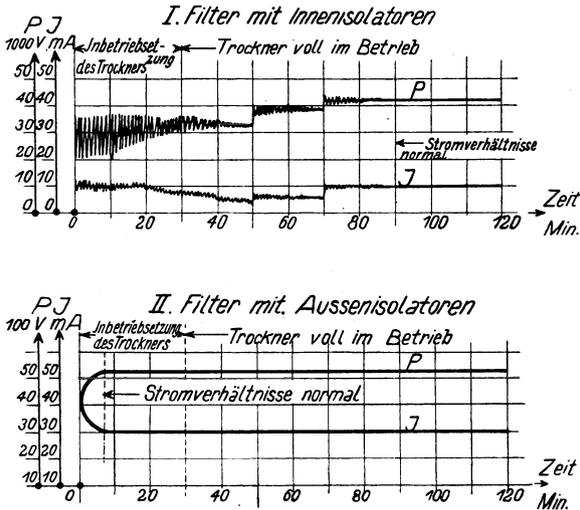


Abb. 69. Stromverhältnisse verschiedener Elektrofilter bei Inbetriebsetzung.

Einschalten des Trockners wieder. Vom Staub müssen die Isolatoren mechanisch gereinigt werden, um die Kriechströme zu vermeiden. Etwas besser bewährt haben sich, wie es scheint, Zuführungen, die an Isolatoren außerhalb des Filters gehalten und frei durch die Wände hindurchgeführt sind. Freilich muß man diese Außenisolatoren nicht unmittelbar an die Durchführungsstellen setzen, da die dort durch den Schlotzug entstehenden Luftwirbel die Isolatoren sehr bald mit Staub überziehen, der wieder zu Kriechströmen Veranlassung gibt. Bei guter Wartung und Sauberhaltung der Außenisolatoren treten in sehr kurzer Zeit konstante Strom- und Spannungsverhältnisse ein, wie es das in Abb. 69 dargestellte Beispiel zeigt.

8. Materialprüfung durch Röntgenstrahlen.

In den früheren Abschnitten ist mehrfach davon die Rede gewesen, daß die Kenntnis der Materialbeschaffenheit für die Entscheidung von großer Wichtigkeit ist, nach welcher Methode die Aufbereitung vorgenommen werden kann, und so mag zum Schluß kurz auf das modernste Hilfsmittel zur Erforschung der Materialstruktur, das ist die Analyse des Materials durch Röntgenstrahlen, eingegangen werden. In der Tat hat die Strukturuntersuchung

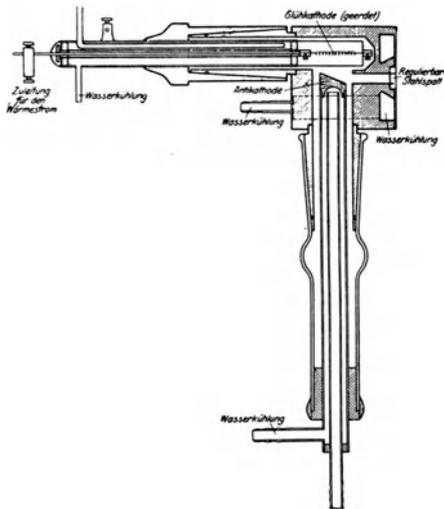


Abb. 70. Glühkathodenröhre nach Siegbahn.

mit Röntgenstrahlen bereits zur Kenntnis des Zusammenhangs von Materialeigenschaften geführt, die bei den Aufbereitungsverfahren von Kohle und Erz eine Rolle spielen, und zweifellos wird sie zur Klärung noch manchen Problems herangezogen werden können, das wir in den vorangehenden Abschnitten gestreift haben, z. B. zur Behandlung der Fragen nach den Unterschieden von Stoffen, die sich gut oder schlecht brikettieren oder flotieren lassen. Bei diesen Untersuchungen handelt es sich nicht um die seit Röntgens großer Entdeckung der X-Strahlen bekannte Eigenschaft der großen Durchdringungsfähigkeit der sich ebenso wie das Licht wellenförmig ausbreitenden Strahlung äußerst kurzer Wellen-

länge, eine Eigenschaft, die zur Feststellung von Inhomogenitäten in Gußstücken u. dgl. dienen kann; sondern es handelt sich um die Möglichkeit, mit diesen Strahlen gewissermaßen in die atomaren Räume, die einen Körper zusammensetzen, hineinzuleuchten, eine Erkenntnis, die wir v. L a u e verdanken (1912).

Von der Metallantikathode eines modernen Röntgenrohres, wie es in Abb. 70 abgebildet ist — die Kathode besteht aus einer Glühspirale, von der infolge der Heizung Elektronen ausgehen, die durch die hohe Spannung von 10- bis 50 000 Volt und mehr zwischen Kathode und Antikathode, die gleichzeitig Anode ist, eine

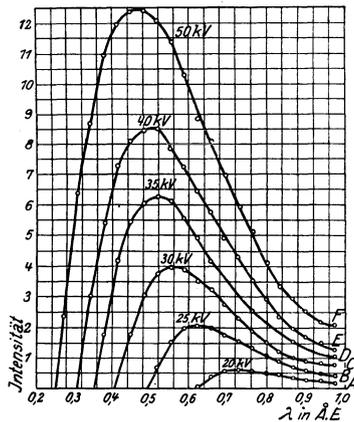


Abb. 71. Spektrale Energieverteilung.

sehr hohe Geschwindigkeit erhalten und beim Anprall auf die Antikathode Röntgenstrahlen auslösen —, geht eine Wellenstrahlung aus, die aus zwei Teilen besteht. Der eine Teil, der uns hier allerdings nicht interessieren soll, zeigt, wie die genaue spektroskopische Analyse ergibt, ein kontinuierliches Spektrum, das um so intensiver ist und bei um so kürzerer Wellenlänge anfängt, je höher die angelegte Spannung gewählt wird. Die Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der Wellenlänge λ ist in Abb. 71 dargestellt, in der als Abszisse die Wellenlänge, als Ordinate die Intensität der Strahlung in willkürlichen Einheiten abgetragen ist; die den Kurven beigefügten Zahlen geben die an das Rohr angelegte Spannung an. Der zweite Teil der Strahlung besteht aus einem dem kontinuierlichen Spektrum überlagerten, ziemlich aus-

gedehnten Linienspektrum, das ebenfalls um so kräftiger ist, je höher die Spannung und in einzelnen Wellenlängen das kontinuierliche Spektrum an Intensität weit übertrifft. Dieses diskontinuierliche Spektrum, das für das Material der die Strahlung aussendenden Antikathode charakteristisch ist, besteht aus Linien mit Schwingungszahlen, die in einfacher Beziehung zur Ordnungszahl des Elementes stehen. Durch Filter kann man, wie in der Optik, aus diesem Linienspektrum eine bestimmte Linie, z. B. die sogenannte K_{α} -Strahlung, zur weiteren Verwendung isolieren, und sie läßt man nun auf das Material fallen, dessen Feinstruktur untersucht werden soll. Nehmen wir an, es handele sich um Steinsalz, eine in bezug auf die Struktur besonders einfache Substanz, die, wie die Röntgenstrahlanalyse ergab, aus einem kubischen Gitter besteht mit Punkten, die abwechselnd mit Cl- und Na-Atomen besetzt sind, wie es die Abb. 72 zeigt. Ebenen, welche durch Gitterpunkte gelegt sind, bezeichnet man als Netzebenen; sie wirken reflektierend auf die einfallenden Röntgenstrahlen, und zwar um so besser, je dichter sie mit Punkten besetzt sind (am dichtesten sind offenbar beim Steinsalz diejenigen besetzt, die mit den Würfel Flächen des Elementarwürfels zusammenfallen). Eine merkliche Reflexion der z. B. auf unseren Steinsalzkristall auftreffenden Strahlung der Wellenlänge λ , tritt aber doch nur dann ein, wenn mehrere parallele Netzebenen zusammenwirken, und das ist der Fall, wenn zwischen dem „Glanzwinkel“ ϑ , d. i. das Komplement des von der Optik her bekannten „Einfallswinkels“ (Winkel des einfallenden Strahls und Normale der reflektierenden Ebene), dem Abstand d der parallelen Netzebenen und λ die Beziehung erfüllt ist: $n\lambda = 2d \sin \vartheta$, wenn n eine ganze Zahl ist. Danach kommt einer bestimmten Netzebenenschar bei einer bestimmten Wellenlänge ein ganz bestimmter „Glanzwinkel“ ϑ zu, unter dem ein Röntgenstrahlenbündel reflektiert wird, und es wird durchaus nicht in jeder Stellung des Steinsalzkristalls zum einfallenden Strahl eine Reflexion beobachtbar sein. Daher werden beim Drehen des Kristalls um eine zur Strahlrichtung senkrechte Achse in gewissen durch d und λ bestimmten Richtungen reflektierte Röntgenstrahlen auftreten, die eine in den Strahlengang gebrachte photographische Platte P (vgl. Abb. 73) an einer dieser Richtung entsprechenden Stelle schwärzen werden. Legt man um

den Kristall Kr (vgl. Abb. 73) einen zylindrisch gebogenen Film F , so daß die Zylinderachse in die Drehachse des Kristalls fällt, so wird der Film an ganz bestimmten Stellen Schwärzungen erfahren, die von der Reflexion der Röntgenstrahlen an den verschiedenen Netzebenenscharen herrühren. Statt der Drehbewegung des Kristalls kann man auch in der Achse des Filmzylinders F (Abb. 74) ein kleines Stäbchen Q von Steinsalzpulver aufstellen. In ihm

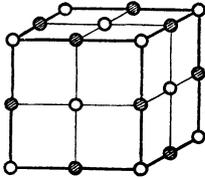


Abb. 72.
Steinsalzelementarwürfel.

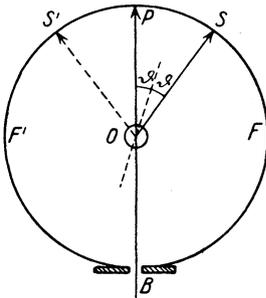


Abb. 74. Debye-Kamera
mit Stäbchen in der Mitte.

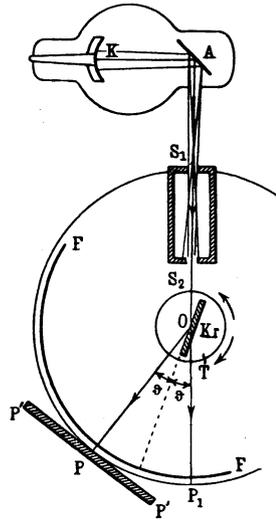


Abb. 73. Gang der Röntgenstrahlen in der Debye-Kamera.

werden die kleinen Kriställchen die verschiedensten Orientierungen besitzen, so daß auch Netzebenen mit dem Abstand d in einem solchen Winkel zum einfallenden Strahl liegen, daß der obigen Bedingung genügt wird. Auf dem Film werden dann im allgemeinen gekrümmte Linien entstehen, die die Schnitte des Films und der Kegelmantel mit den zu den betr. d gehörenden Öffnungswinkeln 4ϑ und der Kegelachse $S_1 P_1$ sind. In den Abb. 75 und 76 sind solche Filme abgebildet; die Mitte ist durchlocht, um den Film vor den das Stäbchen in gerader Richtung durchstoßenden Röntgenstrahlen, die den Film durch Streuung in weitem Umkreis schwärzen würden, zu schützen; die Röntgen-

strahlen treten durch das Loch und ein solches in der Kamera ins Freie. Aus der Lage der Linien auf dem Film können wir also auf den Netzebenenabstand schließen und dadurch auf den Aufbau des betreffenden Materials. Diese wundervoll einfache Methode

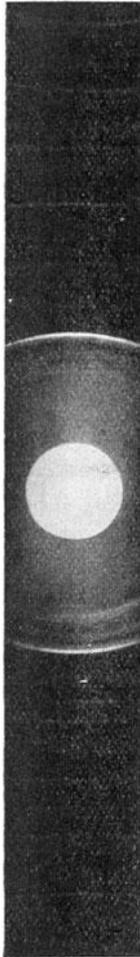


Abb. 75. Röntgenstrahlaufnahme an Häuslerscher Legierung (abgeschreckt).

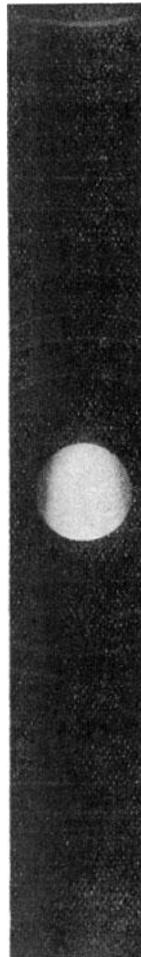


Abb. 76. Röntgenstrahlaufnahme an Häuslerscher Legierung (gealtert).

(übrigens aber nicht die einzige), bei der man mit sehr geringer Menge auskommen kann, ist von Debye und Scherrer angegeben und zu Strukturuntersuchungen vielfach benutzt worden. Insbesondere ist es leicht, mit ihr festzustellen, ob durch äußere

Einwirkungen Strukturänderungen auftreten, und so bilden diese Untersuchungen oft eine wertvolle Ergänzung zu den metallographischen Prüfungen. Umwandlungen, Phasenänderungen u. dgl. lassen sich ausgezeichnet mit dieser Methode verfolgen, und es wird nicht verwunderlich sein, daß ein reiches Material von Beobachtungen bereits zu wichtigen Erkenntnissen auf diesem Gebiet geführt hat. Es ist unmöglich und auch nicht der Ort, auf die zahlreichen Anwendungen der Methode in den verschiedenen Gebieten der Physik und Chemie und zur Lösung der verschiedenen Aufgaben und Probleme dieser Disziplinen, die bisher erkannt worden sind, auch nur hinzuweisen. Vieles liegt auf der Hand, wie z. B. die qualitative Analyse von in kleinster Menge vorhandenen Stoffen (die quantitative Untersuchung stößt einstweilen noch auf gewisse Schwierigkeiten), ferner der Nachweis geringster Verunreinigungen u. a. m. Für die Technik und nicht zuletzt für Bergbau und Hüttenkunde hat die Strukturuntersuchung besonders hohe Bedeutung dadurch gewonnen, daß sie zum tieferen Verständnis der Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von der Bearbeitung und anderen Vorbedingungen des Materials geführt hat und in der Richtung von Tag zu Tag neue wertvolle Erkenntnisse zu liefern verspricht. Nichts hindert doch, statt des Steinsalzstäbchens ein Stäbchen aus Kupferfeilspänen in die Mitte unseres Films zu stellen und der Strahlung auszusetzen. Da auch die Atome des Kupfers wie alle Elemente im festen Zustand kristallgitterartig aneinander gelagert sind, so erhalten wir auch in diesem Falle in ganz bestimmten Richtungen, die durch die Netzebenenabstände gegeben sind, Schwärzungen auf dem Film. Als ein Beispiel dafür und zugleich als ein Beispiel für die Abhängigkeit der Struktur von äußeren Einwirkungen sind hier die zwei Filme reproduziert, die an einer sogenannten Heusler'schen Legierung mit Kupferantikathode (14,25 % Mn, 10,15 % Al, 75,60 % Cu) gewonnen worden sind, das eine Mal, nachdem die Legierung von 900° auf Zimmertemperatur abgeschreckt, das andere Mal, nachdem sie von 900° langsam auf Zimmertemperatur abgekühlt worden ist; in einem Fall hat man es, wie die Durchrechnung des Filmbildes lehrt, mit einem kubischraumzentrierten, das andere Mal mit einem kubischflächenzentrierten Gitter zu tun. (Daß das Material im zweiten Falle magnetisierbar, im ersten Falle nicht

magnetisierbar ist, ist eine Begleiterscheinung, die, wie es scheint, nicht an die Kristallgitterstruktur gebunden ist).

Stellt man statt des Films vor das Stäbchen in kleinem Abstand eine photographische Platte auf, so erhält man konzentrische, gleichmäßig geschwärzte Ringe, die die regellose Orientierung z. B. des Kupferkristallpulvers in Kupferfeilspänen erweisen. Ein ausgeglühter Kupferdraht an Stelle des Stäbchens aus Feilspänen gibt das gleiche Bild, woraus wir schließen müssen, daß auch im ausgeglühten Kupferdraht die

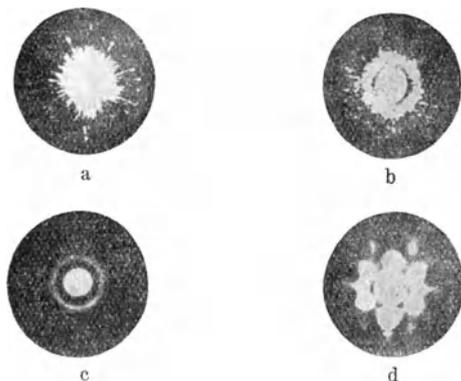


Abb. 77. Röntgenstrahlaufnahme an einem Zerreißstab.

Kristalle ungeordnet aneinanderliegen. Anders ist es, wenn man den Kupferdraht durch Ziehen oder Walzen gehärtet hat. Eigenartige Verstärkungen der Schwärzung an einzelnen Stellen der Ringe lassen darauf schließen, daß gewisse Richtungen der Kriställchen bevorzugt sind, daß also beim Ziehen und Walzen eine Orientierung der Kriställchen im Draht eingetreten ist, die um so deutlicher hervortritt, je intensiver die Deformation des Kupferdrahtes vorgenommen wurde. Man spricht in diesem Fall von einer Faserstruktur, die besonders deutlich auch bei natürlichen Faserstoffen (Zellulose, Holz u. dgl.) zu beobachten ist. Gerade solche Faserdiagramme können daher von einmal aufgetretenen Spannungen im Material Aufschluß geben, und ein treffliches Beispiel der Verschiedenartigkeit der Struktur verschieden beanspruchten Materials zeigt die Abb. 77, die dem wertvollen Buch von G l o c k e r „Materialprüfung mit Röntgen-

strahlen“¹⁾ entnommen wurde. Wir sehen hier die Reproduktion von vier Röntgenaufnahmen von Materialteilen eines bei 650° zerrissenen Gußstahles. *a* und *b* sind Aufnahmen eines an unverletzter Stelle gelegenen Raumelementes, *c* und *d* Aufnahmen eines Elementes an der Zerreistelle, und zwar in Richtung der Achse des Stahlstabes und senkrecht dazu. Man erkennt aus den Bildern die Faserstruktur an der Zerreistelle in Richtung des Zerreißens und die Störungen der Gitterstruktur auch an der „unverletzten“ Stelle (radiale Streifung).

Auf der eindrucksvollen Werkstoffschau im Herbst 1927 in Berlin sah man eine Reihe von Hinweisen auf diese wichtige Methode der Strukturuntersuchungen, und an vielen Beispielen war das Ergebnis der Untersuchungen in Bildern und Diagrammen vorgezeigt und mit Recht gepriesen. Wenn man auch zurzeit noch nicht so weit ist, mit Hilfe der Röntgenstrahlung die Intensität der Beanspruchung eines Werkstückes an Ort und Stelle feststellen zu können, was für die Technik von außerordentlicher Bedeutung wäre, so darf man doch einen gewaltigen Fortschritt darin erblicken, daß es bereits möglich ist, Beziehungen zwischen den Festigkeitseigenschaften und der atomaren Struktur des Materials erkennen und verfolgen zu können. Und wenn auch in bezug auf Aufbereitungsprobleme eine unmittelbare Verwendung der Strukturanalyse mit Röntgenstrahlen noch nicht aufgezeigt werden kann, so mag doch einleuchten, daß die Aussichten günstige sind, mit dieser Methode in gleicherscheinenden Stoffen gerade solche Unterschiede auffinden zu können, die entscheidend sind für die Anwendbarkeit des einen oder anderen Aufbereitungsprozesses, der in den vorangehenden Abschnitten behandelt worden ist.

¹⁾ R. Glocker. Verlag Springer, Berlin 1927.

Neuere und neueste Hefte der „Sammlung Vieweg“

- Heft 45. Prof. Dr. K. Fajans: *Radioaktivität und die neueste Entwicklung der Lehre von den chemischen Elementen*. 4. Auflage. Mit 11 Abbildungen und 14 Tabellen. M. 5,—.
- Heft 46. Dr. Bruno Alexander-Katz: *Quarzglas und Quarzgut*. Mit 43 Abb. M. 2,50.
- Heft 47. Prof. Dr. G. Berndt: *Radioaktive Leuchtfarben*. Mit 28 Abbildungen im Text und auf einer Lichtdrucktafel. M. 4,—.
- Heft 48. Dr. R. Fürth: *Schwankungserscheinungen in der Physik*. Mit 5 Abb. M. 3,50.
- Heft 49. Dr. Hans Georg Möller: *Die Elektronenröhren und ihre technischen Anwendungen*. 2., vollständig umgearbeitete Auflage. Mit 208 Textabbildungen und einer Tafel. M. 7,50.
- Heft 50. Prof. Dr. C. Dorno: *Klimatologie im Dienste der Medizin*. Mit 11 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 51. Prof. Dr. C. Isenkrahe: *Zur Elementaranalyse der Relativitätstheorie*. M. 4,50.
- Heft 52. Dr.-Ing. Max Moeller: *Das Ozon. Eine physikalisch-chemische Einzeldarstellung*. Mit 32 Textfiguren. M. 6,—.
- Heft 53. Dr. V. Geilen: *Mathematik und Baukunst als Grundlagen abendländischer Kultur. — Wiedergeburt der Mathematik aus dem Geiste Kants*. M. 3,—.
- Heft 54. Dr. H. Heinrich Franck: *Die Verwertung von synthetischen Fettsäureestern als Kunstspeisefette in wirtschaftlicher, physiologischer und technischer Beziehung*. Mit 3 Abbildungen. M. 3,25.
- Heft 55. Dr. Alfred Wegener: *Die Entstehung der Mondkrater*. Mit 9 Abbild. im Text und auf 3 Tafeln. M. 2,25.
- Heft 56. Niels Bohr: *Drei Aufsätze über Spektren und Atombau*. 2. Auflage. Mit 13 Abbildungen. M. 5,—.
- Heft 57. Prof. Dr. Hans Cloos: *Der Mechanismus tiefvulkanischer Vorgänge*. Mit 24 Zeichnungen und einer Karte. M. 4,—.
- Heft 58. Dr. Walther Gerlach: *Die experimentellen Grundlagen der Quantentheorie*. 2. Auflage. Mit 43 Abbildungen.
- Heft 59. Prof. Dr. E. Study: *Denken und Darstellung in Mathematik und Naturwissenschaften*. 2. verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 10 Abbildungen. M. 3,75.
- Heft 60. Prof. Dr. techn. Milan Vidmar: *Theorie der Kreiselpumpe*. Mit 39 Abbildungen. M. 4,75.
- Heft 61. Reg.-Rat Dr. W. Meissner: *Entfernungs- und Höhenmessung in der Luftfahrt*. Mit 66 Abbildungen. M. 4,—.
- Heft 62. Dr. K. Siebel: *Die Elektrizität in Metallen*. M. 3,50.
- Heft 63. Dr.-Ing. M. Dolch: *Die rationelle Verwertung der niederwertigen Braunkohlen*. Mit 7 Abbildungen. M. 3,—.
- Heft 65. E. Study: *Mathematik und Physik*. Eine erkenntnistheoretische Untersuchung. M. 1,50.
- Heft 66. Dr. Walter Schallreuter: *Über Schwingungserscheinungen in Entladungsröhren*. Mit 14 Abbildungen. M. 1,50.
- Heft 67. Prof. Dr. Eberhard Buchwald: *Das Korrespondenzprinzip*. M. 5,50.
- Heft 68. Direktor Dr. Iwan Döry: *Die Schlüsselercheinungen elektrischer Lokomotiven mit Kurbelantrieb*. Mit 12 Abbildungen. M. 1,50.
- Heft 69. Prof. Dr.-Ing. Fritz Emde: *Sinusrelief und Tangensrelief in der Elektrotechnik*. Mit 18 Bildern. M. 4,50.
- Heft 70. Laurenz Bock: *Die Konstitution der Ultramarine*. Mit 3 Abb. M. 2,40.