PHOTOGRAPHISCHE BESTIMMUNG DES DIFFUSIONSKOEFFIZIENTEN MITTELS GEKRÜMMTER LICHTSTRAHLEN

VON

JOHANNES EICKE

ABHANDLUNG

ZU DEM JAHRESBERICHTE DES KÖNIG-ALBERT-GYMNASIUMS IN LEIPZIG
FÜR DAS SCHULJAHR OSTERN 1911 BIS OSTERN 1912

LEIPZIG 1912
DRUCK VON ALEXANDER EDELMANN
UNIVERSITÄTS-BUCHDRUCKER

1912. Progr. Nr. 769.

9ee
5
(1912)

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Landes- u. Stadt-Bibl.
Düsseldorf

44. g. 304

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

PHOTOGRAPHISCHE BESTIMMUNG DES DIFFUSIONSKOEFFIZIENTEN MITTELS GEKRÜMMTER LICHTSTRAHLEN

VON

JOHANNES EICKE

ABHANDLUNG

ZU DEM JAHRESBERICHTE DES KÖNIG-ALBERT-GYMNASIUMS IN LEIPZIG
FÜR DAS SCHULJAHR OSTERN 1911 BIS OSTERN 1912

LEIPZIG 1912
DRUCK VON ALEXANDER EDELMANN
UNIVERSITÄTS-BUCHDRUCKER

1912. Progr. Nr. 769.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

UNIVERSITÄTS- UND LANDESBIBLIOTHEK DÜSSELDORF

Seite 1—16 der vorliegenden Abhandlung werden einen Teil der Doktordissertation des Verfassers bilden.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Einleitung.

1. Diffusion.

Gießt man ein Glas halb voll Wasser und gibt dann ebensoviel Himbeersaft zu, so sinkt er darin zu Boden, ohne sich sogleich im Wasser aufzulösen. — Würde man kräftig umrühren, so würde bald die gleichmäßig rote Färbung der Flüssigkeit anzeigen, daß Beides vollständig miteinander gemischt ist. — Eine ebenso vollständige Mischung findet aber auch statt, wenn man das Umrühren unterläßt. Nur vollzieht sie sich dann sehr viel langsamer. Bleibt das Glas ohne jede Erschütterung mehrere Tage stehen, so verwischt sich allmählich die scharfe Grenze zwischen rot und farblos. Das Wasser rötet sich, der Himbeersaft entfärbt sich langsam. In der Nähe der Oberfläche noch farblos, erscheint die Flüssigkeit in unmerklichem Übergange nach unten zu immer stärker rot gefärbt, bis dicht über dem Boden, wo der Fruchtsaft noch sein ursprüngliches sattes Rot behalten hat. Nach einiger Zeit hat die ganze Flüssigkeit rote Färbung: in der Nähe der Oberfläche schwächer, nach unten zu stärker. Schließlich schwindet jeder Unterschied; der Inhalt des Glases ist vollständig gleichmäßig rot gefärbt, so wie man es durch Umrühren sofort erreicht hätte.

Der geschilderte freiwillige Mischungsvorgang der beiden Flüssigkeiten heißt Diffusion. An dem hier gewählten Beispiel ist sie besonders deutlich wahrzunehmen, weil eine der beiden Flüssigkeiten farbig ist. Diffusion findet stets statt, wenn zwei geeignete Flüssigkeiten vorsichtig übereinander geschichtet und ohne Erschütterung sich selbst überlassen werden. Solcher Flüssigkeiten gibt es eine große Anzahl: Säuren, Basen, Öle, alle Arten von Lösungen diffundieren gegeneinander, vorausgesetzt, daß sie überhaupt mischbar sind. Ausgeschlossen sind also solche Flüssigkeiten, die „sich nicht vertragen", z. B. Öl und Wasser, und einige andere.

Man kann sich die Diffusion kaum anders vorstellen, als daß dabei die Teilchen der beiden Flüssigkeiten aneinander vorbei wandern, und zwar die der unteren Flüssigkeit ohne Zweifel entgegen der Schwerkraft nach oben, während ihr Platz unten durch Teile der oberen (leichteren) Flüssigkeit eingenommen wird. Diese Wanderung setzt sich nicht zu schnell, aber unaufhörlich und unaufhaltsam fort, bis der ganze Inhalt des Diffusionsgefäßes mit einer gleichmäßigen Mischung der beiden Flüssigkeiten erfüllt ist.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Um sich die Vorstellung des innern Vorganges der Diffusion zu erleichtern, kann man annehmen, daß in jeder der beiden diffundierenden Flüssigkeiten die kleinsten Teilchen das Bestreben haben, sich möglichst weit voneinander zu entfernen. Diesem Bestreben folgen sie, indem sie sich über den Raum der Nachbarflüssigkeit mit ausdehnen. Schließlich werden die Teile jeder Flüssigkeit für sich wieder einen Zustand gleichmäßiger, aber größerer Entfernung voneinander in dem verfügbaren Raume erreichen. Zweifellos wird dieses gleichartige, aber entgegengesetzte Bestreben je nach der Eigenart der Flüssigkeiten auf mehr oder weniger gegenseitigen Widerstand stoßen; z. B. wird davon die Geschwindigkeit des Vorganges abhängen, ferner der Umstand, daß die eine Flüssigkeit schneller in die andere eindringt, als umgekehrt.

Dieses Bild von der Diffusion zweier Flüssigkeiten stimmt im großen Ganzen überein mit der uns geläufigeren Vorstellung von der Ausbreitung eines Gases in einem anderen. Wenn z. B. Leuchtgas auch nur in geringer Menge in einem Zimmer ausströmt, so ist nach einiger Zeit dessen Geruch an allen Stellen des Zimmers wahrzunehmen; das Gas strebt, den größten möglichen Raum gleichmäßig dicht anzufüllen. Ein schon darin vorhandenes Gas, z. B. Luft, kann diese Ausbreitung wohl verzögern, aber nicht verhindern. Mehrere Gase in demselben Raum durchdringen sich solange, bis jedes für sich den Zustand gleichförmiger Verteilung erreicht hat. Das ist der Diffusionsvorgang der Gase.

Das wesentliche Merkmal der Diffusion ist bei Gasen ebenso wie bei Flüssigkeiten: sobald ein größerer Raum gegeben wird, entfernen sich die kleinen Teile soweit voneinander, daß sie ihn in möglichst gleichmäßiger Verteilung erfüllen.

Schon aus diesen einfachen Betrachtungen erhellt genügend, daß Diffusion ohne äußeres Zutun lediglich auf Grund innerer Eigenschaften der Flüssigkeiten stattfindet. Hier äußern sich einmal Eigenschaften der kleinsten Teile der Flüssigkeiten, die sonst nicht direkt erkennbar sind, oder sich wenigstens nicht an solchen ausgesprochenen Bewegungserscheinungen feststellen lassen, wie sie hier die Durchdringung zweier Flüssigkeiten auf beträchtliche Strecken hin darbietet.

Die physikalische Theorie konnte an dieser interessanten Erscheinung nicht vorübergehen, ohne die Probe zu machen, ob unsere theoretischen Vorstellungen von den inneren Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase auch für diesen Fall zur Erklärung hinreichen.

Die Frage wurde denn auch lebhaft und eingehend erörtert, und es ergab sich in der Tat, daß in mancher Hinsicht veraltete Anschauungen beiseite bleiben mußten, die durch neue einfachere und umfassendere Annahmen erfolgreich ersetzt werden konnten.

Besondere Wertschätzung und Förderung erfuhr die Theorie von Seiten der Botanik, der die Erforschung einer nahe verwandten Erscheinung sehr erwünscht war. Für die Kenntnis des Pflanzenlebens ist nämlich der Vorgang der Säfteleitung von grundlegender Bedeutung. Die Beförderung der Säfte erfolgt von Zelle zu Zelle durch deren Wände hindurch unter besonderen Bedingungen, denen man noch nicht bis ins Einzelne nachgehen konnte. Das Durchdringen dieser durchlässigen Zellenwände: die Osmose, war deshalb schon vielfach behandelt worden. Jetzt ergab die gegenseitige Förderung der Arbeiten auf den benachbarten Gebieten der Osmose und der Diffusion schließlich Resultate, die genügend Licht auf früher weniger verständliche oder unrichtig aufgefaßte Vorgänge warfen. Auf diese zum großen Teil komplizierten mathematischen Ergebnisse soll hier nicht näher eingegangen werden. —

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

2. Untersuchungsmethoden.

Die Entwicklung der Diffusionstheorie mußte selbstverständlich Schritt für Schritt von der praktischen Physik Unterstützung, Bestätigung und Anregung erhalten. Wollte die Theorie für die Diffusionen im allgemeinen, ohne Rücksicht auf die Auswahl eines bestimmten Flüssigkeitspaares gelten, so mußte die Praxis durch tatsächlich eingeleitete Diffusionen ganz bestimmter Flüssigkeiten zahlenmäßige Ergebnisse erzielen, die als Material für die weiteren Untersuchungen dienen konnten.

Dabei mußten natürlich die für jedes Diffusionspaar charakteristischen Eigentümlichkeiten der Diffusion besonders berücksichtigt werden; dazu gehörte in erster Linie die genaue Bestimmung solcher charakteristischen Merkmale, wie z. B. Geschwindigkeit der Diffusion oder rascheres Durchdringen nach der einen Flüssigkeit hin.

Solche Bestimmungen sind vielfach sorgfältig ausgeführt worden, und dabei stellten sich zwei wichtige Erfahrungen ein. Die eine befriedigende, daß solche Experimente recht gut angenähert der Theorie entsprachen, die andere neue, wenn auch erwartete, daß mehrfache Versuche an verschiedenen Stoffen eigenartige Verschiedenheiten der Merkmale ergaben, die auf einen inneren Zusammenhang mit den schon bekannten Eigenschaften der Stoffe hinzudeuten schienen.

War demnach Bestätigung der Theorie in vorläufig genügendem Maße erreicht, so durfte sich der Blick nun auf einen neuen Forschungsweg richten. Es war erwünscht, die Diffusion möglichst vieler Stoffe planmäßig zu erforschen, um auf Grund einer großen Anzahl von Einzelergebnissen sich ein Bild davon machen zu können, wie die Diffusionseigentümlichkeiten von ihren übrigen physikalischen und chemischen Merkmalen abhängig wären.

Als besonders geeignet faßte man die Bestimmung der Diffusionsgeschwindigkeit ins Auge, die in der Theorie die wichtigste Rolle spielte.

Allein die Bestimmung dieser sogenannten Diffusionskonstanten war keineswegs leicht genau durchzuführen, wenn auch verschiedene Methoden ersonnen und angewandt wurden. Die Schwierigkeiten liegen in erster Linie in dem Diffusionsvorgang selbst: ein Versuch zur Ermittelung der Diffussionsgeschwindigkeit gliedert sich dreifach:

1. Vorsichtiges Untereinanderschichten der beiden Flüssigkeiten, sodaß sie sich möglichst wenig dabei mischen.

2. Dafür sorgen, daß die Diffusion weiterhin möglichst wenig von außen beeinflußt wird.

3. Feststellen, ob z. B. nach einer bestimmten Zeit in einer gewissen Höhe der oberen Schicht schon Spuren der unteren wahrnehmbar sind, und ihre Größe möglichst genau angeben.

Die erste Aufgabe, das Untereinanderschichten möglichst ohne Mischung, ist leichter einwandfrei zu lösen, als es auf den ersten Blick erscheinen dürfte. Man gießt von der leichteren Flüssigkeit zuerst in das Glas ein, füllt dann durch eine feine, bis auf den Boden reichende Röhre langsam und vorsichtig die zweite, schwerere Flüssigkeit ein und sorgt dafür, daß dabei die Röhre möglichst unbeweglich ist, d. h., daß auch die kleinsten Rührbewegungen unterbleiben. Auf diese Weise gelingt es leicht, die schwerere Flüssigkeit so sauber unter die leichtere zu schichten, daß zu Anfang des Versuches eine spiegelnde Grenzfläche zwischen beiden erscheint, ein sicheres Anzeichen dafür, daß noch nicht die geringste Mischung stattgefunden hat. —

Die zweite Aufgabe beschränkt sich auf Vermeidung jeglicher Erschütterung, sowie auf Erhaltung einer möglichst konstanten Temperatur in der Umgebung des Diffusionsgefäßes, denn die Wirkung des Temperatur-Unterschiedes würde Strömungen hervorrufen, die eine Mischung

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

der beiden Flüssigkeiten zur Folge hätten. Auch diesen Anforderungen läßt sich soweit entsprechen, daß größere Fehler vermieden werden.

Drittens ist an bestimmten Zeitpunkten die Zusammensetzung des Gefäßinhaltes in einer bestimmten Höhe über dem Boden zu untersuchen und festzustellen, welche Menge der einen Flüssigkeit hier abgewandert bezw. welche Menge der andern Flüssigkeit zugewandert ist. —

Und hier liegen die Schwierigkeiten der ganzen Untersuchung. Man könnte daran denken, an einer bestimmten Stelle eine Probe zu entnehmen, die dann chemisch untersucht wird.

In dieser Art sind tatsächlich Untersuchungen angestellt worden, nur hatten sie den Nachteil, daß jeder Versuch nur eine genaue Messung zuließ und dann abgebrochen werden mußte, da die Diffusion durch Entnahme der Probe gestört war.

Um zu verschiedenen Zeiten den Zustand in einer gewissen Höhe messen zu können, tauchte man kleine Glaskugeln ein, die mit sehr dünnen Fäden an einer Wage hingen, um den Gewichtsverlust resp. das spezifische Gewicht messen zu können und daraus auf die Zusammensetzung der Flüssigkeit an der betr. Stelle schließen zu können. Allein selbst bei größter Sorgfalt geschah hier immerhin ein Eingriff von außen, der die Diffusion beeinflussen konnte, sodaß aus diesem und andern Gründen auch hiervon abgesehen werden mußte.

Ohne Störung der Diffusion konnte man von der Messung optischer Eigenschaften Erfolg erwarten.

Hier boten sich zwei Wege: der eine, polarisiertes Licht horizontal durch ein geeignetes Diffusionsgefäß mit ebenen Wänden durchzuschicken, und die Drehung der Polarisationsebene beim Durchgang in verschiedenen Höhen zu beobachten. Hier konnten freilich nur Flüssigkeiten in Frage kommen, die solche Drehung überhaupt oder in genügendem Maße bewirken konnten.

Die andere, allgemeiner verwendbare Methode beruht auf dem Lichtbrechungsvermögen der Flüssigkeiten. Man benutzte als Diffusionsgefäß ein hohles, dreiseitiges Glasprisma. Ging darin eine Diffusion vor sich, so hatte das Prisma in verschiedenen Höhen verschiedenes Brechungsvermögen; horizontal einfallende Lichtstrahlen wurden also verschieden weit abgelenkt.

Beide Methoden wurden angewandt, zum Teil mit sinnreichen Verbesserungen, aber man entdeckte bald, daß sie beide einen großen Fehler besaßen, der ihre Brauchbarkeit äußerst beschränkte und beeinträchtigte. Es stellte sich nämlich heraus, daß horizontale Lichtstrahlen beim Durchgang durch diffundierende Flüssigkeit nicht horizontal bleiben, sondern nach unten gekrümmt werden.

3. Gekrümmte Lichtstrahlen.

Es ist eine der physikalischen Grundlehren, daß ein Lichtstrahlenbündel „gebrochen“ wird, wenn es aus einem Medium in ein anderes optisch dünneres oder dichteres so eintritt, daß die Grenzfläche schräg durchsetzt wird, daß dagegen ein senkrecht einfallender Strahl unabgelenkt bleibt (vgl. den ins Wasser eingetauchten und dadurch „geknickten“ Stab).

Unter Beachtung dieses Gesetzes kann man sich leicht vorstellen, welchen Weg ein Lichtstrahlenbündel nehmen wird, das schräg auf die Oberfläche der Flüssigkeit in einem Diffusionsgefäß auftrifft, worin eine optische dünnere Flüssigkeit über eine optisch dichtere geschichtet ist. Die Strahlen haben dann viele (horizontale) Schichten nacheinander zu durchsetzen, von denen die folgende stets dichter ist als die vorhergehende.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Der Strahlenweg wird also sehr oft gebrochen werden, und da der Übergang stets in demselben Sinne erfolgt, stets nach derselben Seite gebrochen werden (Fig. 1).

Genau genommen sind aber die einzelnen Schichten unendlich dünn und von stetig wachsender Dichte, sodaß kein vielfach gebrochener, sondern ein stetig gekrümmter Lichtweg entsteht.

Daran ändert sich nichts, wenn man das Licht seitlich in das Gefäß eintreten läßt, nur muß man hierzu ein Glasgefäß mit ebenen Wänden (Glastrog) verwenden. Innerhalb der Flüssigkeit wird der Weg des Lichtes gekrümmt sein (s. Fig. 2 AA_1), und zwar erfolgt die Krümmung, nebenbei bemerkt, stets nach den dichteren Schichten hin.[1]

Es scheint auf den ersten Blick, als ob man hier den Fall ausnehmen müßte, daß das Strahlenbündel genau horizontal in den Trog eintritt, denn der Übergang ins Innere erfolgt dann senkrecht zur Flüssigkeitsgrenze, also würden die Strahlen horizontal bleiben (BB_0). Da sie aber hierbei nur Schichten von gleicher Dichte durchsetzen, wäre eine Krümmung undenkbar. —

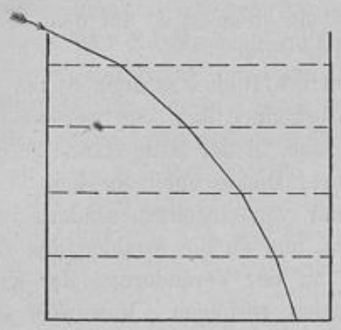

Fig. 1

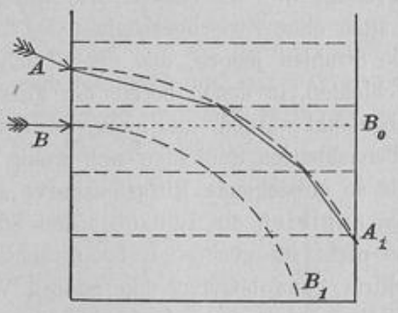

Fig. 2

Gerade das Gegenteil tritt ein! Auch bei horizontalem Eintritt krümmen sich die Strahlen nach den dichteren Schichten hin, in diesem Falle sogar am stärksten (BB_1). — Das (Snelliussche) Brechungsgesetz kann hier nämlich nicht angewendet werden, da es nur für den senkrechten Eintritt in ein durchaus gleichmäßiges Mittel gilt. Hier treten die Strahlen zwar senkrecht zur Grenzfläche ein, aber in eine Flüssigkeit, deren engst benachbarte Schichten schon verschieden voneinander sind. Daraus folgt nach dem allgemeinen (Huygensschen) Prinzip der Wellenbewegung die Ablenkung resp. Krümmung.[2]

Diese nicht neue, aber weniger bekannte Tatsache war die Ursache der Fehler, als man

1) Solche gekrümmte Lichtstrahlen sind schon lange bekannt und werden berücksichtigt beim Durchgang der Sonnenstrahlen etc. durch die Schichten der Atmosphäre, bei der Erklärung der Fata Morgana, bei dem Problem des scharfen Sonnenrandes u. a. m.

2) Man betrachte die Elementarwellen, die sich von verschiedenen Punkten der Wellenfläche des eintretenden Lichtstrahls ausbreiten. Ihre Ausbreitungs-Geschwindigkeit ist um so kleiner, je dichter die Schichten sind, in denen sie sich ausbreiten. Nach einem bestimmten Zeitteilchen resultiert also eine Wellenfläche (Berührende der Wellenkugeln) von nicht mehr horizontaler, sondern nach den dichteren Schichten geneigter Richtung.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

die Diffusionsgeschwindigkeit mit horizontalen Lichtstrahlen prüfen wollte, indem man feststellen wollte, wie weit die einzelnen Schichten der Flüssigkeit im hohlen dreiseitigen Glasprisma das Licht nach der Seite ablenken würde. Es erfolgte eben zugleich eine Ablenkung nach unten, weshalb jede Messung unzuverlässig werden mußte.

4. Wieners Methode.

Es ist O. Wieners Verdienst, den Weg gewiesen zu haben, wie man gerade diese früher als Fehler störende Abweichung zur Bestimmung der Diffusionsgeschwindigkeit benutzen kann, mit einer Methode, die auf große Genauigkeit rechnen ließ.

Wiener bildet einen hell beleuchteten um 45° gegen die Horizontale geneigten Spalt mit einer Linse auf einen Schirm ab und läßt dabei die Strahlen einen Diffusionstrog (senkrecht zur Glaswand) durchsetzen.

Ist die Diffusion noch nicht weit vorgeschritten, so gehen die Strahlen am oberen und unteren Ende des Spaltbildes noch horizontal,[1] durch die reine (gleichmäßige) obere bezw. untere Flüssigkeit. Sie werden also nicht abgelenkt, d. h. sie kommen so auf dem Schirm an, wie sie auch ohne Zwischenschalten des Troges angekommen wären.

Die Strahlen jedoch, aus denen sich der mittlere Teil des Bildes zusammensetzt, wandern durch Schichten, in denen bereits der Flüssigkeitsaustausch begonnen hat. Sie werden also nach unten abgelenkt werden, und zwar von den Enden her schwach, in der Mitte stark,[2] je nachdem, ob die benachbarten Schichten sich wenig oder mehr in ihrer Dichte unterscheiden.

Die so entstehende Diffusionskurve gibt also nicht nur von einzelnen, sondern von allen Schichten zugleich ein Bild über den Stand der Diffusion, und da die Strahlen den Gang der Diffusion nicht im geringsten beeinträchtigen, kann man an der Veränderung der Kurve auf dem Schirm ganz bequem den ganzen Verlauf der Diffusion verfolgen. Man wird also nach einiger Zeit merken, wie die Ablenkung das Spaltbild immer weiter oben und unten ergreift, dagegen in der Mitte die Ablenkung nicht mehr so groß bleibt (weil der Unterschied sich jetzt auf mehr Schichten verteilt), bis schließlich nach genügender Zeit das Spaltbild mehr und mehr wieder die Form des geraden Striches annimmt, weil der Inhalt des Gefäßes mit der Zeit schließlich eine gleichmäßige Flüssigkeit wird.

Mit Hilfe geometrisch-physikalischer Rechnungen lassen sich alle Eigentümlichkeiten der Kurve, besonders die Größe der Ablenkung nach unten genau deuten, sodaß es nur noch übrig bleibt, zu bestimmten Zeiten die Ablenkung etc. der Kurve auf dem Schirm zu messen, um zuverlässige und genaue Angaben über die betreffende Diffusion machen zu können.

---

1) Für die Praxis genügend horizontal, wenn der Trog weit vom Spalt entfernt ist.

2) An den Stellen der stärksten Ablenkung zeigt sich ein deutliches Spektrum, wenn man weißes Licht benutzt (Dispersion).

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Photographische Bestimmung des Diffusionskoeffizienten mittels gekrümmter Lichtstrahlen.

In seiner Abhandlung: „Darstellung gekrümmter Lichtstrahlen und Verwertung derselben zur Untersuchung von Diffusion etc.“ hat O. Wiener[1] angegeben, wie sich durch Ausmessung von Diffusionskurven der Diffusionskoeffizient von Flüssigkeiten berechnen läßt.

Diese Methode ist 1903 von Heimbrodt[2] erprobt worden, der unter Anbringung der nötigen Vervollkommnungen die Ablenkungen der Kurve und zwar stets die Stelle der größten Ablenkung (Kurvenminimum) mit dem Kathetometer gemessen hat. Die von ihm erzielten Resultate haben bewiesen,[3] daß die Methode vollkommen brauchbar ist.

Die Versuchsanordnung zur Darstellung der Diffusionskurven war bei Beiden im Wesentlichen folgende (Fig. 3): Das Bild eines feinen, einfarbig beleuchteten Spaltes, der 45° gegen die Horizontale geneigt ist, wird mit einer Linse auf einen genügend weit entfernten vertikalen Schirm

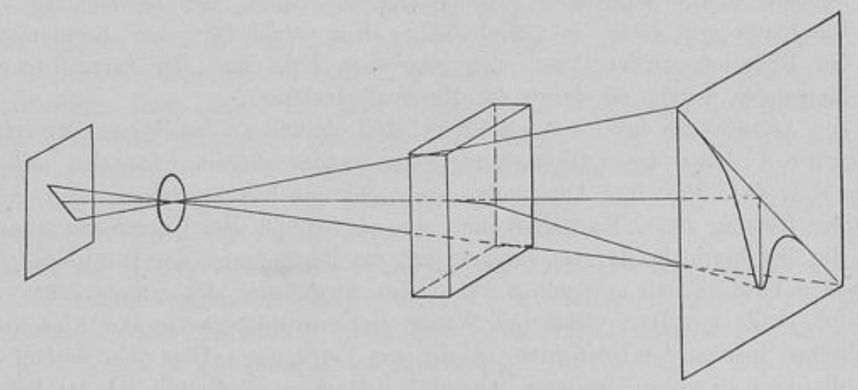

Fig. 3

geworfen. In den genau horizontalen Strahlengang wird ein Glastrog mit planparallelen Wänden so eingeschaltet, daß die Strahlen seine Wände rechtwinkelig durchsetzen. Diffundieren in diesem Trog zwei Flüssigkeiten gegeneinander, so wird das verschiedene Gefälle der Brechungsexponenten in verschiedenen Schichten das strichförmige Spaltbild zu einer Kurve (Diffusionskurve) verzerren. Die Stelle größter Ablenkung zeigt dabei Ort und Größe des stärksten Brechungs- (resp. Kon-

1) Wied. Ann. 49. p. 105. 1893.

2) Ann. 13. p. 1029. 1904.

3) Mit einer Genauigkeit bis auf 0,45 Prozent im Mittel, während die früheren Methoden Werte von durchschnittlich 4 bis 5 Prozent Fehler ergaben.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

zentrations)-Gefälles. Die Messung dieser Ablenkung läßt sich daher zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten verwenden.

Es waren nunmehr lediglich technische Mängel, die der Methode anhafteten. Besonders machte sich der Umstand geltend, daß bei der erforderlichen weiten Entfernung des Schirmes vom Spalt (6 bis 8 m) die Lichtstärke bedeutend geschwächt war, noch dazu, weil man kein weißes Licht verwenden konnte, sondern möglichst nur Licht von einer einzigen Farbe (grün), damit die Kurve scharf und meßbar wurde.[1]

Ferner wäre es vorteilhaft gewesen, an Stelle der (subjektiven) Messungen eines einzelnen Beobachters am Kathetometer objektive Angaben zu erhalten, die jederzeit nachgeprüft werden konnten.

Dieser Gedanke, sowie die ganze Methode, die vorwiegend auf eine hinreichend scharfe Abbildung hinzielte, legten es nahe, statt des Schirmes zum Auffangen des Kurvenbildes die photographische Platte zu verwenden. O. Wiener erwähnt bereits einige vorläufige Versuche über die Verwendung der photographischen Platte zur Aufnahme der Diffusionskurven. — Heimbrodt machte ebenfalls zunächst den Versuch, die photographische Platte zu verwenden, ging aber dann zur direkten Okularbeobachtung der Diffusionskurven mit dem Kathetometer über, hauptsächlich deshalb, weil auf der Platte das Kurvenbild nicht hinreichend deutlich zu erhalten war, um für genaue Ausmessung zu dienen.

Die photographische Aufnahme der Diffusionskurven versprach aus verschiedenen Gründen große Vorteile:

1. Photographische Aufnahmen sind objektiv, unabhängig vom Beobachter.
2. Die Platte gibt stets das vollständige Kurvenbild für einen bestimmten Moment der Diffusion wieder, kann also gegebenen Falls auch zu verschiedenen anderen Messungen dienen, als denen der Maximalablenkung.
3. Die Ausmessung der Kurven kann beliebig oft und an beliebigem Ort erfolgen.

Den großen Vorteilen dieser Beobachtungsweise standen allerdings zunächst noch Schwierigkeiten gegenüber, die bisher ihre Anwendung ausgeschlossen hatten. Ich stellte mir deshalb die Aufgabe, unter Hebung dieser Schwierigkeiten eine photographische Untersuchungsmethode auszuarbeiten, die bei hinreichender Genauigkeit auf die Bestimmung der Diffusionskonstante bei möglichst vielen Flüssigkeiten anwendbar wäre. Zur Ausführung der erforderlichen experimentellen Arbeiten stellte mir Herr Geheimrat Wiener liebenswürdigerweise ein Einzellaboratorium im Physikalischen Institut der Universität Leipzig zur Verfügung. Über den Verlauf der Untersuchungen, die jetzt zu einem gewissen Abschluß gekommen sind, will ich im Folgenden das Wesentlichste berichten.

1. Beleuchtender Teil der Versuchsanordnung.

Lichtquelle.

„Starke, konstante Lichtquelle“ war die unerläßliche Bedingung für das Zustandekommen einer photographischen Methode. Die Voruntersuchungen hatten sich also zunächst mit der

1) Die Kurve zeigt an der Stelle größter Ablenkung ziemlich starke Dispersion.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Wahl einer geeigneten Lichtquelle zu befassen; Herr Max Friedrich, der die ersten Maßnahmen hierzu traf, stellte bald fest, daß Projektionslampen mit schrägen Kohlen, wie sie Heimbrodt verwandte, ebensowenig versprachen als solche mit Scheinwerferspiegel. Solche Lichtquellen waren nicht homogen genug für photographische Aufnahmen. Deshalb benutzte er versuchsweise eine Lampe mit 3 horizontalen Kohlen, die Tförmig angeordnet waren: die negative zeigte nach dem Apparat, die beiden positiven lagen senkrecht dazu (zwei positive Kohlen, um Schiefbrennen der negativen zu vermeiden).

Führung und Getriebe wurden zunächst für die Handregulierung angebracht. Die Lampe brannte mit zwei getrennten Stromkreisen von je ca. 30 Amp.; dabei warf der negative Krater ein außerordentlich gleichmäßiges und helles Licht nach vorn, das auch die kleinsten Einzelheiten des photographischen Bildes zu erkennen gestattete und vorzügliche Aufnahmen versprach. Die wagerechte Lage und Verschiebung der Kohle bürgte, was die Hauptsache war, für örtlich konstante Lichtquelle.

Leider verlangte die Handregulierung unausgesetzte Bedienung, sodaß keine Aussicht auf dauernde Benutzung der Lampe blieb, so einwandfrei sie auch zeitweise, besonders mit frischen Kohlen, arbeitete. — Da eine automatische Regulierung für diese Art Lampe nicht herstellbar schien, mußte ich schließlich von ihrer Benutzung absehen. Ich habe diese Versuche angeführt, erstens, weil sie beträchtliche Zeit in Anspruch nahmen, zweitens, weil diese Anordnung vielleicht doch noch irgendwie nutzbar gemacht werden könnte.

Die Firma Körting & Mathiessen stellte mir dann ein neues Lampen-Modell behufs Prüfung zur Verfügung, bei dem wieder nur zwei Kohlen verwendet waren: die positive wagrecht, und die negative senkrecht. Eine besondere Regulierung sollte dabei bewirken, daß das Licht von der wagrechten Kohle tatsächlich horizontal geradeaus geworfen wurde, also nicht, wie zu befürchten war, schräg nach unten fiel. Eingehende längere Untersuchungen ergaben tatsächliche Zuverlässigkeit in dieser Hinsicht, wenn auch nach anderen Seiten hin dieses erste Modell noch der Verbesserung bedurfte. — Die gewonnenen Erfahrungen verwertete die Firma dann zur Herstellung eines neuen Modells, das allen Anforderungen hinreichend genügte und seitdem von mir verwendet wurde (Mod. E. G. IV). Als Besonderheit sei nur erwähnt, daß die Dochtkohlen zwar schräg abbrennen, aber der Docht der wagrechten (positiven) Kohle zu einer horizontal gerichteten trichterförmigen Vertiefung ausbrennt. Dies ist der Hauptgrund für das wagrechte Ausstrahlen des Lichtes. Außerdem wirkt eine vorzüglich ausgleichende Reguliervorrichtung dazu mit. Die Lampe brennt normal mit 30 Ampère bei 52 Volt in $2^1/_2$ bis 3 Stunden ab. (Mehrbelastung auf kurze Zeit bis 55 Amp. sehr gut verwendbar). Die Stelle größter Helligkeit wandert dabei auf einem gegenübergestellten Schirm ganz wenig, und vor allem nicht abwärts, sondern um einen Mittelpunkt herum, der sich auf Zentimeter genau angeben läßt. Unerläßlich ist allerdings die Verwendung von Ampère- und Voltmeter zur Überwachung der Lampen, zumal beim „Einbrennen“ einer neuen Lampe, da sie außerhalb der für sie besonders angegebenen Spannung und Stromstärke dauernd einwandfreie Leistungen nicht liefern kann. Die feinere Regulierung ist sehr einfach.

Beleuchtung des Hauptspaltes.

Nach befriedigender Lösung dieser „brennenden“ Frage konnte an die Beendigung der inzwischen begonnenen Vorversuche für die übrige Versuchsanordnung gegangen werden. Vor-

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

ausgeschickt sei, um es nicht immer wiederholen zu müssen, daß die Wirkung jedes einzelnen Teiles der Versuchsanordnung photographisch festgestellt wurde, d. h. mit Serienaufnahmen, die die Wirkungen der verschiedenen Abänderungen an einem bestimmten Teile der Versuchsanordnung wiedergaben. Das Stativ, das die photographische Platte trug, wurde dabei mittels Kurbel jedesmal um ein geringes höher verstellt, sodaß die Aufnahmen (oft 20 und mehr), auf einer Platte nebeneinander zu liegen kamen und bequem vergleichbar waren.

Es galt zunächst, den Lichtkegel der Lampe mit einer Sammellinse möglichst vollkommen aufzufangen, und damit den feinen Spalt zu beleuchten, der durch den Diffusionstrog hindurch auf der Platte abgebildet werden sollte. Dieser feine Spalt soll „der Hauptspalt" heißen.

Zwischen Lampe und Sammellinse mußte ein Kühltrog mit Wasser zur Abhaltung der Wärmestrahlen Platz finden. Deshalb ließ sich die Sammellinse nicht so nahe an die Lampe heranbringen, daß der ganze Lichtkegel verwertet werden konnte. (Große Linsen helfen dem nicht ab, denn sie müssen erfahrungsgemäß stark abgeblendet, d. h. am Rande bedeckt werden, da sonst die Abbildung unklar wird.)

Inzwischen hatte es sich jedoch herausgestellt, daß es nötig ist, den Hauptspalt nicht mit dem ganzen Kraterbild der Lampe zu beleuchten, wie es die Sammellinse liefert, sondern schon vorher einen geeigneten Streifen daraus auszuschneiden, der nur so groß ist, daß der Hauptspalt gerade vollständig beleuchtet ist. Sonst wirkt nämlich der Hauptspalt nicht als heller feiner Strich, sondern als enge Blende, durch die hindurch etwaige kleine Änderungen auf der leuchtenden Kohle, z. B. geringe Wanderungen des Lichtbogens, noch auf der Platte abgebildet werden.

Es empfahl sich also, einen nicht so engen, aber genau wie der Hauptspalt gerichteten „Vorspalt" zu verwenden. Dadurch wäre aber der Streifen aus dem an sich schon unzureichend hellen Kraterbild ausgeschnitten worden, und dieser Streif hätte nochmals mit einer Linse auf den Hauptspalt abgebildet werden müssen. Es wäre also Licht verloren worden.

Statt dessen lag der Gedanke nahe, den Spalt recht nahe an die Lampe heranzubringen, und ihn dann mit der Sammellinse auf den Hauptspalt abzubilden. Ein solcher Spalt ließ sich beliebig stark kühlen, wenn seine drei Hauptteile, die beiden Schneiden und die Grundplatte mit dem Fenster, hohl und für Wasserdurchfluß eingerichtet waren. Die Mechanikerwerkstatt des Institutes lieferte einen solchen kühlbaren Spalt, nach meinen Angaben. Er wurde 5—10 cm vor dem Krater der positiven Kohle aufgestellt. Während die Lampe brannte, durchfloß ihn stets ein langsamer Strom Leitungswasser. Dieser gekühlte Spalt ließ sich genau wie ein anderer Spalt in der Breite verstellen und hatte den Vorteil, den größten Teil der beträchtlichen Lampenhitze zu verschlucken; deshalb war hinter ihm nur noch ein kleiner Kühltrog nötig, also konnte genügend nahe an diesem vollauf hell erleuchteten Spalt schon die Abbildungslinse ihren Platz finden.

Mit dieser Anordnung: Lampe-Kühlspalt-Kühltrog-Linse-Hauptspalt habe ich alle Vorversuche und einen Teil der Maßaufnahmen befriedigend ausführen können. Erst als ich mikroskopische Objektive zu verwenden anfing, habe ich, um den dadurch entstehenden Lichtverlust auszugleichen, die Ausnützung des Lampenlichtes wie folgt gesteigert.

Ich ging hierzu wieder darauf zurück, eine Sammellinse möglichst nahe an die Lampe heranzubringen, weil der Kühlspalt, so nahe er auch stehen mag, aus einer schon verhältnismäßig breiten Stelle des Lichtkegels (ca. 8 cm Durchmesser) einen schmalen Streifen ausschneidet. Käme an dieser Stelle eine Sammellinse zu stehen, so würde sie alles Licht des Kegels erfassen können, und ein im Verhältnis kleineres Bild (Durchmesser $1^1/_2$ cm) des Kraters auf dem

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

(nicht mehr gekühlten) Vorspalt entwerfen. Das von diesem durchgelassene Licht würde also entsprechend stärker sein.

Eine Sammellinse, die die große Hitze in der Nähe der Lampe (5—8 cm) aushielt, lieferte mir Zeiß-Jena. Sie besteht aus Hartglas und ist nicht rings gefaßt, sondern zwischen 3 Metallstäben eingeklemmt, die der Ausdehnung der Linse in der Hitze folgen können, ohne daß die optische Axe derselben merklich verschoben wird. Der Lichtgewinn dieser Anordnung war mehr als hinreichend, sodaß ich die Belichtungsdauer der einzelnen Aufnahmen (s. u.) noch beträchtlich herabsetzen konnte.

Lichtfarbe.

Von diesem weißen Licht durfte jedoch nur eine Farbe auf den Hauptspalt gelangen, da sonst das Kurvenminimum Spektralerscheinungen gezeigt hätte, also keine scharfe Aufnahme gestattet hätte.

Anfänglich benutzte ich das violette Licht, das durch Einschalten geeignet gefärbter Glasplatten und eines Jodsilberspiegels sehr gut ohne Beimischung fremder Farben erhältlich war. Die Empfindlichkeit der gewöhnlichen photographischen Platte gerade für violett erlaubte hinreichend kurze Belichtung. Aber schon nach einem Jahre mußte ich diese Lichtart aufgeben, da die notwendige grobe Einstellung auf der Mattscheibe verhängnisvolle Schwierigkeiten für die Augen ergab. Das Erkennen violetter Bilder auf der Mattscheibe[1] ist für die Augen immer schwierig, zuweilen trotz absoluten Abschlusses von anderm Lichte unmöglich gewesen. Schließlich sah ich davon ab und benutzte das Blau dicht am Grün, bis ich schließlich zum Grün-Blau überging, natürlich unter Benutzung der entsprechenden Farbfilter und photogr. Platten (Vogel-Obernetter-Silber-Eosin, Perutz-Perxanto, auch Agfa-Chromo). Hier konnte das Auge wenigstens einigermaßen der Plattenempfindlichkeit Schritt halten, wenn auch die genauen und endgültigen Einstellungen wie bisher von photographischen Probe-Aufnahmen abhingen.

Zur Erzeugung des grünen Lichtes habe ich anfangs zwei Höchster Farbfilter benutzt, deren eines die mehr blauen, das andere die mehr gelben Strahlen absorbierte. — Später kam ich auf das Zettnowsche Grünfilter, eine Flüssigkeit, die leider wegen ihres Gehaltes an ziemlich konzentrierter Chromsäure sogar Leiboldsche Glaströge sehr schnell an den Kittstellen zerfraß. Ich benutzte daher als Gefäß eine U förmig ausgeschnittene 1—$1^1/_2$ cm dicke Spiegelglasscheibe, auf die an jeder Seite eine $^1/_4$ cm dicke Spiegelglasscheibe mit Klemmschrauben aufgepreßt war. Zur Dichtung benutzte ich $^1/_2$ mm Paraplatte (entsprechend zugeschnitten), die von der Lösung nicht im geringsten angegriffen wird. Das Zettnow-Filter gibt grünes Licht in einem Spektralbereiche von 540 bis 580 $\mu\mu$, hat aber einen, leider erst recht spät bemerkten Nachteil: es ist lichtempfindlich, indem es an der Glaswand, die von der Lampe intensiv beleuchtet ist, nach mehreren Stunden einen Beschlag ansetzt, der sehr wenig lichtdurchlässig ist und deshalb von manchen Aufnahmenserien die letzten Bilder lichtschwach, ja unsichtbar machte. Man könnte sich durch tägliches Reinigen und Neufüllen des Gefäßes helfen, aber das wäre nicht angebracht gewesen, da bei den Versuchsreihen gerade möglichst wenig Änderungen zwischen den einzelnen Versuchen verlangt werden mußten. Unter Verzicht auf diese sonst sehr

1) Fluorescenzschirme helfen dem einigermaßen ab, doch ist das Bild auf der gewöhnlichen Mattscheibe bei blauem oder grünem Licht vorzuziehen.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

einfache, konstante und saubere Art von Lichtfilter ging ich über zur Zerlegung des Lichtes mit Prismen.

Verwendet wurde ein Paar hintereinander aufgestellter geradsichtiger Schwefelkohlenstoffprismen, die wegen der starken Lichtbrechung des Schwefelkohlenstoffes ein sehr langes Spektrum lieferten. Ein Straubelscher Compensator zur Parallelverschiebung der Strahlen[1] sorgte dafür, daß stets die gewünschte Lichtsorte auf den Hauptspalt fiel. Das erhaltene Licht war sehr gut brauchbar, nur machte es sich unangenehm bemerkbar, daß Schwefelkohlenstoff bei verschiedener Temperatur und längerer Beleuchtung verschiedenes Brechungsvermögen, vielleicht auch Durchlässigkeitsänderungen aufweist. (Das Prisma mußte in nächster Nähe des Fensters zwischen beiden benutzten Zimmern (s. u.) seinen Platz finden.) — Außerdem verschluckt der Apparat beträchtlich viel Licht. — Deshalb nahm ich später ein geradsichtiges Glasprisma, das zwar weniger wirksam, aber immer noch vollkommen ausreichend war. Gewöhnlich benutzte ich die Stelle des Grün von 540 bis 560 $\mu\mu$. Die Einstellung der gewünschten Lichtsorte konnte ich nach einiger Übung aus freier Hand vornehmen. Sie geschah bei Maßaufnahmen nicht oft, denn die ganze Versuchsanordnung ist immer möglichst wenig geändert worden.

Die genaue Bestimmung der Lichtsorte geschah mit einem Zeiß'schen Taschenspektroskop und zwar an der Stelle, wo das Licht auf die photographische Platte auftreffen sollte.

Der beleuchtende Teil der Versuchsanordnung hat also endgültig folgende Gestalt bekommen (s. Fig. 4): Lampe (B), Hartglaslinse (L), Kühltrog (K), Vorspalt (V), Sammellinse (S), Geradsichtiges Prisma (P), Hauptspalt (H) (M in der Figur deutet Stelle und Dicke der Mauer zwischen den beiden später erwähnten Zimmern an).

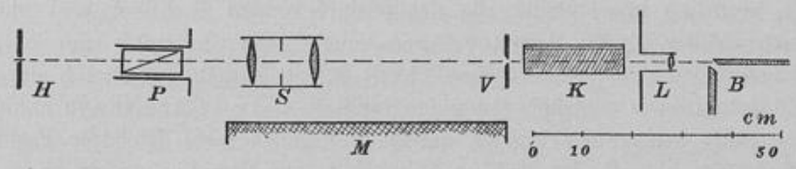

Fig. 4

2. Abbildender Teil der Versuchsanordnung.

Aufstellung des Troges. Lichtverschluß.

Da die Angaben über Einzelheiten des abbildenden Teiles des öfteren Bezug auf den Trog nehmen müssen, bringe ich hier zunächst die nötigsten Bemerkungen über seine Aufstellung für die Versuche.

Für die Aufstellung des Troges war erforderlich: Konstante Temperatur, Erschütterungsfreiheit und Stellung genau senkrecht zur Axe des Lichtweges.

In Bezug auf die konstante Temperatur des Troges erfreuten sich die Versuche ganz besonders günstiger Umstände, da das „Zimmer für konstante Temperatur" des physikalischen Institutes dafür zur Verfügung stand. — Es ist dies ein im Sockelgeschoß des Institutes liegendes

1) Wied. Ann. 66 p. 350. 1898.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Zimmer[1], das in ein anderes Zimmer eingebaut ist, sodaß seine Wände nirgends mit der Außenluft in Berührung sind.

Die Anordnung ist so glücklich getroffen, daß Sommers und Winters im Zimmer fast genau dieselbe Temperatur von 17,5° herrscht, wenn das Zimmer ruhig sich selbst überlassen bleibt.

Die Bogenlampe war selbstverständlich aus diesem Zimmer verbannt; deswegen fand der ganze Beleuchtungsapparat seinen Platz im Vorzimmer, das Licht trat durch einen Durchbruch in das Versuchszimmer ein, wo der Apparat erst vom Prisma ab untergebracht wurde.

Wegen dieser ausgezeichneten Verhältnisse konnte von vornherein auf Umgebung des Troges mit den sonst üblichen Vorrichtungen zur Erhaltung der Temperatur verzichtet werden.

Es genügte, den Trog frei aufzustellen (Über die Tröge selbst s. u.). Er fand seinen Platz gesondert auf einem konischen Zementsockel von 85 cm Höhe, worauf oben noch eine schwere Zinkplatte (50×50×1,5 cm) mit starken Stellschrauben ruhte, die die genau horizontale Lage einzustellen gestattete.

Da das Zimmer während der Exposition der photographischen Platte nicht stundenlang vollständig unzugänglich bleiben durfte (die beiden Hauptuhren für die elektr. Uhrenanlage des Institutes stehen z. B. in dem Zimmer), wurde dieser Steintisch mit einem genügend geräumigen Verschlag aus lichtdichtem schwarzem Baumwollsatin umgeben, der zugleich das Stativ für die photographische Platte mit umfaßte.

Während der Versuche wurde die Temperatur im Verschlag und besonders im Troge mit mehreren Thermometern sorgfältig beobachtet. Diese Thermometer ließen sich sämtlich von außen ablesen. Die im Troge befindlichen[2] wurden dabei mittels Sammellinse von einer hinter dem Verschlage angebrachten Glühlampe (durch rote Glasscheiben hindurch) für die Ablesung beleuchtet und mit einer zweiten als Lupe wirkenden Linse durch eine kleine Öffnung in der Vorderseite des Verschlages abgelesen. (Die photographische Platte war selbst vor diesen roten Strahlen geschützt.) — Die Temperatur im Trog war gewöhnlich während des ganzen Versuches konstant. Die Luft im Verschlag war kurz nach Beginn des Versuches öfters um 1 bis 2 Zehntel Grad höher als im Trog. Doch der Unterschied schwand schon nach kurzer Zeit.

Ein lichtdichter Kanal, der diesen Verschlag mit der Beleuchtungsvorrichtung verband, mußte sehr bald beseitigt werden, weil er Luftströmungen vermittelte, die in der Umgebung des Troges die Temperatur beeinflußten. Der unvermeidliche tägliche Verkehr in beiden Zimmern (im Vorzimmer arbeitete noch ein Herr) brachte es nämlich mit sich, daß an der Durchbruchsstelle Luftstöße herüber kamen, die nicht vermieden werden konnten, da die Versuchsanordnung allenthalben zugänglich bleiben sollte. Zur Abhilfe wurde an dieser Stelle ebenfalls ein Verschlag aus schwarzem Stoff angebracht, aus dem der Lichtweg durch eine eben hinreichende Öffnung austrat. Dann durchsetzte er etwa $1^1/_2$ m lang frei den Raum des Zimmers und gelangte durch mehrere Blenden in das Innere des Trogumbaues. Da alle Gegenstände matt geschwärzt waren, wies die photographische Platte keine Spuren von Nebenlicht auf, auch wenn während der Aufnahme das Zimmer erleuchtet war.

Übrigens wurde mit der Zeit ein Lichtverschluß (Schlitzverschluß) am Eingange zum Trogumbau angebracht, der von mehreren Stellen des Zimmers aus durch Kontakte elektrisch

---

1) S. den ausführl. Bericht Phys. Zeitschr. 1906 S. 10.

2) Hier wurden Thermometer verwendet, deren unterer (eintauchender) Teil möglichst gleichmäßig zylindrisch war. Auch sonst wurde Sorge getragen, daß der Querschnitt der Flüssigkeit im Diffusionsgebiet konstant blieb.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

ausgelöst werden konnte. Für die Maßaufnahme war ebenfalls ein solcher Kontakt im Nebenzimmer dicht bei der Lampe angebracht, der durch Niederdrücken mit dem Fuß betätigt werden konnte, damit die Hände zur etwaigen Bedienung der Lampe und der zugehörigen Apparate freiblieben. Maßaufnahmen wurden grundsätzlich von hier aus unter Beobachtung und Notierung der Lampen-Tätigkeit vorgenommen, schon um die Anwesenheit im Versuchszimmer und damit Temperaturschwankungen auszuschließen, besonders aber auch, um durch gleichmäßige Belichtung der Platten gleichmäßige Behandlung der Kurven beim Entwickeln zu ermöglichen.

Von Wichtigkeit war es endlich noch, den Trog so aufzustellen, daß die Axe des Lichtweges seine Wände genau senkrecht durchsetzte. Um dies zu prüfen, schaltete ich in den Lichtweg kurz nach Verlassen der Abbildungslinse (an der Stelle, wo er frei durchs Zimmer ging) eine weiße Kartonpappe ein, die dem Lichtwege durch eine eben hinreichende Öffnung den Durchtritt gestattete. Stand der Trog annähernd richtig, so war das von seinen Glaswänden zurückgeworfene Spiegelbild der Lichtquelle bei verdunkeltem Zimmer deutlich auf der weißen Fläche zu erkennen. Es kostete wenig Mühe, die Abbildungslinse so einzustellen, daß dieses Bild scharf erschien, stand der Trog bloß beinahe richtig, so waren vier Bilder nebeneinander zu sehen, die der Reihe nach immer lichtschwächer waren: 1) Von der zugekehrten, 2) von der abgekehrten Fläche der vordern Glasplatte, 3) von der zugekehrten, 4) von der abgekehrten Fläche der Hinterwand. — Bei genau senkrechtem Auftreffen der Lichtstrahlen mußten diese 4 Bilder aufeinander fallen, und ihre Mittelpunkte mußten mit dem Mittelpunkte der Öffnung im Karton zusammenfallen, resp. sie mußten beiderseits gleichweit darüber hinausreichen. Deckten sich die 4 Bilder dann noch nicht vollständig, so war dies zugleich ein höchst empfindliches Mittel, um festzustellen, daß die Platten des Troges nicht genau planparallel waren.

Die genaue Einstellung des Troges erfolgte durch Drehen an den Fußschrauben der Zinkplatte, auf der er ruhte. Geringes Rücken mit der Hand korrigierte nach einiger Übung seitliche Abweichungen. — Um nicht vor jedem Versuche von Neuem eine derartige Einstellung vornehmen zu müssen, habe ich den Trog für mehrere aufeinanderfolgende Versuche, soweit es anging, unverrückt stehen lassen, höchstens nochmals mit der weißen Kartonpappe nachgeprüft. Um geringen Erschütterungen des Troges beim Füllen etc. vorzubeugen, legte ich zwischen Trog und Zinkplatte ein Stück Schreibpapier, das in dünner alkoholischer Lösung eines Klebemittels aufgeweicht war. Es trocknete bald und hielt den Trog hinreichend fest. —

Da der Trog nach jedem Versuch geleert, gereinigt und mit der neuen Lösung vorgespült[1] werden mußte, führte ich eine Röhrenleitung von der Bunsenwasserluftpumpe bis zum Trog (unter Zwischenschaltung einer großen Flasche zur Aufnahme der Flüssigkeit) und ließ den Troginhalt und das Spülwasser, so oft es nötig war, absaugen. Das Ausspülen geschah aus der Spritzflasche mit feinem Wasserstrahl, der alle Trogwände bestreichen konnte. Die letzten Reste der Flüssigkeit entfernte ich mit Hilfe eines zur Spitze ausgezogenen Glasrohres, das am Ende der Vakuumleitung angefügt wurde. Die Entleerung geschieht dadurch sauberer und zugleich gründlicher als jedes Ausgießen oder Herausschwenken es erreichen könnte. — Bei Beobachtung von einiger Vorsicht gelang es so, den Trog für den nächsten Versuch in derselben Lage zu behalten, die er beim vorhergehenden gehabt hatte.

1) Trocknen ist überflüssig. Die zuerst eingefüllte (leichtere) Flüssigkeit benetzt zunächst den unteren Teil des Troginnern und steigt beim Einfüllen der zweiten in den oberen Teil. Erforderlich ist also nur, daß an den Glaswänden im untern Teil nicht Tropfen der ersten Flüssigkeit hängen bleiben und die zweite verunreinigen. — Vorspülen verhütet auch die Bildung von Luftbläschen an den Wänden.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Abbildung des Hauptspaltes auf die photographische Platte.

Der abzubildende Spalt (Hauptspalt) von Krueß war noch derselbe, den Heimbrodt angewandt und beschrieben hat. — Die beiden Platinschneiden, die mit einer auf 500stel Millimeter anzeigenden Trommel verstellbar waren, wurden in der Institutswerkstatt nochmals sorgfältig geglättet und ließen sich dann bis auf weniger als 1/100 Millimeter einander nähern, ehe das klare Spaltbild in die bekannte Perlenschnur von einzelnen Lichtpünktchen überging. Ich habe dank der verfügbaren Lichtmenge gewöhnlich mit ca. 0,02 mm, in besonders günstigen Fällen mit 0,015 bis 0,010 mm Spaltweite photographieren können.

Die Neigung des Spaltes unter einem Winkel von genau 45° zur Horizontale wurde erreicht, indem das Bild des Hauptspaltes scharf auf einen an der gegenüberliegenden Wand aufgespannten weißen Karton (6—7 m entfernt) eingestellt wurde. Dieser Karton trug ein genau rechtwinkliges Dreieck in scharfer Zeichnung (300 mm, 400 mm, 500 mm Seitenlänge), dessen längere Kathete mit der dünnen Schnur eines davorhängenden Lotes parallel war. — Der Spalt wurde so gedreht, daß sein Bild mit der Hypotenuse zusammenfiel. — Danach konnten dann die übrigen Spalte und spaltförmigen Blenden leicht eingestellt werden.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß stets die allergrößte Sorgfalt auf die optische Zentrierung des ganzen Apparates verwendet, d. h. dafür gesorgt wurde, daß der Mittelpunkt des leuchtenden Lampenkraters, die Mittelpunkte der Spalte und die Mitten, besonders die Axen der Linsen genau in einer horizontalen Geraden lagen. Diese Zentrierung war äußerst mühevoll und langwierig, solange die einzelnen Teile des Apparates jeder für sich aufgestellt werden mußten; deshalb ließ ich vor einem Jahre eine $2^3/_4$ m lange optische Bank anfertigen, die alle Teile des gesamten Beleuchtungs- und Abbildungsapparates auf einzelnen Schlitten mit verstellbaren Tragvorrichtungen aufnahm. — Zugleich wurde eine Einrichtung angebracht, die es ermöglichte, die Einstellung der Linse von der Mattscheibe des photographischen Statives aus unter Beobachtung des Bildes vorzunehmen.

Die Abbildungslinse war anfangs mit dem Hauptspalt zusammen in einem Tubus vereinigt, später aber für sich auf der optischen Bank aufgestellt, was beim Zentrieren von Vorteil ist. — Die von Heimbrodt benutzte einzelne Linse (14,5 cm Brennweite, 2,5 cm Durchmesser) ersetzte ich bald durch Linsensysteme, und zwar zunächst lange Zeit durch ein Zeiß'sches Objektiv (15 cm Brennweite, 7 cm Durchmesser), später durch ein neu angeschafftes (Zeiß-Protar 1:18, 112 mm Brennweite, 7 mm Durchmesser). Das letzte Objektiv gab trotz des kleinen Linsendurchmessers die bei weitem besten, auch lichtstärksten Bilder. —

Für gewisse Fälle schaltete ich zwischen Hauptspalt und Platte statt der Abbildungslinse zwei mikroskopische Objektive ein, die ebenfalls von Zeiß stammen, und von denen noch die Rede sein wird.

Mit diesen Abbildungslinsen sollte auf der photographischen Platte ein klares, scharfes Bild des Hauptspaltes entworfen werden. — Durch Einschalten des Troges mit den diffundierenden Flüssigkeiten sollte dann ein Teil des geraden Striches in eine nach unten ausgebogene Kurve sich verwandeln, von der man natürlich erst recht Schärfe und Klarheit verlangen mußte. Aber so scharf und klar auch der Strich schließlich erschien, so wenig wollte die Kurve die Möglichkeit einer genauen Messung verheißen. Der absteigende Ast und der aufsteigende Ast waren lichtschwach und verwaschen, die unterste Stelle, das „Minimum" der Kurve, das die Hauptrolle bei der Messung spielen sollte, war lange Zeit so unregelmäßig, daß nicht entfernt an Messungen

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

auf Bruchteile eines Millimeters gedacht werden konnte. Systematische Serienaufnahmen führten von einer Veränderung der optischen Anordnung zur andern, und sie hatten den Erfolg, daß die gröbsten Unreinigkeiten im Bild nach und nach wegblieben, bis auf einen Rest, der nicht mehr zu beseitigen war. Nun ist es streng genommen unmöglich, ganz scharfe und lichtstarke Kurven, etwa von der Güte wie der Strich selbst, zu erhalten, und zwar aus folgenden Gründen:

Erstens ist es verständlich, daß die Kurven lichtschwächer sind als der Strich; denn wenn z. B. am Anfang einer Diffusion ein 1 cm langes Stück des Striches zu einer 15 cm nach unten reichenden Kurve ausgezogen wird, so kann ein 1 cm langes Stück eines Kurvenastes nicht viel mehr als $^1/_{30}$ der Helligkeit erhalten, die das Stück des Striches hatte.

Dem wurde von Anfang an Rechnung getragen durch Gewinnung einer möglichst großen Lichtfülle überhaupt auf dem Bild.

Zweitens aber: Man wünscht zwar, daß ein recht dünnes scharfes Spaltbild den Trog durchsetzt, erhält aber dieses scharfe Bild erst auf der Platte. Da der Trog vor der Platte steht, ist dort noch kein scharfes Spaltbild vorhanden, sondern ein verwaschenes: die Lichtstrahlen sind hier noch nicht geordnet (die Verwaschung ist nicht parallel dem Spaltbild). Das unabgelenkte Spaltbild erscheint demnach in voller Schärfe, während die abgelenkten Teile verwaschen erscheinen, da sie von den jeweils getroffenen Diffusionsschichten verschieden abgelenkt werden. — Andererseits: stellt man das Spaltbild scharf, z. B. auf die Vorderwand des Troges ein, so kann auf der Platte vom ganzen Spalt nur ein unscharfes Bild entstehen, da sie dann hinter der Bildebene der Abbildungslinse liegt.

Da es kein optisches System gibt, das auf einer Seite zwei Bildpunkte hat, also etwa auf Trog und Platte gleich scharfe Bilder entwerfen kann, blieb nur die Annäherung übrig, das Aussuchen eines „Optimum", d. h. einer Anordnung, bei der das Spaltbild zwar nicht geometrisch-optisch scharf, aber wenigstens für die Praxis scharf genug bei Trog und Platte erschien.[1]

Für dieses Optimum waren die Grenzbedingungen sofort zu ersehen:

1. Man mußte Trog und Platte so weit von der abbildenden Linse aufstellen, daß die Einstellungsschärfe für beide nicht merklich verschieden war, d. h. praktisch „gleich scharf" war.

2. Trog und Platte durften nicht ungünstig weit von einander entfernt stehen, aber doch noch so weit, daß auf der Platte das Kurvenminimum, und besonders sein Abstand vom „Strich" zu verschiedenen Zeiten der Diffusion noch ohne große Fehlerquelle meßbar war.

3. Die ganze Anordnung mußte im Zimmer aufstellbar sein.

4. Je weiter die Platte von der Abbildungslinse entfernt war, um so „weicher" erschien das vergrößerte Bild des Spaltes. Die zuverlässige Meßbarkeit der Kurven durfte aber nicht von der Verschwommenheit (Weichheit) der Bilder beeinträchtigt werden.

Erforderlich war demnach:

Zu 1. eine Abbildungslinse von kleiner Brennweite, die für Trog und Platte schon annähernd auf „unendlich" eingestellt werden konnte.

Zu 2. Einhaltung genügend großer Kurvenablenkung trotz genügend kleiner Entfernung zwischen Platte und Trog.

---

1) Auf den ersten Blick scheint es, als ob man zwischen Trog und Platte nochmals eine Linse einschalten könnte. Das ist nicht möglich, weil sich die Neigung der abgelenkten Strahlen jeden Augenblick in einem unbekannten Verhältnis ändert. Gerade diese Änderung der Ablenkung soll ja durch die Messung an der photographischen Platte festgestellt werden.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Zu 3. eine einfache Rechnung.

Zu 4. Prüfung der Aufnahmen am Meßapparat auf die Möglichkeit genauer Messung.

Die Durchführung und Vereinigung dieser Erwägungen ergab als Neuerung zunächst die Anschaffung des erwähnten Zeiß-Objektivs von 112 mm Brennweite. Es ließ bei einem Abstand von 5—6 m zwischen Platte und Hauptspalt noch gute Abbildungen zu, wenn der Trog etwa höchstens 1 m von der Platte stand. Die Folge davon war allerdings, daß dann die Ablenkung vom geraden Spaltbild klein war. Messungsfehler konnten also einen relativ großen Bruchteil des Minimumabstandes vom Strich betragen. Aber durch bessere, schärfere Zeichnung der Bilder auf der Platte wurde andrerseits die Fehlergrenze bedeutend herabgesetzt. Ich habe einige Maßaufnahmen (mit $^1/_4$ normal Konzentrationsdifferenz NaCl) durchgemessen, deren größte Kurvenabweichungen 8—10 mm vom Strich betrugen, und relativ recht gute Resultate gehabt. —

Nur hatten solche Platten den Übelstand, daß man nach einer Aufnahme geraume Zeit warten mußte, bis die nächste folgte, denn sonst wäre trotz erheblich fortgeschrittener Diffusion die Kurve der zweiten Aufnahme noch teilweise auf die der ersten gefallen. Also wäre das Berechnungsmaterial sehr kärglich gewesen. Demnach mußte die Ablenkung der Kurve vergrößert werden. Dies konnte man dadurch erreichen, daß man Tröge benutzte, in denen die Strahlen einen längeren Weg durch die diffundierenden Schichten zurückzulegen hatten, d. h. der krümmenden Wirkung länger unterworfen waren. Die Herstellung solcher dickerer Tröge ist weiter unten behandelt.

Für solche Aufnahmen dagegen, bei denen ich (zu Vergleichs-Aufnahmen) auf einen dünnen Trog angewiesen war, habe ich mir anders geholfen: Ich habe den Hauptspalt zunächst durch ein starkes mikroskopisches Objektiv stark verkleinert, und dieses sehr kleine Bild mit einem schwachen mikroskopischen Objektiv auf die Platte abgebildet. — Bei der sehr kleinen Brennweite war hier die Einstellung auf „unendlich“ noch besser angenähert zu erreichen, und trotzdem erhielt man auf der Platte eine Abbildung, die nicht zu stark vergrößert war, also gut definierte Umrisse aufwies. Trog und Platte konnten hier wieder größeren Abstand, bis über zwei Meter, bekommen.

Immerhin blieb diese zweite Anordnung ein Behelf, dessen Verwendung möglichst beschränkt wurde. Denn hier hat man es gewissermaßen mit einem sehr langen Mikroskop zu tun, und die Güte der Abbildung ist demnach sehr empfindlich gegen die kleinsten äußeren Einwirkungen auf das System, z. B. geringe Erschütterungen, Lichtschwankungen usw. — Vorzuziehen war also die Verwendung des photographischen Objektives im Verein mit dickeren Trögen.

Herstellung dickerer Tröge.

Bisher war ein (auch von Heimbrodt benutzter) Trog verwendet worden, bei dem die Strahlen eine Strecke von 2,5 cm in der Flüssigkeit zurückzulegen hatten. Herrn Dr. Drecker-Aachen spreche ich meinen besten Dank dafür aus, daß er auch mir diesen äußerst genauen Trog leihweise überlassen hat. — Wie oben erwähnt, trat ich dem Gedanken nahe, statt der bisher benutzten Trogdicke die doppelte, dreifache oder noch größere zu probieren. Vorversuche mit Leipoldtrögen gaben gute Resultate. In der Tat wurde bei dickeren Trögen die Kurvenablenkung so stark, daß man den Abstand Trog—Platte ruhig noch verkleinern konnte und trotzdem eine größere Anzahl von (schärferen) Aufnahmen übereinander lagern konnte. — Die Neuerung wirkte demnach doppelt günstig auf die Messung.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Es war also nötig, Tröge von größerer Ausdehnung mit trotzdem möglichst planparallelen Frontplatten anzufertigen. Die Tröge wurden wieder 5 teilig wie der bisherige, d. h. sie bestanden aus einer 2 cm dicken Bodenplatte, auf der die beiden ebenso dicken Seitenplatten ruhten, und vorn und hinten wurden möglichst gute Spiegelglasplatten, aus derselben Platte geschnitten, angefügt. Es wurde darauf gesehen, daß die Flüssigkeit nirgends weniger als 2 cm Weg zwischen den Glasstücken nach außen hätte durchsickern müssen. — Die Frage der genauen Ausführung wurde gewissermaßen aufs Geradewohl dadurch gelöst, daß ich mir jeden Boden- und Seitenteil vom Glasschleifer je 2—3 mal nach genau denselben Maßen herstellen ließ und genaue Rechtwinkligkeit verlangte. Unter den gelieferten Teilstücken suchte ich dann die geeignetsten heraus. Die Prüfung auf vollkommene Berührung je zweier Teile wurde ausgeführt, indem einige Tropfen Wasser zwischen beide gebracht wurden, und deren gleichmäßige Verteilung zwischen den Berührungsflächen beobachtet wurde. Erwies sich die Berührung (Benetzung) an allen Berührungsflächen des Troges zugleich als vollkommen, so war dies schon der beste Wahrscheinlichkeitsbeweis dafür, daß der Trog gut zu dichten sein würde. Zugleich ließ sich vermuten, daß die Platten hinreichend parallel sein würden. — Um einen solchen Trog zusammenzuhalten, ließ ich je zwei bronzene Rahmen gießen, die den Trog in der Längsrichtung beiderseits umfaßten und mittels mehrerer Schrauben die Seitenwände von oben auf das Bodenstück und die Frontwände an das so entstandene dreiteilige Mittelstück preßten. Zur Verteilung des Druckes der Schrauben wurden 5 mm dicke Zinkplatten auf die Glasplatten gelegt, die von den Schrauben fest gepreßt werden konnten, ohne den sog. Muschelbruch bei den Glasklötzen zu verursachen.

Als Dichtung haben sich 3 Arten bewährt:

1. Papier (Reichspapier) für indifferente Lösungen. Vorteilhaft war es, die Papierstücke dünn zu paraffinieren (Eintauchen in dünne Lösung von Paraffin in Schwefelkohlenstoff). — 2. Paragummiplatte bis $^1/_2$ mm dick für Äther, Alkohol etc. Sie ist sehr gleichmäßig zu haben. Empfehlenswert ist es, sie schwach in Benzol aufzuquellen, damit etwa doch vorhandene Unregelmäßigkeiten beim Zusammenpressen sich leicht verteilen. Der Gummi darf nirgends, besonders nicht an den Kanten der Glasplatten, gedehnt oder gespannt sein. Man muß die Schrauben nach einigen Tagen nochmals schwach anziehen. — Dann kann man selbst Benzol in den Trog füllen, ohne daß es durchsickert. — 3. Fettgummi,[1] ganz besonders für starke Säuren etc.

Die breiten Berührungsflächen erleichtern das Dichten ganz wesentlich. Doch ist es nötig, das Papier sowohl wie die Gummiplatte aus einem Stück für sämtliche Berührungsflächen des ganzen Troges zu schneiden. Alle Dichtungen gestatten, bei der Spiegelprobe (Seite 8) geringe Parallelitätsfehler durch Anziehen resp. Lockern der entsprechenden Schrauben zu korrigieren.

Die Tröge haben sich bewährt. Sie sind genau und zuverlässig, sehr stabil, und unempfindlich gegen kleine Verletzungen. Schon deshalb durfte man sie den Leibold'schen vorziehen, deren Planparallelität nie genau verbürgt und vor allem nicht korrigiert werden kann. Außerdem kann man ihnen durch Zusammenrücken der beiden Seitenwände beliebig großen Inhalt geben. —

Benutzt habe ich besonders einen Trog von ca. 15 cm, einen von 7,5 und einen von 6 cm innerer Dicke.

---

1) Rezept: 1 Teil Vaseline, 2 Teile Paragummi. — Die Vaseline auf dem Sandbade gelinde erhitzen, den Paragummi nach und nach in möglichst kleinen Stücken hinzufügen und oft rühren. Nach etwa 3 Tagen erhält man eine äußerst gleichmäßig zähe braune Masse, die sofort verwendet werden kann. Bei längerem Aufbewahren hält sie sich ziemlich gut.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Herstellung und Einfüllen der Lösungen.

Als diffundierende Lösung habe ich durchweg verschiedene Konzentrationsstufen von Kochsalzlösung verwandt, sobald es sich um Prüfung und Weiterbildung der Methode handelte. Nur gelegentlich sind andere Lösungen, wie Salzsäure, Ammoniak, Alkohol, Schwefelkohlenstoff, Chloroform, Zucker und Glyzerin verwendet worden, lediglich um festzustellen, ob hier etwa noch unvorhergesehene Anforderungen an die Methode zu stellen waren.[1] — Kochsalzlösung war bei dem großen Verbrauch am wohlfeilsten, ferner war ihre Diffusion schon anderweit verschiedentlich genau untersucht, sodaß man hier festen Anhalt hatte, auch ließ sie sich leicht und sauber genau herstellen, und hielt sich gut und unveränderlich.

Ich habe geschmolzenes Chlornatrium von Kahlbaum verwendet, das ich zweimal (die 1. und 3. Sendung von je 1 kg) in Stichproben nach der üblichen quantitativen Methode untersucht und rein gefunden habe. Die Lösungen selbst habe ich durch Austitrieren gegen Silbernitrat mit Kalium-monochromat als Indikator hergestellt. Hierzu habe ich je eine Urlösung von zehntel normal Silbernitrat und Chlornatrium hergestellt, wofür die Salze sorgfältig getrocknet und abgewogen worden sind, und alle Lösungen hiermit verglichen. — Diese Art der Prüfung hatte den Vorteil, daß man ohne Rücksicht auf Wassergehalt des Salzes einfach eine reine konzentrierte Vorratslösung (etwa 5 fach normal) durch geeignete Verdünnung auf die gewünschten Konzentrationen bringen konnte, und daß diese jederzeit mit dem stets gebrauchsfertigen Titrierapparat auf ihren tatsächlichen Gehalt nachgeprüft werden konnten. Diese Untersuchung ist an jeder Flasche vor dem Gebrauch geschehen.

Das Einbringen der Lösungen in den Trog geschah, wie üblich, durch Eingießen der leichteren Lösung in den mehrfach mit gleicher Lösung ausgespülten Trog, und durch Unterschichten der schwereren Flüssigkeit mittels Kugelpipette und Kapillarrohr bei genau geregelter Ausflußzeit. Da das Einfüllen ziemlich lange dauerte, und es andererseits oft wichtig war, nicht zu spät nach Einfüllungsbeginn die erste Aufnahme zu machen, habe ich bald statt der einen Kapillare deren 2—4 verwendet, je nach Troggröße mit $^1/_2$ bis $1^1/_2$ cm Abstand voneinander. Sie waren wie Gabelzinken nebeneinander angeordnet und an der Kugelpipette entweder angeschmolzen oder angeschliffen. Sie lagen einer Seitenwand des Troges an (ohne daß Kapillarität zwischen beiden wirken konnte) und blieben während des Versuches in ihrer Lage. Die Ausflußgeschwindigkeit wurde zuerst durch zwei Hähne geregelt, der eine zum Absperren, der andere zur Regelung der Tropfenzahl. Späterhin erwies es sich als genauer, und ließ sich besser während des Ausflusses kontrollieren, wenn man die obere Öffnung der Einfüllpipette mit einem Rohr verschloß, durch das nur ein ganz langsamer Luftstrom eintreten konnte, sodaß die Flüssigkeit unten nur ebenso langsam in den Trog austreten konnte. Die Geschwindigkeit des Luftstromes ließ sich leicht durch Vorschalten einer gewöhnlichen Gaswaschflasche und Zählen der eintretenden Luftblasen erkennen und mittels Schraubquetschhahn am Luftzuführungsschlauch regeln. — Wenn die Flüssigkeit im Trog bereits einige Höhe erreicht hatte, ließ sich übrigens die Ausflußgeschwindigkeit ganz gut beschleunigen, ohne die Sauberkeit der Mischung zu beeinträchtigen. Das Einfüllen dauerte je nach Troggröße 6 bis 20 Minuten.

Sichere Gewähr für die richtige Einflußgeschwindigkeit bot die Beobachtung der

1) Einige Abzüge von derartigen Aufnahmen (auf Veloxpapier) habe ich für die Dresdener photographische Ausstellung im Jahre 1909 angefertigt.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Diffusionskurve an der Mattscheibe während des Einfließens, weil diese bei zu raschem Einfluß jede kleine Schwankung prompt und getreu anzeigte.

Auf die Einhaltung von „quantitativ“ im chemischen Sinn genau abgemessenen und gleichen Flüssigkeitsmengen beim Einfüllen habe ich verzichtet, da sie bei den Versuchen keinen Wert haben. Immerhin sind mindestens die Zehntel Kubikzentimeter genau innegehalten, für den Fall, daß der Druck der Flüssigkeitssäule irgendwie in Betracht kommen sollte. —

Aufnahme, Behandlung und Messung der Platten.

Für die Ergebnisse kommen nur die beiden grünempfindlichen Platten Schleußner-Viridin und Perutz-Perxanto in Betracht. Sie lieferten schon bei Belichtung von 12 sec. an sichtbare, meist für die Messung brauchbare Aufnahmen. Doch ist meist die Belichtungsdauer zwischen 15 und 30 sec. gehalten worden, da eine Wanderung des Kurvenminimums hierbei noch nicht meßbar nachzuweisen war. Die Platten wurden als im photographischen Sinn „normal belichtete“ Aufnahmen möglichst überentwickelt. Das war erforderlich, um bei der Messung die sogenannten „harten“ Kontraste als scharf definierte Grenzen zwischen hell und dunkel benutzen zu können. Es war möglich, da die Platten im übrigen sorgfältig selbst vor rotem Licht geschützt wurden, und deshalb 6—10 Minuten in doppelt bis dreifach starkem Entwickler liegen konnten, ohne einen Schleier zu bekommen. Verstärkt habe ich nur in ganz wenigen Fällen. Fixieren und Wässern wurde aufs nötigste beschränkt, meist auch Fixierbadzerstörer (Agfa) verwandt, um nicht durch langes Wässern die Kontraste zu schwächen. Meist wurden deshalb auch die Platten schnell getrocknet (mit Alkoholbädern), oft schon um deswillen, weil die Aufnahme des einen Tages schon am nächsten Tage für etwaige Änderungen in der Anordnung zu einer neuen Aufnahme verwertet, bezw. durchgemessen werden mußte.

Der Diffusionsvorgang wurde, abgesehen von einer großen Anzahl einzelner Versuchsaufnahmen und Serien, für die Messungen je nach ihrem Zweck teils einige Stunden, teils mehrere Tage verfolgt. Die Aufnahmen fanden in angemessenen Zwischenräumen bei fortgeschrittener Diffusion statt. Die für die eigentlichen Messungen bestimmten Aufnahmereihen dauerten mindestens 6 Stunden, meist 9 Stunden. Solche Aufnahmen habe ich stets von der Lampe aus bewirkt (s. oben S. 8), um die Stromstärke (oft 55—60 Amp. s. oben S. 3) und die Spannung überwachen zu können.

Für alle „Maßaufnahmen“ wurde ein besonderes genaues Beobachtungsbuch (auch für Nebenumstände) mit vorgedrucktem Kopf für jede Platte geführt. — Die Zeit lieferte eine an die Hauptuhr des Institutes angeschlossene elektrische Sekundenuhr (2 Sekunden wöchentlicher Gang), später ein guter Stettiner Schiffschronometer. Alle Aufnahmen begannen mit dem ersten Sekundenschlag einer ganzen Minute.

Die Messungen der Kurvenminima und ihrer Wanderung während des Verlaufes der Diffusion wurde an einem Zeißschen Komparator ausgeführt. (Er besteht im Wesentlichen aus einem in genauen Führungen gleitenden Schlitten, der die photographische Platte trägt und sich unter zwei Mikroskopen hin und her bewegen läßt. In dem einen (Einstellungs-)Mikroskop werden bestimmte Punkte der Platte nacheinander genau unter das Fadenkreuz eingestellt, in dem andern (Ablese-)Mikroskop liest man an einem auf dem Schlitten angebrachten Maßstab die jeweilige Stellung in tausendstel Millimetern ab; dadurch ist die Entfernung der einzelnen Punkte voneinander bestimmt).

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Für die hier erforderliche Messung wurde die Platte in geeigneter Lage so auf die Plattform des Schlittens aufgeklemmt, daß „der Strich“ (das unabgelenkte Spaltbild) um 45° gegen die Verbindungslinie der Mikroskope geneigt war. Dies geschah mit dem entsprechend eingestellten Doppelfaden des Fadenkreuzes[1] im Okular des Einstellungsmikroskopes. Da ferner der Abstand der Stellen größter Ablenkung vom Strich zu messen war, stellte ich dann die Platte durch Verschiebung des Schlittens so ein, daß der eine der beiden Fäden den untern Teil des „Kurvenminimums“ eben schnitt, der andere möglichst genau die Tangente an dieser Stelle darstellte (Fig. 5). (Auch beim Strich wurde die untere Grenze seines Bildes zur Messung benutzt). —

Fig. 5

Mit den Messungen war ich solange unzufrieden, als ich das zum Komparator gehörige Einstellungsmikroskop benutzte. Es vergrößerte viel zu stark; und da die Kurvenbilder an sich schon Vergrößerungen (des Spaltbildes) waren, bestand hier zwischen Kurvenbild und Meßfaden ein ungünstiges Mißverhältnis, dem das Auge nicht gerecht werden konnte. Deshalb habe ich das Mikroskop so ändern lassen, daß es nur kleinere Vergrößerungen bis zur 3 fachen herab lieferte. Dadurch habe ich der Leistung des Auges am nächsten zu kommen geglaubt, in der Annahme, daß im Gesichtsfeld des Mikroskopes die Anfügung des feinen Meßfadens an eine solche Kurve von der Stärke eines starken Bleistiftstriches wesentlich objektiver (für mehrere Beobachter gleichmäßiger) erfolgen könnte, als bei der subjektiven Entscheidung, wo der Meßfaden im zu stark vergrößerten Bild der Kurve einwandfrei zwischen den Punkten des „Plattenkornes“ und den bereits geschwärzten Einzelpunkten des Kurven-Bildes einzufügen sei. Seit Benutzung des weniger vergrößernden Mikroskopes habe ich bei mehrmaliger Wiederholung derselben Einstellung gut übereinstimmende Ablesungen bekommen, und das war ja für die Rechnung entscheidend. — Die Messungen an den einzelnen Platten wurden stets mindestens 3 mal wiederholt, und zwar möglichst die zweite einige Stunden nach der ersten und die dritte am andern Tage.

Auch das Objektmikrometer des Einstellungsmikroskopes wurde benutzt, und zwar um die seitliche Verschiebung der Minima während der Diffusion festzustellen. Ich ließ die Mikrometervorrichtung so drehen, daß der zugehörige Faden genau parallel zur Bewegungsrichtung des Schlittens hin und her bewegt werden konnte. Auch diese Messungen wurden 2 bis 3 mal vorgenommen.

Bei der Prüfung und Verrechnung der Messungsergebnisse habe ich im allgemeinen die von Heimbrodt (l. c.) beschriebenen und angewandten Methoden benutzt. Die Rechnungen erfordern zwar einen ungewöhnlich großen Aufwand an Zahlen, lassen sich aber nicht vereinfachen, ohne die Genauigkeit zu beeinträchtigen. Die bis jetzt vorliegenden Ergebnisse lassen darauf schließen, daß meine Untersuchungsmethode brauchbar und genügend genau ist. Ausführliche zahlenmäßige Angaben, sowie eine mathematische Kritik der Ergebnisse werde ich seinerzeit an geeigneter Stelle veröffentlichen.

---

1) Die Lage dieser Fäden prüfte ich regelmäßig nach mit einer dazu hergestellten photographischen Platte, die mehrere genau unter 45° geneigte Linien trug.

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Inhalt.

	Seite
Versuchsanordnung	1
1. Beleuchtender Teil der Versuchsanordnung	2
a) Lichtquelle	2
b) Beleuchtung des Hauptspaltes	3
c) Lichtfarbe	5
2. Abbildender Teil der Versuchsanordnung	6
a) Aufstellung des Troges; Lichtverschluß	6
b) Abbildung des Hauptspaltes auf die photographische Platte	9
c) Herstellung dickerer Tröge	11
Herstellung und Einfüllen der Lösungen	13
Aufnahme, Behandlung und Messung der Platten	14

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

	Seite
Versuchsanordnung	1
1. Beleuchter	2
a)	2
b)	3
c)	5
2. Abbildend	6
a)	6
b)	hische Platte 9
c)	11
Herstellung und Einfül	13
Aufnahme, Behandlung	14

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf

Universitäts- und
Landesbibliothek Düsseldorf