



Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung.

I. Die Construction von Mikroskopen auf Grund der Theorie. II. Die dioptrischen Bedingungen der Leistung des Mikroskops. III. Die physikalischen Bedingungen für die Abbildung feiner Structuren.
IV. Das optische Vermögen des Mikroskops.

Von

Dr. E. Abbe,

ao. Professor in Jena.

I. Die Construction von Mikroskopen auf Grund der Theorie.

1. In den Handbüchern der Mikrographie findet man gelegentlich die Thatsache berührt, dass die Construction der Mikroskope und ihre fortschreitende Verbesserung bisher fast ausschliesslich Sache der Empirie, geschickten und ausdauernden Probirens von Seiten erfahrener Praktiker, geblieben ist. Hin und wieder wird auch wohl die Frage aufgeworfen: warum die Theorie, nach welcher man von der Wirkungsweise des fertigen Mikroskops genügend Rechenschaft geben kann, nicht zugleich die Grundlage für seine Herstellung geworden sei, warum man also nicht auch diese Art von optischen Instrumenten nach theoretisch entwickelten Rechnungsvorschriften construiren, wie solches seit Fraunhofer mit dem Fernrohr und in neuerer Zeit mit den optischen Theilen der photographischen Camera so erfolgreich geschieht. Der Grund für das Fortbestehen des empirischen Verfahrens wird allgemein in technischen Schwierigkeiten gesucht — in der vermeintlichen Unmöglichkeit, bei der Ausführung der Mikroskopobjective vorgeschriebene

Maasse für die einzelnen Bestandtheile der Construction in der erforderlichen Genauigkeit einzuhalten. Auf den ersten Blick erscheint diese Erklärung in der That als durchaus plausibel; denn die Kleinheit der Dimensionen, welche zumal bei den stärkeren Objectiven unvermeidlich ist, lässt die Schwierigkeiten ihrer Herstellung nach exacten Maassen als ausserordentlich gross ansehen. Nichtsdestoweniger hat sich mir dieses Bedenken als unzutreffend herausgestellt, nachdem ich nähere Kenntniss erlangt hatte über die Einrichtungen und die technischen Verfahrensweisen, die in einer wohlgeleiteten optischen Werkstatt bei der Construction der Mikroskope in Anwendung kommen. Die aufmerksame Berücksichtigung der wissenschaftlichen und technischen Hilfsmittel, die der praktischen Optik zu Gebote stehen, und die Abwägung der verschiedenartigen Schwierigkeiten an Leitfaden einer theoretischen Discussion der einschlagenden Bedingungen führte vielmehr zu der durch den schliesslichen Erfolg bewährten Ueberzeugung: dass für den dermaligen Stand der optischen Technik die Ausführung von Linsen und Linsensystemen nach vorgeschriebenen Maassen aller Elemente, in einer die richtige Wirkung verbürgenden Genauigkeit, nicht schwieriger, sondern eher leichter sei als die Erfüllung der anderweitigen Ansprüche, welche auf alle Fälle gestellt werden müssen, wenn die betreffenden Dinge überhaupt brauchbar sein sollen; und dass es mithin nur darauf ankommen werde, alle Momente der optischen Wirkung richtig in Rechnung zu stellen, um des Erfolges einer theoretischen Construction bei der technischen Ausführung sicher zu sein. Auf diese Ansicht hin habe ich denn in Verbindung mit Herrn C. Zeiss in Jena einen ernsthaften Versuch unternommen, der Construction der Mikroskope und ihrer weitem Vervollkommnung eine ebenso sichere theoretische Grundlage zu geben, wie die Herstellung astronomischer Fernrohre schon durch Fraunhofer gewonnen hat. Dank der Bereitwilligkeit, mit welcher Herr Zeiss mir hierbei entgegengekommen ist, indem er mir mehrere Jahre hindurch die ausgezeichneten Hilfsmittel und die tüchtigen Arbeitskräfte seiner Werkstatt zur Verfügung stellte, und Dank dem Eifer, mit welchem der kunstfertige Werkführer dieser Werkstatt und seine geschickten Gehilfen den einschlagenden Arbeiten sich unterzogen haben, ist dieser Versuch nach längeren Bemühungen zum Ziele gelangt. Seit einiger Zeit werden in der genannten Werkstatt Mikroskopsysteme, die einigermassen auf der Höhe der dermaligen Lei-

stungen stehen dürften, vom schwächsten bis zum stärksten, durchaus nach theoretischen Vorschriften ausgeführt.

Die betreffenden Constructions sind dabei, auf Grund genauer Untersuchung der zu verwendenden Materialien, bis in die letzten Einzelheiten — jede Krümmung, jede Dicke, jede Linsenöffnung — durch Rechnung festgestellt, so dass alles Tatonnement ausgeschlossen bleibt. Von jedem zu verarbeitenden Glasstück werden zuvor die optischen Constanten an einem Probepisma mittelst des Spectrometers gemessen, um Abweichungen des Materials durch geeignete Veränderung der Construction unschädlich zu machen. Die einzelnen Bestandtheile werden möglichst genau nach den vorgeschriebenen Maassen ausgeführt und zusammengesetzt, und nur bei den stärkeren Objectiven wird ein Element der Construction (eine Linsendistanz) bis zuletzt variabel gelassen, um mittelst desselben die unvermeidlichen kleinen Abweichungen der Arbeit wieder ausgleichen zu können. — Es zeigt sich dabei, dass eine hinreichend gründliche Theorie in Verbindung mit einer rationellen Technik, die alle Hilfsmittel benutzt, welche die Physik der praktischen Optik bietet, auch bei der Construction der Mikroskope die empirischen Verfahrungsweisen mit Erfolg ersetzen kann.

2. Im Laufe der Arbeiten, welche zu diesem Resultat geführt haben, hat sich nun herausgestellt, dass die bisherige Theorie des Mikroskops in wesentlichen Stücken sehr unvollständig ist. Die Art zunächst, wie die Bedingungen einer vollkommenen Abbildung und darauf hin die Ursachen der Unvollkommenheit discutirt werden, zeigte sich der wirklichen Sachlage, wie sie beim Mikroskop besteht, nicht entfernt gewachsen. Der Umstand, dass hier eine Grösse des Oeffnungswinkels in Frage kommt, wie sie bei keinem andern optischen Instrument wiederkehrt, macht namentlich die angenommenen Begriffe der Aberrationen durchaus unbrauchbar — schon für jede einigermaßen erschöpfende und zutreffende Beurtheilung gegebener fertiger Mikroskope, geschweige denn für eine exacte Vorausbestimmung der Wirkungen einer erst auszuführenden Construction. Um für einen derartigen Versuch den erforderlichen Anhalt zu gewinnen, musste die theoretische Analyse der Wirkung eines Linsensystems von grossem Oeffnungswinkel auf eine viel breitere mathematische Grundlage gebaut und viel weiter in's Einzelne geführt werden, als bisher geschehen ist; wobei sich denn ergeben hat, dass die richtige Functionirung eines den heutigen Ansprüchen ge-

nügenden Mikroskopsystems von einer unerwartet grossen Anzahl selbstständiger Bedingungen abhängt, deren sachgemässe Würdigung nicht möglich ist ohne die Einführung mancher neuer Gesichtspunkte in die allgemeine Theorie des Mikroskops.

Die Ergänzung der Theorie nach dieser Seite hin war in der Hauptsache eine rein mathematische Aufgabe, welche mit den feststehenden Grundsätzen der Dioptrik vollständig zu erledigen war. Erfahrung und Experiment kamen dabei nur in soweit in Frage, als es sich darum handelte, die Erscheinungsform der einzelnen theoretisch nachweisbaren Fehlerquellen am fertigen Mikroskop kennen zu lernen und ihre sehr ungleiche Bedeutung für den praktischen Gebrauch des Instruments richtig in Anschlag zu bringen. Dagegen stellte sich in der bisherigen Kenntniss noch eine Lücke anderer Art heraus, welche nur durch erweiterte Erfahrung ausgefüllt werden konnte. Sie ist gekennzeichnet durch die unsichern, zum Theil einander widersprechenden Ansichten, welche über die Bedeutung des Oeffnungswinkels der Objective und die sogen. Functionen des optischen Vermögens, Definition und Auflösung, aufgestellt werden. Die Unsicherheit in diesem Punkte zu heben und eine deutliche Einsicht in die hier eingreifenden Bedingungen zu gewinnen, war die *conditio sine qua non* für jeden erfolgreichen Versuch in der angegebenen Richtung. Denn die Anforderung, welche an die Grösse des Oeffnungswinkels gestellt wird, giebt erst Maass und Richtschnur für die ganze Aufgabe. Alle Verhältnisse der Construction werden durchaus andere, je nachdem für ein Objectiv 40 oder 90 oder 150 Grad als Oeffnungswinkel vorgeschrieben wird. Welche Ansprüche aber in dieser Hinsicht rationell seien, blieb völlig zweifelhaft, so lange sich nicht die genaueste Rechenschaft von der wirklichen Bedeutung dieses Factors geben liess.

3. Die Untersuchungen, welche ich ausgeführt habe, um diese Frage selbstständig zur Entscheidung zu bringen, haben das Ergebniss geliefert, dass ein wesentliches Moment in der optischen Function des Mikroskops bisher gänzlich übersehen worden ist. Bei der Erklärung und Deutung der Wirkungen dieses Instruments hat man es nämlich als eine selbstverständliche Sache angesehen, dass die Abbildung der mikroskopischen Objecte in allen Stücken nach denselben dioptrischen Gesetzen erfolge, nach denen mikroskopische Bilder im Fernrohr oder auf der Platte einer Camera erzeugt werden; und man hat darauf hin stillschweigend vorausgesetzt, dass

alle optischen Functionen beim Mikroskop grade so wie bei diesen andern Apparaten durch die geometrisch definirbaren Verhältnisse des Strahlengangs bestimmt seien. Eine strengere Kritik der bekannten Erfahrungen, auf welche die traditionelle Unterscheidung von Definitions- und Auflösungs-Vermögen sich stützt, hat diese scheinbar so natürliche Annahme als unzulässig herausgestellt. Es hat sich gezeigt, dass sie zwar für gewisse, speciell nachweisbare Fälle gültig bleibt, dass aber im Allgemeinen, und zumal bei solchen Objecten, an denen das Mikroskop seine höchste Leistungsfähigkeit bewähren soll, die Erzeugung der mikroskopischen Bilder an einen eigenthümlichen, bisher nicht beachteten physikalischen Process geknüpft ist, der in den Objecten selbst seinen Sitz hat, unabhängig von der Einrichtung der Mikroskope eintritt, für dessen Effecte aber diese letztern mittelbar maassgebend wird.

Die Consequenzen dieser Thatsachen reichen an die wichtigsten Probleme der Mikrographie heran. Sie führten zum Nachweis einer ganz specifischen Function des Oeffnungswinkels und, in Anschluss hieran, auf deutliche und sichere Begriffe über das sogen. optische Vermögen des Mikroskops in seinen beiden Factoren, aus welchen Begriffen sich alle Bedingungen, von denen seine Leistung abhängt, genau feststellen lassen. Hieraus folgen zunächst bestimmte praktische Maximen für die rationelle Construction des Mikroskops, sowie Winke für eine sachgemässe Prüfung gegebener Instrumente. Andererseits aber führte der Ausbau der so gewonnenen Grundlage durch Experiment und Theorie zu einigen die mikroskopische Wahrnehmung im Allgemeinen betreffenden Schlussfolgerungen. Nicht nur lässt sich eine Grenze der Kleinheit bestimmen, bei der alle Beobachtung mikroskopischer Structuren eine Schranke finden muss, sondern es tritt auch ein allgemein eingreifendes Moment zu Tage, welches beim wissenschaftlichen Gebrauch des Mikroskops nicht wird ausser Acht bleiben dürfen; indem sich zeigt, dass die bisher unangefochten gebliebene Grundlage für die Deutung mikroskopischer Wahrnehmungen — dass nämlich ein fehlerfreies mikroskopisches Bild in allen Fällen die wirkliche Beschaffenheit des Objects darstelle — für eine ganze Classe von Beobachtungen durchaus nicht zu Recht besteht.

Die hier in ihren Hauptrichtungen bezeichneten theoretischen und experimentellen Studien waren zwar, ihrer Veranlassung nach, zunächst auf den praktischen Zweck gerichtet, einen sicheren Leit-

faden für die richtige Formulirung der Ansprüche bei der Berechnung von Linsensystemen zu gewinnen; sie haben sich aber von selbst zu einer vollständigen Theorie des Mikroskops abgerundet, welche so ziemlich in alle Capitel der mikrographischen Doctrin eingreift und dieser ausserdem einige neue Capitel hinzufügt. Dieser Theorie ist die enge Verbindung mit der Technik der Mikroskopverfertigung in zwiefacher Art zu Statten gekommen. Einestheils haben die strengen Anforderungen, welche der praktische Zweck der Arbeit stellte, Nachforschungen nöthig gemacht, zu welchen die Mikrographen schwerlich Anlass gefunden haben würden; andererseits aber hat die wirkliche Ausführung von Mikroskopen nach den Grundsätzen der in Rede stehenden Theorie für alle wesentlichen Bestandtheile derselben die empfindlichste Probe herbeigeführt, welcher theoretische Ansichten auf diesem Felde unterworfen werden können.

Die detaillirte Mittheilung dieser Studien über die Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung wird demnächst in einem ausführlichen Aufsätze im VIII. Bande der Jenaischen Zeitschrift für Medicin und Naturwissenschaft erfolgen. Da ich jedoch annehme, dass unter den praktischen Mikroskopikern Manchem eine gedrängte Uebersicht über die Ergebnisse der Untersuchung willkommen sein wird, so erlaube ich mir, den Lesern dieses Archivs im Folgenden eine kurze Zusammenstellung der hauptsächlichsten Resultate meiner Arbeit vorzulegen. Ich folge dabei den beiden oben hervorgehobenen Richtungen der Untersuchung, indem ich zuerst Dasjenige anführe, was auf den rein dioptrischen Theil der Theorie abzielt und sodann übergehe zur Betrachtung der angedeuteten neuen Factoren, welche in die Functionen des Mikroskops eingreifen; wobei ich indess bemerken will, dass die folgenden Darlegungen an keiner Stelle den Anspruch machen, die vollständige Entwicklung und Begründung der aufzustellenden Sätze, wie sie der ausführliche Bericht liefern wird, reproduciren zu wollen.

II. Die dioptrischen Bedingungen der Leistung des Mikroskops.

4. Bei der Erklärung des Strahlenganges, der im Mikroskop die Abbildung der Objecte vermittelt, pflegt man zum Ausgangspunkt aller speciellen Untersuchungen das bekannte typische Schema des zusammengesetzten Mikroskops zu wählen, welchem zufolge das Objectiv ein umgekehrtes Bild des Objects erzeugt und das Ocular,

als Lupe wirkend, dieses vergrössert in die Weite des deutlichen Sehens rückt. Auf die solchem Schema entsprechende Zerlegung des Vorgangs gründet man zugleich die Discussion der näheren Bedingungen, von denen die optische Leistung nach Quantität und Qualität abhängt. — Zu einer allgemeinen Uebersicht über die Wirkungsart des Mikroskops reicht diese Betrachtungsweise allerdings aus. Soll jedoch die dioptrische Analyse des Abbildungsvorgangs die Grundlage gewähren für eine genauere Feststellung der verschiedenen Factoren, welche in ihm maassgebend sind, so bedarf dieselbe nach zwei Seiten hin einer wesentlichen Erweiterung.

Erstens muss der Strahlengang im Mikroskop unter einem allgemeineren Gesichtspunkt angesehen werden. Die nämlichen Strahlen, welche als homofocale Büschel von den einzelnen Objectpunkten aus im Mikroskop verlaufen, lassen sich auch zusammenfassen zu homofocalen Büscheln, die von den verschiedenen Punkten einer vor (unter) dem Mikroskop im äussern Raume liegenden Fläche ausgehen. Diese Fläche ist im Allgemeinen die — dioptrisch — nach aussen projecirt gedachte Oeffnung des Objectivs und enthält im Besondern die zur Beleuchtung dienende Lichtquelle (z. B. die Fläche des Beleuchtungsspiegels) als Theil in sich. Neben denjenigen Bildern, welche die Bestandtheile des optischen Systems successive vom Object entwerfen, den Objectbildern, entsteht daher eine Reihe von zugeordneten Oeffnungsbildern, welche sämmtlich die nach aussen projecirte Fläche der freien Oeffnung abbilden. Das letzte von diesen, das dem schliesslichen virtuellen Bilde des Objects zugeordnete, erscheint im sogen. Augenpunkt oberhalb des Oculars und kann dasselbst mittelst einer Lupe näher beobachtet werden; das erste, vom Objectiv allein erzeugte, liegt in oder nahe der obern Focalebene des Objectivs und bietet sich dem freien Auge beim Hereinsehen in den offenen Tubus dar. — Beide Reihen von Bildern sind durch allgemeine Relationen untereinander verknüpft, deren Nachweis den Schlüssel für zahlreiche sonst schwer zugängliche Fragen abgiebt. Alle Merkmale der Objectbilder hängen mit gewissen andern Merkmalen der Oeffnungsbilder zusammen, und umgekehrt; und namentlich enthalten die letzteren alle Bestimmungsstücke für die Begrenzung der Strahlenbüschel, welche die Erzeugung der ersteren vermitteln. — Darauf hin ergeben sich u. A. auf rein theoretischem Wege allgemein gültige Sätze über die sogen. Tiefenperspective des Mikroskops, über den Einfluss, den die Beugung des Lichts in der

freien Oeffnung des Objectivs auf das mikroskopische Bild ausübt, vor Allem aber über die Bedingungen der Lichtstärke und über die Wirkung verschiedener Beleuchtungsweisen und verschiedener Beleuchtungsapparate. Andererseits aber liefert die wirkliche Beobachtung der Oeffnungsbilder unter Benutzung geeigneter Vergrößerungsvorrichtungen ein neues Hilfsmittel zum Studium der Objecte selbst. In ihnen erscheinen nämlich die Spuren der sämtlichen Lichtstrahlen, die in irgend welchen Richtungen vom Object aus in das Mikroskop gelangt sind; die erhellten Theile eines der Oeffnungsbilder, z. B. des ersten, in der obern Focalebene des Objectivs gelegenen, markiren die verschiedenen Strahlenbüschel, welche vom Präparat ausgehen und dessen Abbildung vermitteln. Daher müssen alle Einwirkungen, welche dieses Präparat auf die hindurchtretenden Lichtstrahlen ausübt, im Besondern alle Ablenkungen, als Modificationen in jenen Oeffnungsbildern direct erkennbar sein; was im Folgenden weitere Ausführung und mehrfache Anwendung finden wird.

Die Grundlage für die exacte Entwicklung der mannigfachen Folgerungen, zu denen die Betrachtung der erwähnten Oeffnungsbilder führt, bildet ein für die ganze Theorie des Mikroskops sehr fruchtbarer Satz, der sich allgemein erweisen lässt. Er lautet: Wenn ein optisches System für einen seiner Brennpunkte vollkommen aplanatisch ist, so trifft jeder von diesem Brennpunkte ausgehende Strahl eine durch den andern Brennpunkt gelegte Ebene in einem Abstände von der Axe, dessen lineare Grösse gleich ist dem Product aus der Aequivalentbrennweite des Systems mit dem Sinus des Winkels, welchen der betreffende Strahl mit der Axe bildet. — Da die genannte Bedingung bei einem correcten Mikroskop sowohl für das Objectiv allein wie auch für das Mikroskop im Ganzen erfüllt sein muss, so stellt dieses Theorem einen quantitativen Zusammenhang her zwischen dem Oeffnungswinkel des Mikroskops einerseits und den linearen Durchmesser der Oeffnungsbilder über dem Objectiv und über dem Ocular. Er macht es aber auch möglich, aus dem mikrometrisch gemessenen Ort, den die Spur eines Strahles in der obern Focalebene des Objectivs einnimmt, die Richtung zu bestimmen, in welcher derselbe vor dem Eintritt in das Mikroskop verläuft. Das Oeffnungsbild über dem Objectiv kann daher, wenn man es mit einem passenden Mikrometer-Ocular beobachtet, zur Messung der

Ablenkungen benutzt werden, welche die Lichtstrahlen im Präparat erleiden. — Vergl. (15) u. f.

5. Zweitens bedarf es einer tiefer greifenden Charakteristik für die wesentlichen optischen Functionen, welche bei der Abbildung eines Objects unter beliebig grossem Bildwinkel und mit Strahlenkegeln von beliebig grossem Oeffnungswinkel den Abbildungsvorgang unterscheiden von der Abstraction, in der die Gaussische Theorie die Wirkungen eines Linsensystems betrachtet. Diese Charakteristik ergibt sich durch die Aufstellung allgemeingiltiger Begriffe über die Focalwirkung und die Flächenausbreitung in einem optischen System, durch welche zwei der Idee nach selbstständige und in ihren specifischen Leistungen auch thatsächlich trennbare Grundfactoren des Abbildungsvorgangs bezeichnet werden. Abgesehen davon, dass erst auf eine solche Unterscheidung hin eine erschöpfende Analyse der Vollkommenheitsbedingungen und der Abbildungsfehler möglich wird, bietet dieselbe das einzige Hilfsmittel, um den Antheil der einzelnen Bestandtheile eines zusammengesetzten optischen Systems an seiner Gesamtleistung festzustellen. Das Fehlen eines sichern Leitfadens für eine derartige Feststellung, d. h. beim Mikroskop das Fehlen eines sachgemässen Begriffs von Objectiv- und Ocularwirkung, der unter Ausscheidung des Unwesentlichen und Zufälligen den eigentlichen Gegensatz in den Functionen beider Bestandtheile zutreffend zum Ausdruck brächte, ist die Ursache wesentlicher Mängel, welche der bisherigen Theorie des Mikroskops anhaften und auch die Veranlassung zu einigen Irrwegen, auf welche das Streben nach Vervollkommnung dieses Instruments gerathen ist.

Wenn man den Zweck des Objectivs in die Erzeugung eines reellen Bildes und den des Oculars in dessen weitere Vergrösserung setzt, so wird durch diese Erklärung — so richtig und nützlich sie ja ist — das wesentliche Princip des zusammengesetzten Mikroskops keineswegs getroffen. Es ist diess schon daran zu bemerken, dass dieser Angabe zufolge die Verbindung von Objectiv und Ocular bloss der Vergrösserung zu dienen scheint, während doch die notorische Ueberlegenheit des zusammengesetzten Mikroskops gegenüber dem besten Simplex vielmehr in der Qualität der Leistung besteht und auch schon bei solchen Vergrösserungen zu Tage tritt, die sich ohne alle Schwierigkeit mit dem einfachen Mikroskop erreichen lassen. Worin dagegen die eigentliche Bedeutung des Principes der

Zusammensetzung zu suchen sei, ergibt der Hinweis darauf, dass beim Compositum in allen Fällen eine charakteristische Theilung der Arbeit in Bezug auf jene Functionen der Focalwirkung und der Flächenausbreitung vorliegt, in der Art, dass die specifischen Effecte der einen im Objectiv, der andern im Ocular ihren Sitz haben. Im Objectiv erfolgt die Flächenausbreitung des Bildes praktisch so gut wie vollkommen nach den Gesetzen für die Abbildung eines unendlich kleinen Flächenelements; im Ocular erfolgt die Focusverschiebung, d. h. die Divergenzänderung in den einzelnen Lichtbüscheln bis auf unmerkliche Abweichungen so wie an unendlich engen Strahlenbüscheln. Dagegen kommt dort das eigenthümliche Moment der Divergenzänderung von Strahlenkegeln grossen Oeffnungswinkels, hier das eigenthümliche Moment der Ausbreitung einer Bildfläche auf grossen Bildwinkel zur Geltung. Es lässt sich aber beweisen, dass die Erzeugung eines einigermaßen vollkommenen Bildes unter den fraglichen Bedingungen über Oeffnungs- und Bildwinkel bei keinem optischen Apparat anders möglich ist als durch eine solche Vertheilung der specifischen Focalwirkung und der specifischen Vergrösserung auf besondere Bestandtheile des optischen Systems und dass mithin beim Mikroskop im Besondern die Höhe seiner Leistung wesentlich in dieser Seite des Zusammenwirkens von Objectiv und Ocular begründet ist. Dabei ergibt sich indess, dass — wenigstens unter Voraussetzung des zur Zeit in Anwendung stehenden Constructionsprincips — die sachliche Grenzscheide zwischen Objectiv- und Ocularfunction nicht da zu suchen ist, wo das reelle Bild des Objectivs dem Ocular zugeführt wird, sondern vielmehr da, wo im Objectiv die divergent eingetretenen Strahlenbüschel durch wiederholte Brechungen in parallelstrahlige Büschel umgewandelt sind — von wo aus sie durch eine weitere Brechung nach dem Ocular hin convergirend gemacht werden.

6. Die Consequenz dieser Resultate ist eine besondere Art schematischer Zerlegung des Mikroskops, welche an Stelle der jetzt üblichen überall dann eintreten muss, wenn es darauf ankommt, die Qualität der mikroskopischen Bilder auf ihre maassgebenden Bedingungen zurückzuführen, welche aber auch als Grundlage für die Bestimmung der quantitativen Verhältnisse der Wirkung mit Vortheil gebraucht werden kann. Ihr zufolge besteht der erste Act im Abbildungsvorgang nicht in der Erzeugung des umgekehrten reellen Objectivbildes vor oder in dem Ocular, sondern vielmehr in der

Erzeugung eines, den parallelstrahligen Büscheln entsprechenden unendlich entfernten virtuellen Bildes; der zweite Act aber umfasst dessen fernere Abbildung unter dem Gesichtswinkel des Ocularfeldes und in der Weite des deutlichen Sehens und kommt durch eine letzte Brechung der Strahlen im Objectiv und durch die verschiedenen Brechungen im Ocular zu Stande. Den ersteren kann man die Lupenwirkung des Objectivs nennen, weil dieser Theil der Leistung vollkommen identisch ist mit derjenigen einer gewöhnlichen Lupe für ein fernsichtiges Auge; der zweite Theil aber entspricht offenbar, alle einzelnen Veränderungen des Strahlengangs zusammengefasst, der Wirkung eines Fernrohrs mit kleiner Objectivöffnung, welchem das vorher erwähnte unendlich entfernte virtuelle Bild als Object dient¹⁾. Diese Zerlegung der Gesamtwirkung des Mikroskops wird dadurch eine vollkommen bestimmte, dass der Sitz der letzten im Objectiv eintretenden Brechung, welche die parallelstrahligen Strahlenbüschel nach dem Ocular convergent macht, immer in die obere Focalebene des Objectivs verlegt werden kann. Eine an dieser Stelle aus letzterem ausgeschieden gedachte Linse von einer der Tubuslänge entsprechenden Brennweite gibt alsdann das Objectiv des schematischen Fernrohrs, dessen wirksame Angularvergrößerung nach bekannten Regeln durch Tubuslänge und Ocularstärke gegeben ist. Die Aequivalentbrennweite des die Lupenwirkung im Objectiv vermittelnden Systems bleibt dabei gleich derjenigen des Objectivs selbst und bestimmt in bekannter Weise den Gesichtswinkel, unter welchem das mikroskopische Object bei gegebenem linearem Durchmesser in dem unendlich entfernten Bilde erscheint.

Das hier dargelegte Ineinandergreifen von Objectiv- und Ocularfunction in Form von Lupenwirkung und Fernrohrwirkung muss als die allgemeingiltige Charakteristik für das heute geltende Constructionsprincip des zusammengesetzten Mikroskops hingestellt werden. Wie das Folgende zeigen wird, beantworten sich auf Grund derselben zahlreiche für die Theorie des Mikroskops und für dessen rationelle Construction gleich wichtige Fragen — nach dem Sitz der verschiedenen Fehlerquellen, nach den Mitteln zu ihrer Beseitigung,

1) Zur Erläuterung sei darauf hingewiesen, dass in der That ein wirkliches Mikroskop entsteht, wenn eine correcte Lupe von beliebiger Brennweite centrirt vor dem Objectiv eines Fernrohrs angebracht wird.

nach der Grenze der unter gegebenen Bedingungen möglichen Vollkommenheit, nach dem Einfluss, welchen Brennweite des Objectivs, Tubuslänge und Ocularstärke auf die Qualität des Gesamteffects üben, u. a. m.

7. Im Vorstehenden sind die obersten Gesichtspunkte angezeigt, von welchen eine erschöpfende Theorie des Mikroskops, in ihrem rein dioptrischen Theil, ausgehen muss. Von ihnen aus ergibt sich eine Theorie der Abbildungsfehler oder Aberrationen, die den besondern Aufgaben gewachsen ist, wie die abnorme Grösse des Oeffnungswinkels beim Mikroskop sie mit sich bringt. Es zeigt sich, dass diese Abbildungsfehler in zwei selbständige Classen zerfallen; die eine umfasst die Fehler der Focalwirkung — Aberrationen im engeren Sinne —, die andere wird gebildet durch Fehler der Flächenausbreitung (Vergrösserung), welche beim Mikroskop bisher ausser Acht geblieben sind. Zur ersten Art gehört die sphärische und chromatische Aberration, die man gewöhnlich betrachtet; die zweite begreift eine Reihe eigenthümlicher Abweichungen vom normalen Strahlenlauf, welche sämmtlich daraus entspringen, dass die verschiedenen Theile eines die freie Oeffnung erfüllenden homofocalen Strahlenbüschels, nach Maassgabe der verschiedenen Neigung dieser Theile gegen die Axe und der ungleichen Brechbarkeit der einzelnen Farben, Bilder von ungleicher Vergrösserung liefern — ungleich, sowohl wenn die verschiedenen partiellen Bilder untereinander, wie auch wenn innerhalb je eines derselben verschiedene Richtungen im Sehfeld verglichen werden. Aus diesen Abweichungen, welche ich nicht Aberrationen, sondern Anomalien der Vergrösserung nenne, resultiren nicht nur die bekannten Unvollkommenheiten des mikroskopischen Bildes ausserhalb der Mitte des Sehfeldes, sondern auch eine besondere Art chromatischer Fehler, welche man, obwohl sie mit der eigentlichen Achromasie gar nichts zu thun haben, bisher immer als Merkmale chromatischer Focusdifferenzen gedeutet hat.

Die Abbildungsfehler der zweiten Classe bestimmen ausschliesslich die Beschaffenheit des Bildes ausserhalb der Axe; die Vollkommenheit der Strahlenvereinigung in der Mitte des Sehfeldes dagegen, und damit die maximale Leistungsfähigkeit des Mikroskops, ist allein von den wirklichen Aberrationen, der chromatischen und der sphärischen, abhängig. — Die genauere Analyse dieser ergibt Folgendes:

Erstens. Die chromatische Aberration, wie sie bei grossem

Oeffnungswinkel zur Geltung kommt, beruht nicht allein in denjenigen Focusdifferenzen, welche — der Farbenabweichung selbst und ihrem ungleichförmigen Gang in Crown- und Flintglas entsprechend — die abbildenden Strahlenkegel im Ganzen treffen, sondern ebenso sehr in einer unvermeidlichen Ungleichheit der Farbenvereinigung für verschieden geneigte Strahlenbüschel innerhalb des Oeffnungswinkels, die sich darin äussert, dass ein für gerade Beleuchtung vollkommen achromatisches Objectiv für schief einfallendes Licht mehr oder minder übercorrigirt sein muss. Während die ersterwähnten gewöhnlichen (primären und secundären) Farbenabweichungen bei correcter Construction sich entweder ganz heben oder doch wenigstens fast unmerklich machen lassen, ist diese zweite Fehlerquelle mit den heute der Technik zu Gebote stehenden Materialien durch keine Kunst zu beseitigen. Ihr Einfluss aber ist gross genug, um wenigstens bei den mittleren und mässig starken Objectiven der erreichbaren Vollkommenheit schon da eine Schranke zu setzen, wo die andern unvermeidlichen Fehlerquellen solches noch nicht thun. Nach meinen Erfahrungen bleibt die thatsächliche Leistungsfähigkeit der Objective von 6—3 Mm. Brennweite allein in Folge dieses Umstandes merklich hinter derjenigen Höhe zurück, welche die mögliche Vollkommenheit im Punkte der sphärischen Aberration und die mögliche Vollendung in der technischen Ausführung andernfalls zulassen würden.

Zweitens. Die sphärische Aberration zerfällt bei einer strengeren Untersuchung ihrer Bedingungen in eine Reihe von selbstständigen Gliedern, die in ihrem Anwachsen mit der zunehmenden Neigung der Strahlen gegen die Axe einen sehr ungleichen Gang befolgen. Eine wirkliche Aufhebung ist nur für die beiden ersten Glieder theoretisch möglich. Sobald der Oeffnungswinkel über einen ganz geringen Betrag hinausgeht, kann die Ausgleichung der sphärischen Aberration nicht anders erfolgen als dadurch, dass die nicht aufhebbaren höheren Glieder durch absichtlich herbeigeführte Reste der niedern compensirt werden. Das Anwachsen des unvermeidlichen Deficits, das diese Compensation wegen des ungleichen Ganges der einzelnen Theile nothwendig übrig lässt, bestimmt die Grenze, welche dem Oeffnungswinkel gesetzt werden muss, wenn jenes Deficit im mikroskopischen Bilde ohne schädliche Wirkung bleiben soll. — Für Oeffnungswinkel über 60° hinaus, zumal aber für die grossen Beträge desselben bei den neueren starken Objectiven,

ist die theoretisch unerlässliche Voraussetzung einer genügenden Compensation der bekannte Constructionstypus, nach welchem eine unachromatische, nahezu halbkugelige Frontlinse mit einer stark übercorrigirten Linsengruppe verbunden wird. Seine Erfindung (durch Amici?) muss als die eigentliche Grundlage aller neueren Fortschritte in der Vervollkommnung des Mikroskops angesehen werden.

Für das Trockensystem ergibt sich eine ziemlich bestimmte Grösse der freien Oeffnung — 105 bis 110° —, über welche hinaus eine hinreichende Einschränkung der sphär. Aberration auf keine Weise mehr möglich ist, wenn nicht der freie Objectabstand des Mikroskops unter das äusserste für den Gebrauch unentbehrliche Minimum vermindert werden soll. — Die Anwendung der Immersion dagegen gewährt, bei richtiger Benutzung der hierdurch eingeführten neuen Verhältnisse, die Möglichkeit, die Correction der sphär. Abweichung für sehr viel grössere Oeffnungswinkel genügend auszuführen, und zwar selbst für solche Beträge, welche das beim Trockensystem geometrisch mögliche Maximum (180°) noch etwas überschreiten. In dieser Möglichkeit sehr grosser Oeffnungswinkel, unbeschadet gleichmässiger Correction, und in der Verminderung der Lichtverluste, welche die Reflexion an der untersten Linsenfläche namentlich für die schief einfallenden Strahlen herbeiführt, liegen die einzigen wirklichen Vortheile der Immersionsmethode; Alles was man ausser diesen noch als Vorzüge derselben geltend gemacht hat, beruht auf Missverständnissen. Das Folgende aber wird zeigen, dass diese beiden Unterschiede grade ausreichen, um die notorische Ueberlegenheit der Immersionssysteme vollkommen zu erklären.

Die mathematische Theorie liefert ferner einige praktisch wichtige Aufschlüsse über die Form, in welcher bei incorrecten Constructionen, welche ein merkliches Residuum sphärischer Aberration übrig lassen, dieses zur Erscheinung kommt. Wie verschieden auch im einzelnen Falle der thatsächliche Verlauf der Strahlen in der Nähe ihres schematischen Vereinigungspunktes sein mag, immer lässt sich derselbe durch blosse Veränderung einer Linsendistanz im System (wie z. B. die Deckglas correction herbeiführt) so umgestalten, dass der centrale Theil und die äusserste Randzone des Objectivs richtig zusammenwirken, während die zwischenliegende mittlere Zone alsdann mehr oder minder über corrigirt bleibt. Zugleich aber zeigt

sich, dass kein äusseres Hilfsmittel eine solche typische Correctionsdifferenz, wo sie einmal vorliegt, beseitigen oder auch nur vermindern kann. Weil sie in den Krümmungs- und Brechungsverhältnissen der untersten Linsen des Objectivs wurzelt, leisten ihr gegenüber alle Vorrichtungen, durch welche man auf die Verbesserung der Aberrationen hat einwirken wollen — besondere Correctionsgläser oberhalb der Objective oder besondere Constructionen des Oculars — im günstigsten Falle nur dasselbe, was auch die Veränderung der Linsendistanzen durch eine Correctionsfassung möglich macht. Sie gestatten, den vorhandenen Aberrationsrest zwischen Mittel und Rand der freien Oeffnung gleichsam hin und her zu schieben und auf diese Weise irgend eine einzelne Zone des Objectivs auf Kosten der übrigen vorübergehend mehr oder minder aberrationsfrei zu erhalten. — Einrichtungen wie der von Royston-Pigott ausgedachte »aplanatic searcher« entspringen aus einer vollständigen Verkennung der wirklichen Sachlage. Sie stützen sich auf einen Begriff von sphärischer Aberration, der — weil er nur Spielraum lässt für die einfache Alternative: übercorrigirt oder untercorrigirt — mit sammt der ganzen darauf gebauten Theorie der aplanatischen Brennpunkte gegenüber den heutigen stärkeren Mikroskopen durchaus gegenstandlos ist. Durch solche Hilfsmittel wird die wirkliche Leistungsfähigkeit des Mikroskops niemals erhöht werden; denn Alles, was sie bewirken können, ist bei richtiger Construction auch schon im Objectiv selbst zu erreichen, und Alles, was hier nicht zu erreichen ist oder in einer verfehlten Construction nicht erreicht worden ist, kann auch durch sie nicht geleistet werden.

S. Ihren Abschluss findet die Analyse der Vollkommenheitsbedingungen in dem Nachweis des Einflusses, den die verschiedenen Bestandtheile des Mikroskops auf die Qualität des Gesamteffects ausüben. Hier ergiebt sich nun vor Allem, dass die für die Correctheit der Abbildung in der Mitte des Sehfeldes und damit für das mögliche Maximum der Leistung maassgebenden Factoren, nämlich die chromatische und die sphärische Aberration in dem oben bezeichneten bestimmteren Sinne, allein in der Construction der Objective wurzeln und dass die Einrichtung der Oculare auf jene überhaupt keinen irgend merklichen Einfluss gewinnen kann; dass aber ferner auch alle sonstigen Abbildungsfehler, zu welchen das Ocular theilweise mitwirkt, doch nur insoweit die erreichbare Vollkommenheit der Gesamtleistung begrenzen, als unvermeidliche

Reste jener in der Wirkung des Objectivs, und zwar in demjenigen Theile derselben, der oben als spezifische Focalwirkung bezeichnet wurde, übrig bleiben. Von groben Verstössen in der Construction natürlich abgesehen, kann der ganze Ocularapparat des Mikroskops, gegenüber den in der Focalwirkung des Objectivs begründeten Aberrationen und Vergrösserungsanomalien praktisch als vollkommen fehlerfrei angesehen werden, und zwar in allen wesentlichen Punkten auch dann, wenn nur die einfachsten unter den bekannten Ocular-einrichtungen in Anwendung kommen. Hieraus folgt, dass die mögliche Höhe der Leistung beim Mikroskop allein in der Construction der Objective wurzelt und dass keine denkbare Vervollkommnung der Oculare sie im Geringsten beeinflussen kann; ferner aber, dass auch die besondern Umstände, unter welchen der Ocularapparat fungiren mag, namentlich die Art, wie die Vergrösserung durch die Länge des Tubus und die Stärke des Oculars bewirkt wird, innerhalb des praktisch in Betracht kommenden Spielraums vollkommen gleichgültig bleiben, und — richtige Anpassung der Objective an die einmal angenommenen Verhältnisse vorausgesetzt — die erreichbare Höhe der Leistung durchaus nicht berühren. Was in England zu Gunsten des langen Tubus vorgebracht wird, ist theoretisch ebenso unhaltbar, wie Dasjenige, was neuerdings — von Praszowski — als Vorthheil des kurzen Tubus hingestellt worden ist; wie sich denn diese vermeintlichen Unterschiede auch thatsächlich als nicht vorhanden ergeben, sobald man unter wirklich vergleichbaren Bedingungen sie beobachten will. Desgleichen lassen Theorie und accurate Experimente übereinstimmend Alles als reine Einbildung erkennen, was über die ausserordentlichen Leistungen dieser oder jener besondern Ocularconstruction berichtet wird — so weit es sich dabei um wirkliche Steigerung des optischen Vermögens, nicht etwa bloss um nebensächliche Vorthheile (Grösse des Sehfeldes u. dergl.) handeln soll.

Im Hinblick auf diese Resultate gewinnt die oben erwähnte Grenzbestimmung in Bezug auf Objectiv- und Ocularfunction beim Mikroskop und das auf sie gegründete Zerlegungsschema eine besondere Tragweite. Alle Abbildungsfehler, die überhaupt die Wirkung beeinflussen, finden ihren vollständigen Ausdruck schon in der Beschaffenheit des unendlich entfernten virtuellen Bildes, welches das Objectiv, à la Lupenwirkung, vom Object erzeugt; diesem

gegenüber spielt der ganze Ocularapparat, wie er sich aus Tubus und Ocularlinsen zusammensetzt, die Rolle eines indifferenten Vergrößerungs-Mechanismus, der — à la Fernrohr wirkend — nur dazu dient, jenes Objectivbild dem beobachtenden Auge auf den erforderlichen Sehwinkel auszubreiten, ohne dabei seinem Inhalte irgend etwas hinzuzufügen oder irgend etwas von ihm hinwegzunehmen. Dieser Inhalt selbst aber ist, seinem möglichen Detail nach, bestimmt durch die angulare Grösse der Zerstreungskreise, welche die in der Construction des Objectivs begründeten Abbildungsfehler an Stelle scharfer Bildpunkte in das Lupenbild einführen. Indem man deren Eingreifen in den schliesslichen Effect in Betracht zieht, ergibt sich für jedes concrete Objectiv eine durch Tubuslänge und Ocularstärke beliebig zusammensetzbare Angularvergrößerung, welche für ein Auge von angenommener normaler Sehkraft grade ausreichen muss, das im Objectivbild möglicher Weise abbildbare Detail vollkommen zu erkennen. Diese — welche man die förderliche Angularvergrößerung nennen kann — muss als das Maass der relativen Vollkommenheit des Objectivs angesehen werden; aus ihr bestimmt sich in leicht zu erkennender Weise mit Hilfe seiner Brennweite die förderliche Linearvergrößerung, d. h. diejenige Vergrößerungsziffer, mit welcher die Leistung des betreffenden Objectivs erschöpft ist; es ist die kleinste Vergrößerung, bei der man alles Detail sieht, welches mit ihm, seiner dioptrischen Vollkommenheit nach, überhaupt abgebildet werden kann. Eine stärkere Vergrößerung kann zwar noch brauchbar sein, indem sie solches Detail deutlicher und bequemer zur Wahrnehmung bringt; sie vermag aber niemals das optische Vermögen eines gegebenen Objectivs zu erhöhen. — Unter Voraussetzung gleicher relativer Vollkommenheit der Construction muss für Objective der verschiedensten Brennweiten die angulare Grösse der Zerstreungskreise in ihren Lupenbildern ein und dieselbe sein; es muss also die absolute Grösse der kleinsten Theile, die noch getrennt abgebildet werden, ein und denselben Bruchtheil der Brennweite ausmachen. Daraus folgt einerseits, dass die förderliche Angularvergrößerung für solche Objective gleich ist und ihre Höhe demnach das Maass für die relative Vollkommenheit darstellt; andererseits, dass die förderliche Linearvergrößerung, mithin das absolute optische Vermögen, bei gleicher relativer Güte der Construction in demselben Verhältniss zunehmen muss, in welchem die Brennweite abnimmt.

9. Was die praktische Anwendung der hier aufgestellten Definitionen anlangt, so darf nicht übersehen werden, dass die aus den Aberrationsresten und den Mängeln der technischen Ausführung herrührenden Zerstreungskreise im Lupenbild der Objective beim wirklichen Gebrauch stärkerer Objective niemals mit demjenigen Betrage zur Geltung kommen, der einem die ganze freie Oeffnung erfüllenden Strahlenkegel entsprechen würde. Thatsächlich wird, sobald der Oeffnungswinkel eine beträchtliche Grösse besitzt, immer nur ein Theil desselben von den abbildenden Strahlenbüscheln gleichzeitig in Anspruch genommen, daher denn auch nur dieser Theil die effectiv werdenden Aberrationen veranlasst; und da nun — wie die Beobachtung der Oeffnungsbilder lehren kann — der für die Abbildung thätige Theil der freien Oeffnung nach Grösse und Lage fortwährend wechselt, je nach der Art der Beleuchtung und der Structur der Präparate, so folgt, dass von einer allgemeingiltigen Bestimmung der förderlichen Vergrösserung oder des optischen Vermögens nicht die Rede sein kann¹⁾. Nichtsdestoweniger sind die hier geltend gemachten theoretischen Gesichtspunkte zu einer beiläufigen Abschätzung der Leistungen, welche vom Mikroskop heut zu Tage erwartet werden dürfen, vollkommen brauchbar und ihr Hervorkehren ist sehr geeignet, grosse Illusionen zu beseitigen, denen sich manche Mikrographen in Bezug auf diese Leistungen augenscheinlich hingeben. Die theoretische Discussion der Abbildungsfehler, ihr allseitiges praktisches Studium mittels der im

1) Auch die von Harting zuerst empfohlene Methode, die Unterscheidungsgrenze der Mikroskope an den kleinen optischen Bildchen, wie man solche durch Luftblasen u. dergl. erhalten kann, zu bestimmen, gewährt eine allgemeingiltige und praktisch verwerthbare Feststellung des optischen Vermögens nicht. Denn abgesehen davon, dass bei ihrer Anwendung der wirksam werdende Strahlengang weit abliegt von allen denjenigen Formen, die beim normalen Gebrauch, wenigstens der stärkeren Objective, thatsächlich vorkommen, lässt sich auch auf die im folgenden Abschnitt zu gebenden Nachweise hin darthun, dass die Unterscheidung des Details in solchen Luftblasenbildchen keineswegs von der dioptrischen Wirkung der Objective allein, sondern ebenso sehr von besondern, ganz selbständigen Einflüssen ausserhalb des Mikroskops abhängt. Die Resultate jener Methode geben thatsächlich nur die Grenzen eines der dioptrischen Vollkommenheit fremden Auflösungsvermögens, ganz so wie die Beobachtungen an der Norbert'schen Probeplatte und an den Diatomeen, nur unter etwas veränderten Beleuchtungsverhältnissen.

Folgenden erwähnten Methode und die sorgfältige Prüfung einer ziemlichen Anzahl von Objectiven neueren Datums aus den berühmtesten Werkstätten diesseits und jenseits des Canals haben mich übereinstimmend zu dem Schlusse geführt, dass die heute erreichten und erreichbaren Ziffern förderlicher Vergrößerung durchweg sehr viel geringer sind, als man nach der Freigebigkeit mancher Mikroskopiker mit Tausenden und Zehntausenden denken sollte. Nach meinen Erfahrungen wird unter Voraussetzung der gewöhnlichen Beleuchtungsformen — abgesehen also von ganz abnormen Verhältnissen des Strahlenganges, die sich etwa mit directem Sonnenlicht herstellen lassen, praktisch aber so gut wie werthlos sind — auch bei den allervollkommensten Systemen die optische Capacität schon bei höchstens 8facher Angularvergrößerung erschöpft, so dass Alles im Lupenbild überhaupt abbildbare Detail einem normalen Auge auf jeden Fall zugänglich ist, wenn Tubus und Ocular zusammen ein 8fach vergrößerndes Fernrohr darstellen. Aber selbst diese Leistung wird nur bei den schwächeren und mittleren Objectiven erreicht. Wenn die Brennweite unter 3 Mm. herabgeht, wird die relative Vollkommenheit der Constructionen wegen der rasch wachsenden technischen Schwierigkeiten merklich geringer; und ich bin sicher, dass es kein Objectiv unter 1 Mm. Brennweite giebt, dessen optisches Vermögen über eine 5fache Angularvergrößerung hinausreicht. Man kann leicht ausrechnen, welche Ziffern sich hiernach für die förderliche Linearvergrößerung bei den verschiedenen Brennweiten ergeben (ca. 500 bei 4 Mm., ca. 1200 bei 1 Mm.) und dann weiter, welche Vergrößerungen man äussersten Falls noch als nützlich und brauchbar wird anerkennen dürfen, wenn man beachtet, dass die blosse Ausdehnung des Bildes auf grösseren Sehwinkel ohne entsprechende Steigerung des optischen Vermögens, namentlich bei an sich schon hohen und lichtschwachen Vergrößerungen, der Deutlichkeit der Wahrnehmung bald viel mehr schaden als nützen muss.

Es ist hieraus zu entnehmen, wie gegenstandslos alle Bemühungen sind, welche darauf ausgehen, die Vergrößerung des Mikroskops durch besondere Construction des Ocularapparats ins Ungemessene zu steigern. Was aber die Hoffnung anlangt, durch Verkürzung der Brennweiten der Objective die Leistungsfähigkeit des Instruments mit der Zeit immer weiter erhöht zu sehen, so tritt dieser — von mehreren sonstigen Bedenken abgesehen — ein Hinderniss entgegen, welches nach dem dermaligen Stand unseres

Wissens als ein absolutes hingestellt werden muss. Zu je höheren Vergrößerungen man nämlich fortgeht, desto mehr wird die aus den Aberrationsresten im Objectiv und aus seinen technischen Mängeln entspringende Unvollkommenheit des Bildes vergrößert durch den Effect der Diffraction, welche die Kleinheit der freien Oeffnung bei den starken Objectiven einführt. Diese Diffractionswirkung der Linsenöffnung¹⁾ verwandelt gleichfalls das Bild jedes Objectpunktes in einen Zerstreungskreis von grösserem oder geringerem Durchmesser; während aber die hieraus resultirende Verminderung des optischen Vermögens bei mässigen Vergrößerungen unmerklich bleibt gegenüber dem Effect der Aberrationsreste, fällt sie bei hohen Ziffern ausserordentlich in's Gewicht. Es lässt sich allgemein beweisen, dass der Einfluss dieser von der optischen Vollkommenheit ganz unabhängigen Fehlerquelle beim Mikroskop (wie auch beim Fernrohr) allein durch die Grösse des letzten Oeffnungsbildes im Augenpunkt des Oculars bedingt und zwar dieser Grösse umgekehrt proportional ist; er gestaltet sich in allen Stücken genau so, wie wenn das von ihm noch frei gedachte mikroskopische Bild durch ein körperliches Diaphragma, dessen lichter Durchmesser dem jenes Oeffnungsbildes gleich ist, betrachtet würde. Dieser Durchmesser aber hängt allein vom Oeffnungswinkel des Mikroskops und seiner Gesamtbrennweite, also seiner Gesamtvergrößerung, ab, und kann nach der unter (4) gegebenen Norm für jeden Fall berechnet werden. Diejenige Grösse des Oeffnungswinkels vorausgesetzt, die auch beim Immersionssystem nicht wesentlich überschritten werden kann, — 180° in Luft — findet man z. B. für 1000fache Vergrößerung 0,5 Mm., für 5000fache 0,1 Mm. u. s. f., unabhängig davon, wie diese Vergrößerungen durch Objectiv und Ocular hervorgebracht sein mögen. Und wenn man nun wissen will, welche Bedingungen von dieser Seite her z. B. einer 5000fachen Vergrößerung gestellt sind, so braucht man nur in ein Staniolblättchen einen Nadelstich von 0,1 Mm. Durchmesser zu machen und durch das so erhaltene Diaphragma hindurch einen gut begrenzten hellen Gegenstand, etwa eine Lichtflamme, anzusehen; man hat dabei unmittelbar vor Augen,

1) Sie ist wohl zu unterscheiden von den im folgenden Abschnitt zu besprechenden Diffractionerscheinungen, welche die Structur der Objecte hervorruft.

wie die Contouren eines mikroskopischen Objects unter jener Vergrößerung sich ausnehmen müssen, auch wenn das Mikroskop an sich, d. h. vom Beugungseffect abgesehen, absolut vollkommen wäre.

Die Erwägung dieser Umstände muss zu dem Ergebniss führen, dass eine erhebliche Steigerung des absoluten optischen Vermögens der Mikroskope über die heute mit Brennweiten von ca. 1 Mm. erreichbare Höhe hinaus auch in Zukunft nicht zu erwarten steht, weder von einer Verkürzung der Brennweiten noch von einer weitern Vervollkommnung der Constructionen. Wie es heute kein Mikroskop giebt, dessen nutzbare Vergrößerung — wenn man es mit diesem Attribut ernsthaft nimmt — auch nur 4000 erreichte, so wird es auch in Zukunft keines geben. Die Darlegungen in den letzten beiden Abschnitten aber werden zeigen, dass selbst Vergrößerungen weit unter der Hälfte dieser Ziffer, die sich mit Objectiven von 1 Mm. Brennweite als nutzbare recht gut erhalten lassen, thatsächlich schon nicht mehr verwerthbar sind, weil anderweitige, von der dioptrischen Vollkommenheit der Abbildung unabhängige Bedingungen für eine solche Verwerthung nicht mehr erfüllt werden können. Alles diess zusammengenommen begründet meinen Schluss: dass heut zu Tage die Vervollkommnung des Mikroskops überhaupt nicht mehr die Erlangung höherer förderlicher und höherer nutzbarer Vergrößerungen, also überhaupt nicht mehr die Steigerung des absoluten optischen Vermögens zum Ziele hat; dass vielmehr dieses ausschliesslich in die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der mittleren und mässig starken Objective zu setzen sei. — Es wird einen wirklichen, dem wissenschaftlichen Gebrauch des Mikroskops in hohem Grade nützlichen Fortschritt der optischen Kunst bezeichnen, wenn es gelingt, mit Objectiven von 3—4 Mm. Brennweite Dasjenige zu leisten, was gegenwärtig nur mit sehr viel stärkeren Linsen erreicht werden kann. Das liegt im Bereiche des Möglichen; andere Ziele gehen auf Luftschlösser aus.

10. In der angeführten ausführlicheren Darstellung meiner Untersuchungen werde ich neue und sehr exacte Methoden mittheilen, nach welchen die sämtlichen Bestimmungsstücke eines Mikroskops — die Brennweiten der einzelnen Bestandtheile, der Oeffnungswinkel, die Maasse für Objectiv- und Ocularwirkung etc. — empirisch ermittelt werden können; daneben aber werde ich auch ein Verfahren beschreiben, welches erlaubt, sämtliche durch die

Theorie nachweisbare Abbildungsfehler mit sehr einfachen Hilfsmitteln am fertigen Instrument zu beobachten und daraufhin den Grad seiner Vollkommenheit zu bestimmen. — Die gewöhnlich empfohlenen Methoden zur Prüfung der sphärischen und der chromatischen Correction der Objective sind den thatsächlichen Verhältnissen durchaus nicht gewachsen und weit davon entfernt, zu einer auch nur einigermaßen vollständigen Kenntniss jener Fehlerquellen an fertigen Instrumenten zu führen. Denn die durch jene Methoden sichtbar zu machenden Effecte der Abbildungsfehler sind nicht elementare Wirkungen, sondern Gesamteffecte aus vielen verschiedenartigen Ursachen. Bei dem sehr ungleichen Gewicht, welches den einzelnen unter ihnen, nach ihrem Einfluss beim wirklichen Gebrauch des Mikroskops, zukommt, muss das Urtheil nach dem Totaleffect unter Umständen völlig fehlgreifen. Die zutreffende Würdigung eines Objectivs in Bezug auf seine Vollkommenheit und Leistungsfähigkeit kann vielmehr — wenn sie überhaupt auf den Befund über die Abbildungsfehler gegründet werden soll — nur durch die Zerlegung der sichtbaren Abweichungen in ihre Bestandtheile und den Nachweis der sämtlichen wirksamen Fehlerquellen im Einzelnen gewonnen werden.

Da die Beschreibung der Prüfungsmethode, welche dieses leistet, nicht vollständig gegeben werden kann ohne eine specielle Discussion der sämtlichen Abbildungsfehler und genaue Angaben über ihre Erscheinungsformen, so sei hier nur das Princip des Verfahrens im Allgemeinen bezeichnet. — Als Object dient dabei ein Präparat, welches nichts anderes als scharfe Grenzen zwischen vollkommen durchsichtigen und ganz oder fast ganz undurchsichtigen Theilen innerhalb einer einzigen Ebene darbietet und keinerlei merkliche Ablenkungen an den hindurchtretenden Strahlen hervorbringt. Man erhält ein solches in einer für alle Zwecke ausreichenden Vollkommenheit, indem man (mittelst der Theilmaschine) gröbere und feinere Liniengruppen in eine Silber- oder Goldschicht einritzet, wie man solche in einer Dicke, die nur einen kleinen Bruchtheil des Mikromm. ausmacht, nach bekannten Methoden auf Glas niederschlagen kann; Deckgläser von verschiedener, genau gemessener Stärke, auf ihren untern Flächen mit solchen Theilungen (10—50 Linien pro Mm.) versehen, werden nebeneinander mit Balsam auf einen Objectträger gekittet. Ein Präparat dieser Art dient für die stärksten wie für die schwächsten Objective. Zu seinem Gebrauch gehört der Beleuchtungsapparat, welcher in dem folgenden Aufsätze dieses

Heftes beschrieben ist, oder irgend eine Vorrichtung, die gestattet, das Präparat von mehreren lichtstrahlenden Flächen aus gleichzeitig zu beleuchten und den Verlauf der Strahlenbüschel, welche diese liefern, innerhalb des Oeffnungswinkels eines zu prüfenden Objectivs beliebig zu reguliren. Mit dem erwähnten Beleuchtungsapparat wird dieser Zweck auf das einfachste erreicht, indem man Diaphragmen mit mehreren getrennten Oeffnungen — aus Cartonpapier zugeschnitten — neben den gewöhnlichen Blendungen verwendet; unter Controle des Oeffnungsbildes in der oberen Focalebene des Objectivs kann man durch Blendungen mit passenden Ausschnitten bei Benutzung der Vorrichtungen zur Veränderung des Lichteinfalls ganz beliebige Theile des Oeffnungswinkels gleichzeitig in Thätigkeit setzen.

Das Verfahren der Prüfung zielt darauf ab, das Zusammenwirken der sämtlichen Zonen der Objectivöffnung in der Mitte und am Rand des Schfeldes zur Anschauung zu bringen und dabei dennoch die Bilder, welche sie einzeln gewähren, deutlich unterscheidbar zu erhalten. Zu dem Zweck wird die Beleuchtung so regulirt, dass in den Spuren der eintretenden Strahlenkegel in der oberen Focalebene alle Zonen der freien Oeffnung, jede aber nur durch einen schmalen Streifen, repräsentirt sind, während diese Spuren selbst möglichst weit von einander abstehen. Je nach der Grösse des Oeffnungswinkels werden zwei oder drei isolirte Strahlenbüschel verwandt. Sie werden so angeordnet, dass, wenn z. B. die Oeffnungsfläche des Objectivs 6 Mm. linearen Durchmesser besitzt, im ersteren Falle die — nahezu kreisförmige — Spur des einen von der Mitte bis auf ca. 1,5 Mm. Abstand, die des andern auf der entgegengesetzten Seite von der Axe von 1,5 bis auf 3 Mm., d. h. bis zum Rand, sich erstreckt; im zweiten Falle aber der erste die Zone von der Axe aus bis zu 1 Mm. Abstand, der zweite die Zone zwischen 1 Mm. und 2 Mm. auf der entgegengesetzten Seite und der dritte die Randzone zwischen 2 und 3 Mm., wieder auf der Seite des ersten, in Thätigkeit setzt. Diese Anordnung giebt den empfindlichen Strahlengang, bei welchem alle Correctionsmängel am stärksten zur Geltung kommen, weil die verschiedenen Strahlenkegel im Bilde unter möglichst grossen Winkeln zusammentreffen. — So viel isolirte Theile der Oeffnungsfläche wirksam werden, so viel unterscheidbare Bilder erhält man von einer das Gesichtsfeld ausfüllenden Liniengruppe des Präparats. Bei einem in allen Stücken

absolut vollkommenen Objectiv müssten alle diese bei einer bestimmten Einstellung in ein einziges scharfes und farbenfreies Bild zusammenfliessen. Die Abbildungsfehler, soweit sie von der Art der sphärischen Aberration sind, haben aber zur Folge, dass eine derartige vollständige Verschmelzung der zwei oder drei partiellen Bilder wenigstens nicht durch das ganze Sehfeld zu Stande kommt und, soweit sie von der Farbenzerstreuung herrühren, dass die hellen Linien auf dunklem Grunde, sowohl die getrennten Bilder je einer wie auch die correspondirenden Bilder von mehreren an andern Stellen des Gesichtsfeldes die verschiedensten Farbensäume erhalten. Ein derartiges Probestück legt den ganzen Correctionszustand eines Mikroskops in allen Einzelheiten gleichzeitig vor Augen. Mittelst der Anleitung, welche die Theorie zur Diagnose der verschiedenen Abbildungsfehler giebt, genügt die Vergleichung der Farbensäume der einzelnen partiellen Bilder, die Beobachtung ihres lateralen Auseinandertretens und ihrer Niveaudifferenzen, in der Mitte des Sehfeldes und in den vier Quadranten der Randzone, alle Correctionsmängel in ihren letzten Bestandtheilen nach Art und Grösse genau zu definiren. Dabei erhält man namentlich Dasjenige, was von den eigentlichen Aberrationen — den Fehlern der Focalwirkung — herrührt, deutlich getrennt von solchen Unvollkommenheiten, welche aus blossen Differenzen der Vergrößerung zwischen ungleich geneigten und ungleich brechbaren Strahlen — den Anomalien — entspringen und kann ausserdem durch eine einfache Manipulation den Einfluss des Oculars auf die Beschaffenheit des Bildes ausserhalb der Axe vollständig eliminiren¹⁾.

Die erforderliche theoretische Orientirung und praktische Erfahrung vorausgesetzt, um den Befund bei einer derartigen Prüfung in allen Punkten richtig würdigen zu können, gewährt das ange-deutete Verfahren ein so erschöpfendes Urtheil über die Beschaffenheit eines Objectivs, dass darauf hin, wenn Brennweite und Oeffnungswinkel nebenbei ermittelt werden, seine Leistungsfähigkeit nach

1) Beispielsweise sei erwähnt, dass diese Methode, in Uebereinstimmung mit der Theorie, in der Farbenabweichung, welche bei grossem Oeffnungswinkel an jeder Stelle des Sehfeldes ausserhalb der Axe wirksam wird, nicht weniger als fünf verschiedenartige Bestandtheile erkennen lässt, die wegen ihrer sehr ungleichen praktischen Bedeutung bei der Beurtheilung eines Mikroskops genau unterschieden werden müssen.

allen Richtungen hin voraus zu bestimmen ist; wie ich mich durch zahlreiche Proben überzeugt habe. Für die gewöhnlichen Bedürfnisse der Mikroskopiker wird zwar die directere Prüfung mittelst natürlicher Probeobjecte stets den Vorzug behalten; immerhin dürfte die gelegentliche Anwendung dieser andern Methode nützliche Anhaltspunkte liefern, um die Ansprüche, welche man zur Zeit an die Beschaffenheit der Mikroskope stellen und nicht stellen darf, richtig bemessen zu lernen. Wer einmal gute und im praktischen Gebrauch bewährte Objective auf diese Weise untersucht hat, wird ebensowohl gegen all zu naive Vorstellungen über ihre Vollkommenheit wie auch dagegen gesichert sein, Ansprüche zu erheben, welchen bis jetzt noch Niemand genügt hat.

II. Schliesslich soll noch in der Kürze derjenigen Sätze gedacht werden, welche die Wirkungsart der Beleuchtungsapparate und die für die Lichtstärke des Mikroskops maassgebenden Verhältnisse feststellen. In Bezug auf das Erstere trifft meine Betrachtungsweise nach ihren Ausgangspunkten und in ihren wesentlichen Resultaten mit denjenigen Lehren zusammen, durch welche Nägeli und Schwendener¹⁾ die Theorie der Beleuchtungsapparate, die seit Brewster und Wollaston die partie honteuse der mikrophischen Doctrin gewesen ist, zuerst auf sichere und deutliche Begriffe gebracht haben. Die Hauptsache besteht in Folgendem.

Die Beleuchtung der mikroskopischen Objecte bei der Beobachtung in durchfallendem Lichte erfolgt, was auch der Beleuchtungsapparat sein mag — Planspiegel, Hohlspiegel, Sammellinse, Condensator — stets von einer begrenzten Fläche aus, welche, indem ihre Theile Strahlen einer primären Lichtquelle durch Spiegelung oder Brechung auf das Präparat leiten, diesem gegenüber wie selbstleuchtend sich verhält, und zwar — abgesehen von den Lichtverlusten durch Spiegelung und Brechung — selbstleuchtend mit der wirklichen Leuchtkraft der primären Lichtquelle. Die Grösse und die Lage dieser wirksamen Lichtfläche (der Fläche des Hohlspiegels z. B.) bestimmt für jeden Punkt des Präparats einen kegelförmigen Raum, dessen Fortsetzung nach dem Mikroskop hin den Strahlenkegel ergibt, der von jeder durchsichtigen Stelle des Objects aus divergirend in das Objectiv eintritt, soweit derselbe innerhalb des Winkelraums der freien Oeffnung fällt und soweit er

1) Das Mikroskop. Leipzig 1867. pag. 85 ff.

nicht durch irgend welche Ablenkungen im Präparat ganz oder theilweise in andere Richtungen gelenkt wird. Die Spur dieses Strahlenkegels und der etwa aus ihm abgelenkten Strahlen erscheint als Bild der lichtgebenden Fläche (z. B. des Spiegels) in der obern Focalebene des Objectivs wie auch im Augenpunkt des Oculars, und kann daselbst direct beobachtet werden; wobei u. A. der illusorische Charakter der angenommenen Unterschiede von convergirender, divergirender und parallelstrahliger Beleuchtung sinnenfällig hervortritt. — Kein noch so künstlicher Beleuchtungsapparat (Condensor) giebt jemals eine intensivere Beleuchtung als die primäre Lichtquelle unmittelbar geben könnte, wenn man sie dem Objecte hinreichend nahe bringen würde. Kein solcher Apparat kann also einen andern Zweck wirklich erreichen, als den, mit Hilfe einer Lichtquelle von gegebener Lage und gegebener Ausdehnung eine beliebig gelegene und beliebig begrenzte mittelbar leuchtende Fläche von einer — bis auf die Lichtverluste — gleichen Leuchtkraft unter dem mikroskopischen Präparat herzustellen.

Als praktische Anwendung dieser Sätze ergibt sich eine Beleuchtungsvorrichtung, welche sich von anderweit bekannten Apparaten dieser Art — sogen. Condensoren — dadurch unterscheidet, dass sie nicht den Anspruch macht, Wirkungen erzielen zu wollen, die theoretisch unmöglich, desshalb sicher auch nur in der Einbildung vorhanden sind, und welche dafür diejenigen Vortheile, die ein complicirter Apparat gegenüber dem gewöhnlichen Beleuchtungsspiegel überhaupt darbieten kann, mit einfachen Mitteln wirklich in Geltung bringt. (S. den folgenden Aufsatz in diesem Heft).

12. Die auf die Lichtstärke des Mikroskops bezüglichen Fragen endlich finden ihre erschöpfende Antwort durch das folgende allgemein erweisbare Theorem:

Wenn von den Lichtverlusten durch Reflexion an den Linsen des Mikroskops abgesehen wird, ist die Helligkeit der vollkommen oder partiell durchsichtigen Theile eines Präparats im mikroskopischen Bilde genau diejenige, mit welcher sie beim directen Sehen erscheinen würden, wenn vor die Pupille des Auges ein Diaphragma gestellt wäre, dessen freie Oeffnung congruent ist dem Bilde der lichtgebenden Fläche (des Spiegels z. B.), so wie es im letzten Oeffnungsbild über dem Ocular des Mikroskops entworfen wird, — dabei das Präparat, in seiner

Flächenausdehnung beliebig vergrössert, gegen die primäre Lichtquelle als Hintergrund gesehen vorausgesetzt.

Als unmittelbare Folgerungen hieraus ergeben sich folgende Sätze:

Die Helligkeit des mikroskopischen Bildes kann unter keinen Umständen diejenige übersteigen, mit welcher das Object dem freien Auge erscheinen würde. Für jeden bestimmten Winkeldurchmesser des abbildenden Strahlenkegels, sei nun dieser durch die freie Oeffnung des Mikroskops oder durch den Umfang der lichtgebenden Fläche begrenzt, giebt es aber eine bestimmte Vergrößerungsziffer, unterhalb welcher die Helligkeit des Bildes der des direct gesehenen Objects stets gleich ist. Es ist diejenige Vergrößerung, bei welcher der Durchmesser des Bildes im Augenpunkt des Mikroskops dem der Pupille grade gleich wird.

So lange der Oeffnungswinkel des Objectivs kleiner ist als derjenige des zur Beleuchtung dienenden Strahlenkegels, wächst die Lichtstärke mit dem Oeffnungswinkel des ersteren und ist unabhängig von dem des letzteren; sobald aber — wie bei allen stärkeren Systemen der Fall — das Mikroskop einen grösseren Oeffnungswinkel hat als der vom Beleuchtungsapparat ausgehende Lichtkegel, vertauschen sich die Rollen beider.

Unter sonst gleichen Umständen hängt die Helligkeit der Bilder allein von der Vergrößerungsziffer ab, wofern das erwähnte Bild der lichtgebenden Fläche im Augenpunkt des Oculars kleiner als die Pupillenöffnung des Auges geworden ist; jene ist alsdann dem Quadrate der linearen Vergrößerung umgekehrt proportional. Im Besondern bleibt die Lichtstärke bei einer bestimmten Vergrößerung unabhängig davon, ob diese durch ein starkes Objectiv und ein schwaches Ocular, oder umgekehrt, erzielt ist — wie sich durch ein einfaches ganz stringentes Experiment auch empirisch darthun lässt. Ebenso sind alle Objective, deren Oeffnung den grössten möglicher Weise zur Verwendung kommenden Divergenzwinkel der einfallenden Strahlen (40—50 Grad) überschreitet, wie verschieden auch ihre sonstige Vollkommenheit sein mag, in Hinsicht auf die Lichtstärke (bis auf praktisch unmerkliche Differenzen in den Lichtverlusten) einander sämmtlich gleich, sobald sie unter gleicher Gesamtvergrößerung benutzt werden. — Die vermeintlichen Thatsachen, welche diesen letzteren Folgerungen entgegenzustehen scheinen, erklären sich daraus, dass alle Unterschiede in

der Schärfe und Deutlichkeit der Bilder unwillkürlich und unbewusst als Unterschiede der Helligkeit gedeutet werden.

III. Die physikalischen Bedingungen für die Abbildung feiner Strukturen.

13. Dass die Leistungen des Mikroskops nicht in allen Fällen von der geometrischen Vollkommenheit der Bilder allein abhängen, sondern, gewissen Classen von Objecten gegenüber, ausser durch jene noch durch die Grösse des Oeffnungswinkels bedingt seien, ist eine seit lange anerkannte Thatsache, deren Gewicht auch die Construction der Mikroskope in neuerer Zeit stark beeinflusst hat. Was aber die eigentliche Bedeutung dieser Thatsache sei, ist nichtsdestoweniger ebenso problematisch geblieben, wie das Wesen der besondern Capacität (Auflösungs- oder Unterscheidungsvermögen), welche man darauf hin dem Mikroskop hat beilegen müssen. Namentlich aber blieb fraglich, wie hoch der Nutzen dieses an den Oeffnungswinkel geknüpften Vermögens für den allgemeinen wissenschaftlichen Gebrauch des Instruments anzuschlagen sei und ob seine Tragweite überhaupt hinausreiche über gewisse specielle Vorkommnisse, bei welchen Schatteneffecte durch schiefe Beleuchtung vermuthet wurden. — Bei meinem Versuch, die Construction des Mikroskops auf die Theorie zu gründen, musste ich mir ganz besonders angelegen sein lassen, die Ansprüche festzusetzen, welche im Interesse der allgemeinen, normalen Leistungen an den Oeffnungswinkel der Mikroskope zu stellen sind, wenn ich nicht Gefahr laufen wollte, einer blossen Tradition folgend, meine Arbeit vielleicht auf Ziele von sehr problematischem Werth zu richten. Wie ich glaube, werden denn auch die einschlagenden Fragen durch die nachfolgenden Ergebnisse insoweit definitiv erledigt, als nicht durch diese Ergebnisse selbst neue Thatsachen in den Gesichtskreis treten, die ihrerseits wieder Probleme anderer Art anregen.

Da es vor Allem darauf ankommen musste, zum Thatbestand der vom Oeffnungswinkel abhängigen Wirkungen eine festere Position zu gewinnen, als die mikrographische Literatur geben konnte, habe ich zunächst durch Experimente die Frage zu beantworten gesucht: in welchen Fällen besteht ein Unterschied zu Gunsten des grösseren Oeffnungswinkels und in welchen Fällen besteht ein solcher nicht, wenn alle sonstigen Verschiedenheiten, welche die

Wirkung möglicherweise beeinflussen können, auf das Sorgfältigste eliminirt werden? Hierzu hat mir eine Reihe von Objectiven mit sehr verschiedener Brennweite und sehr verschiedener Oeffnung gedient, welche nach meiner Berechnung mit äusserster Accuratesse ausgeführt worden waren und welche, auf ihre Correctheit noch besonders geprüft, für die Vergleichbarkeit der Beobachtungen sichere Gewähr leisteten. Als Probeobjecte sind dabei benutzt worden: allerlei Schmetterlingsschuppen und Diatomeenschalen, gestreifte Muskelfasern, Diamanttheilungen auf Glas, Liniensysteme in verschwindend dünnen Silberschichten auf Glas, feinere und gröbere Pulver u. A., daneben aber auch die kleinen optischen Bildchen makroskopischer Objecte (Stabgitter, Drahtgeflecht), welche man durch Luftblasen oder — besser — durch ein auf den Tisch des Mikroskops gelegtes Objectiv von kurzer Brennweite erhalten kann.

14. Durch solche Versuche hat sich ergeben:

1) So lange die freie Oeffnung so gross bleibt, dass aus ihrer Diffractionswirkung keine merkliche Abnahme der Schärfe entspringt, tritt ein Unterschied in der fraglichen Richtung nicht hervor in Bezug auf die Abbildung der Contouren mikroskopischer Objecte, d. h. der Grenzen zwischen ungleich durchsichtigen Theilen im Gesichtsfeld, wofern diese Theile nicht unter ca. 0,01 Mm. herabgehen.

2) Dagegen besteht ein solcher Unterschied constant zu Gunsten des grösseren Oeffnungswinkels gegenüber allen Objecten, welche irgend ein Detail unter jener Grenze der Kleinheit zeigen, gleichgültig, ob dieses Detail durch Unebenheiten der Oberfläche oder durch blosse Unterschiede der Durchsichtigkeit in einer verschwindend dünnen Schicht hervorgerufen wird und gleichgültig, ob es die Form von Streifungen, Gitterzeichnungen, Körnungen etc. hat. Er tritt in gleichem Sinne auch an den erwähnten optischen Bildchen makroskopischer Gegenstände hervor.

3) Je kleinere lineare Dimensionen das betreffende Detail besitzt, desto grösser muss der Oeffnungswinkel des Objectivs sein, wenn jenes bei einer bestimmten Art der Beleuchtung, z. B. bei rein centraler oder bei möglichst schiefer, wahrgenommen werden soll, und zwar unabhängig von der grösseren oder geringeren Markirtheit der Zeichnung und unabhängig von der Brennweite und der förderlichen Vergrösserung

des Objectivs. Bei kleinem Oeffnungswinkel kann die Abbildung schon lange vor derjenigen Grenze der Kleinheit, die der förderlichen Vergrößerung entspricht, aufhören.

4) Wo das Detail an wirklichen Objecten in Form von Streifungen, Liniensystemen u. dergl. erscheint, erreicht ein und derselbe Oeffnungswinkel bei schiefem Lichteinfall constant merklich feineres Detail als bei centraler Beleuchtung und zwar ganz unabhängig davon, ob die Beschaffenheit der Objecte die Möglichkeit von Schatteneffecten zulässt oder vollständig ausschliesst.

5) Eine Structur der gedachten Art, welche ein bestimmtes Objectiv bei gerader Beleuchtung nicht wahrnehmbar macht, wird auch nicht wahrnehmbar, wenn man das Object unter beliebigem Winkel gegen die Axe des Mikroskops neigt, selbst wenn dasselbe, senkrecht zur Axe liegend, durch schiefes Licht vollkommen aufgelöst würde. Die Auflösung tritt aber sogleich ein, wenn gleichzeitig der einfallende Lichtkegel senkrecht gegen die Ebene des Objects gerichtet wird. Demnach hängt die Steigerung der Wirkung unter schiefer Beleuchtung ausschliesslich von der Neigung der Strahlen gegen die Mikroskopaxe, aber nicht von ihrem schiefen Einfall auf das Object ab.

Die hier angeführten Thatsachen bekunden auf der einen Seite die Realität eines von der sonstigen Vollkommenheit der Objective und von der Vergrößerungskraft unabhängigen, an den Oeffnungswinkel als solchen geknüpften specifischen Vermögens, und bestimmen dasselbe — in guter Uebereinstimmung mit dem Wortsinne der üblichen Benennung — als ein Vermögen zur Auflösung oder Unterscheidung des mikroskopischen Details; auf der andern Seite aber enthalten sie auch den unzweideutigen Hinweis darauf, dass die Abbildung sehr feiner körperlicher Structuren auf wesentlich andern Bedingungen als die Abbildung der Contouren gröberer Theile beruhen müsse. In allen Fällen, wo ein derartiges Auflösungsvermögen, d. h. ein directer Einfluss des Oeffnungswinkels, sei es positiv, sei es negativ, in Geltung tritt, kann die dioptrische Wiedervereinigung der von den Objectpunkten ausgehenden Strahlenbüschel in einer Bildfläche unbedingt nicht der zureichende Grund für die Abbildung des Objects sein, weil auf eine solche Voraussetzung hin die nachgewiesenen Unterschiede absolut unerklärbar bleiben würden. — Das Resultat dieser Vorarbeit hat daher die eigentliche Aufgabe

der Untersuchung dahin formuliren lassen: besondere Ursachen ausserhalb des Mikroskops, welche bei der Abbildung kleinen körperlichen Details mitwirken, nachzuweisen und sodann die Modalitäten ihres Eingreifens in den dioptrischen Vorgang im Einzelnen festzustellen.

Beide Forderungen haben sich sowohl auf theoretischem wie auch auf experimentellem Wege in einem für die nächsten Bedürfnisse ausreichenden Umfang erledigen lassen.

15. Die Undulationstheorie des Lichts weist in den Erscheinungen der Diffraction oder Beugung eine charakteristische Veränderung nach, welche körperliche Structuren, nach Maassgabe der Kleinheit ihrer Dimensionen, an den hindurchtretenden (eventuell auch an reflectirten) Lichtstrahlen hervorbringen. Sie besteht im Allgemeinen in einer Auflösung jedes einfallenden Lichtstrahls in je eine Strahlengruppe von grosser Winkelausbreitung mit periodisch wachsender und abnehmender Intensität innerhalb dieser. Für den besondern Fall von regelmässigen Schichtungen, Streifungen, Punktreihen u. dergl. liefert die mathematische Theorie eine vollständige Bestimmung der Erscheinung, die alsdann darin aufgeht, dass aus dem einfallenden und geradlinig fortgehenden Lichtstrahl nach entgegengesetzten Seiten hin eine Reihe isolirter Strahlen in regelmässigen Winkelabständen abgesondert (abgebeugt) wird; diese Winkelabstände sind aber für jede einzelne Farbe proportional ihrer Wellenlänge, nehmen also von Violett zu Roth stetig zu, und sind ausserdem umgekehrt proportional der Distanz der Theile in der wirksamen Structur. Wird daher ein mikroskopisches Präparat von der betrachteten Beschaffenheit durch einen Lichtkegel getroffen, wie ihn z. B. der Beleuchtungsspiegel des Mikroskops liefert, so tritt dieser nicht einfach nach seiner geradlinigen Fortsetzung in das Objectiv ein, sondern die Structur des Präparats scheidet aus dem directen Licht eine Anzahl abgelenkter Lichtkegel mit auseinandertretenden Farben aus, welche je nach der grösseren oder geringeren Feinheit der Structur grössere oder geringere Winkel mit der Richtung der ungebeugten Strahlen bilden. Derartige Objecte senden also Punkt für Punkt mehrere isolirte Lichtbündel zum Objectiv, deren Anzahl und Anordnung innerhalb eines bestimmten Winkelraums von der Lage der lichtgebenden Fläche (des Spiegels z. B.) und von der Structur des Präparats abhängt.

Diese theoretisch vorauszusagende und auch nach ihren Maass-

verhältnissen genau zu berechnende Wirkung kann mittelst der unter (4) erwähnten Oeffnungsbilder, welche die Abbildung der Objecte im Mikroskop begleiten, sehr einfach beobachtet werden. Man stellt ein Object der fraglichen Art mit dem Mikroskop ein, so dass das Detail sichtbar wird, entfernt sodann das Ocular und sieht entweder mit freiem Auge in den offenen Tubus herab oder stellt mit einem passend eingerichteten Hilfsmikroskop von sehr geringer (10—20maliger) Vergrößerung, welches an Stelle des Oculars in den Tubus eingesenkt wird, auf die obere Focalebene des Objectivs ein¹⁾. Man sieht alsdann das Bild des Spiegels (oder was sonst die lichtgebende Fläche sein mag), wie es von den ungebeugten Strahlen erzeugt wird, umgeben von einer grösseren oder kleineren Anzahl von Nebenbildern, in Form von unreinen Farbenspectren, deren Farbenfolge, vom Hauptbilde aus gerechnet, stets von Blau zu Roth geht.

Objecte mit mehreren sich kreuzenden Liniensystemen zeigen dabei nicht nur in der Richtung der Senkrechten zu jeder Gruppe je eine Reihe von Beugungsbildern, sondern — den Forderungen der Theorie entsprechend — ausserdem noch andere solche Reihen in den Winkeln zwischen jenen Senkrechten. — Schmetterlingsschuppen und Diatomeen zeigen diese Phänomene in der grössten Mannigfaltigkeit. Die gröberen unter ihnen gestatten die Beobachtung schon mit schwachen Systemen von geringem Oeffnungswinkel; die feineren — von Pleuros. ang. an — verlangen grosse Oeffnung, wenn auch nur die dem Hauptbilde des Spiegels nächstliegenden Beugungsbilder in die Oeffnungsfläche fallen sollen. Für deren Beobachtung ist ein schwaches Immersionsobjectiv am besten geeignet²⁾.

1) Der allgemeine Charakter dieser Beobachtungsweise ist dadurch gekennzeichnet, dass dabei das abbildende Mikroskopsystem als Objectiv eines Miniatur-Fernrohrs fungirt, indem es die vor ihm liegenden Gegenstände in seinem hintern (obern) Focus abbildet. Der Oeffnungswinkel des Mikroskops wird alsdann das angulare Gesichtsfeld dieses Fernrohrs. Die abbildenden Strahlen müssen dabei sämtlich das eingestellte Präparat passiren, daher denn alle Ablenkungen, welche dieses bewirkt, in dem kleinen Fernrohrbildchen sichtbare Nebenbilder der äussern leuchtenden Gegenstände, der Spiegelfläche z. B., herbeiführen. — Es versteht sich von selbst, dass diese Methode auch zum Studium der Structur solcher Präparate dienen kann, in welchen geformte Theile Ablenkungen durch Brechung des Lichts herbeiführen.

2) Auf einem ganz andern Wege sind die Beugungsphänomene bei den

16. Die hier angegebene Methode zur directen Beobachtung der Lichtstrahlung, die von mikroskopischen Objecten ausgeht, gestattet zugleich die experimentelle Entscheidung der Frage, welche Rolle das betrachtete Beugungsphänomen bei der Abbildung der betreffenden Structuren spielt. Die Antwort darauf hat sich ohne Weiteres ergeben, indem ich nach Einstellung der geeigneten Probeobjecte und passender Regulirung des einfallenden Lichts durch Diaphragmen dicht oberhalb des Objectivs, möglichst nahe seinem obern Focus, bald diesen bald jenen Theil der im Beugungsphänomen erscheinenden Strahlengruppe abblendete, um hierauf das mikroskopische Bild des Präparats, wie es von den nicht abgeblendeten Strahlen allein erzeugt wurde, mit dem gewöhnlichen Ocular in Augenschein zu nehmen. — Das Folgende enthält die unmittelbaren Ergebnisse derartiger Experimente; wobei ich nur bemerke, dass alle entscheidenden Versuche mit sehr correcten schwachen Objectiven — 30 bis 6 Mm. Brennweite — und den entsprechenden geringen Vergrößerungen ausgeführt sind, stärkere aber, besonders ein Immersionsobjectiv von 3 Mm., nur benutzt wurden, um die an gröberen Objecten schon gewonnenen Resultate an einigen feinen Diatomeen zu controliren. — Die Präparate für die entscheidenden Experimente waren allein Gebilde von genau bekannter Structur: verschiedene, durch fein zertheiltes Caput mortuum hergestellte Körnungen, in Glas geritzte Liniensysteme von 0,03 bis 0,002 Mm. Linienabstand und ähnliche Liniengruppen in Silberniederschlägen auf Glas, wobei die Silberschicht eine auch für das stärkste Mikroskop unwahrnehmbare Dicke besass; gekreuzte Liniengruppen ohne Niveaudifferenz wurden durch Uebereinander-

Diatomeen schon von Flögel (Botan. Zeit. 1869, Nr. 43—45) studirt und zur Bestimmung der Streifendistanz benutzt worden. Auch die hier angewandte Beobachtungsmethode kann für letzteren Zweck sehr gut dienen, da der unter (4) angeführte theoretische Satz es möglich macht, aus dem gemessenen linearen Abstand der Beugungsspectra im Oeffnungsbild, unabhängig von der Richtung des Lichteinfalls, die Streifendistanz zu berechnen, wenn man die Brennweite des Objectivs kennt. Es genügt dazu ein Ocularmikrometer in dem Mikroskop, mit welchem man das Oeffnungsbild beobachtet. Wenn man zur Beleuchtung eine schmale Lichtfläche unter dem Präparat und recht intensives Licht verwendet, kann man die Spectra so scharf erhalten, dass bei sehr regelmässigen Streifungen — wie z. B. auf Fleur. ang. — sogar einige Fraunhofer'sche Linien sichtbar werden.

legen von zwei einfachen Theilungen, die eine an der untern Fläche des Deckglases, hergestellt. — Die so gewonnenen Thatsachen sind:

1) Wenn alles durch die Beugung aus den einfallenden Strahlen ausgesonderte Licht vollständig abgeblendet wird, so dass allein der übrig bleibende ungebeugte Strahlenbüschel die Abbildung des Präparats vermittelt, so hat diess auf die Schärfe der Contouren zwischen ungleich durchsichtigen Stellen des Sehfeldes keinen Einfluss, so lange das Diaphragma gross genug bleibt, um nicht durch seine Diffractionswirkung eine sichtbare Depression der förderlichen Vergrösserung herbeizuführen. Auch wird dadurch die deutliche Wahrnehmung getrennter Theile nicht in merklichem Grade behindert, wenn deren nicht mehr als 30—50 auf den Millim. kommen ¹⁾. Je weiter aber diese Zahl überschritten wird, desto mehr verschimmt das Detail, so dass schon bei ca. 100 pro Mm. nur eine gleichförmige Fläche sichtbar bleibt, welche Vergrösserung auch angewandt wird, und zwar ebenso bei gerader wie bei beliebig schiefer Beleuchtung. Schon zwei Theile, z. B. zwei Diamantstriche oder zwei Linien in einer Silberschicht, werden unter den bezeichneten Verhältnissen ununterscheidbar und erscheinen als ein breiterer Strich mit scharfen Contouren. Mit dem stärksten Immersionsobjectiv ist von der Zeichnung auf Pleur. ang. nicht das geringste zu erkennen; und die groben Längsstreifen auf Hipparchia Jan. bleiben selbst bei 200facher Vergrösserung unwahrnehmbar. — Bei Körnungen und anderem unregelmässigen Detail lässt sich das gebeugte Licht von dem ungebeugten nicht vollständig sondern. Dem entsprechend tritt bei möglichster Abblendung zwar kein absolutes Verschwinden aller Theile, aber doch eine so grosse Undeutlichkeit des Bildes ein, dass der feinere Inhalt des Präparats in gleichmässiges Grau übergeht.

2) Wenn alle Strahlen abgeblendet werden bis auf einen durch Beugung erzeugten Büschel, so liefert dieser ein mehr oder minder lichtstarkes positives Bild von den die Beugung bewirkenden Theilen des Objects in dunklem Felde, aber gleichfalls ohne alles Detail. (Theilungen erscheinen als gleichmässig helle Flächenstreifen auf schwarzem Grunde.)

1) Diese Grenzbestimmung ist desshalb unsicher, weil bei geringer Ablenkung der gebeugten Strahlen nur durch sehr enge Diaphragmen die vollständige Abblendung zu erreichen ist.

3) Wenn dagegen mindestens zwei getrennte Lichtbüschel in das Mikroskop eingelassen werden, so zeigt das Bild stets ein scharf markirtes Detail, sei es in Form eines oder mehrerer Liniensysteme oder in Form isolirter Felder. Dabei ist es gleichgiltig, ob unter den eintretenden Strahlenkegeln das ungebeugte Licht enthalten ist oder nicht, d. h. ob das Bild in hellem oder in dunklem Gesichtsfeld erscheint. Andere Lichtbüschel in Wirksamkeit gesetzt, entsteht aber immer anderes Detail — verschieden, entweder nach dem Grade der Feinheit oder nach der Art der Zeichnung —; und dieses Detail braucht weder dem Inhalte des mikroskopischen Bildes bei normaler Beleuchtung noch auch der anderweit bekannten wirklichen Structur des Objects conform zu sein. Einige nähere Bestimmungen in Betreff des letzten Punktes enthalten die beiden folgenden Sätze.

4) Ein einfaches Streifensystem wird zwar stets auch als solches abgebildet, wenn zwei oder mehrere Lichtbüschel zur Wirkung gelangen, aber in doppelter, dreifacher . . . Feinheit, sobald unter jenen nicht zwei consecutive Büschel enthalten sind, sondern ein, zwei, . . . zwischenliegende übersprungen werden; eine Gruppe von nur zwei Linien im Object z. B. erscheint dabei als aus drei, vier . . . getrennten Strichen zusammengesetzt. Die so erzeugten Scheinbilder sind aber in Hinsicht auf ihre Schärfe und die Constanz ihres Auftretens bei keiner Vergrößerung von dem normalen Bilde einer wirklich doppelt, dreifach, . . . so feinen Streifung gleicher Art zu unterscheiden, wie sich durch ein eclatantes Experiment, bei welchem eine solche verdoppelte Theilung unmittelbar neben dem Bilde einer wirklich doppelt so feinen im Gesichtsfeld erscheint, darthun lässt.

5) Wenn zwei einfache Gitter in demselben Niveau unter beliebigem Winkel sich kreuzen, so kann man nicht nur durch geeignete Regulirung des Lichtzutritts nach Belieben beide Liniensysteme einzeln oder gleichzeitig sichtbar machen, sondern man kann auch durch andere Formen der Abblendung in gleicher Schärfe und Markirtheit zahlreiche neue Liniensysteme, welche als solche im Object gar nicht vorhanden sind, und mannigfach geformte Felder, zur Erscheinung bringen. Die neu auftretenden Liniengruppen entsprechen dabei, nach ihrer Lage und der Liniendistanz in

ihnen, stets den möglichen Formen, nach welchen sich die Kreuzungspunkte der wirklichen Striche im Object in äquidistante Reihen ordnen lassen.

So zeigt u. A. ein Kreuzgitter mit senkrechter Kreuzung zwei secundäre Streifungen in den Richtungen der Diagonalen, deren Linienabstand zur Distanz der wirklichen Striche sich wie $1 : \sqrt{2}$ verhält; aber auch noch vier (zarter gezeichnete) im Verhältniss von $1 : \sqrt{5}$ engere Gruppen, welche je um ca. 27° zu einer Gitterrichtung geneigt sind. Bei einer Kreuzung unter 60° tritt, abgesehen von anderen feineren Liniensystemen, in gleicher Stärke mit den im Object wirklich vorhandenen ein drittes System mit demselben Linienabstand auf, um 60° Grad gegen die andern geneigt, und man erblickt, wenn alle drei gleichzeitig erzeugt werden, statt der rhombischen Felder vollkommen scharf begrenzte Sechsecke, ganz von der Art wie auf Pleur. ang. zu sehen sind. — Ich füge hinzu, dass alle hier namhaft gemachten, der Structur der bekannten Objecte nicht conformen Erscheinungen stets bei derselben Einstellung, welche auch das normale Bild scharf hervortreten lässt, beobachtet werden und dass sie bei den verschiedensten Combinationen von Objectiven und Ocularen, wenn die Beleuchtung in derselben Weise regulirt wird, mit derselben Constanz eintreten. Der Einfluss der Diffraction, welche die Diaphragmen über dem Objectiv ausüben, ist durch directe Controlversuche eliminirt worden.

Weiteres Detail über diese Phänomene kann nicht gegeben werden ohne genaueres Eingehen auf die theoretischen Gesetze der Diffraction. Aus dem gleichen Grunde unterlasse ich hier, auch den Zusammenhang zwischen den eben angeführten Thatsachen und dem unter (14) erwähnten Verhalten kleiner optischer Bildchen nachzuweisen. Dagegen sei noch das Folgende hervorgehoben:

6) Die in den beschriebenen Experimenten benutzte Manipulation, das partielle Abblenden der vom Object ausgehenden Lichtstrahlung, kommt unter den gewöhnlichen Verhältnissen bei der Beobachtung aller feineren mikroskopischen Gebilde unbeabsichtigt aber auch unvermeidlicher Weise zur Anwendung. Denn sobald das Detail eines Objects in seinen linearen Dimensionen auf kleine Vielfache von der Wellenlänge des Lichts ¹⁾ herabgeht, kann — wie

1) Die Wellenlänge des Roth ist $= 0,76\mu$; des dunkeln Blau $= 0,43\mu$. Zur Vergleichung sei der Streifenabstand auf einigen bekannten Probeobjecten

die Rechnung und die Beobachtung zeigt — auch ein sehr grosser Oeffnungswinkel des Objectivs nie mehr als einen kleinen Theil der ganzen durch die Beugung erzeugten Strahlengruppe gleichzeitig aufnehmen. Dieser Theil aber wird immer ein anderer, sowohl wenn bei gleich bleibender Beleuchtungsrichtung der Oeffnungswinkel grösser oder kleiner wird, wie auch wenn bei constantem Oeffnungswinkel die Beleuchtung wechselt. Hierauf kommen alle — mir bekannten — Modificationen zurück, welche die Bilder feiner Structuren unter anderem Oeffnungswinkel und unter anderem Lichteinfall bei aberrationsfreien Objectiven zeigen. Die constante Steigerung des Auflösungsvermögens durch schiefe Beleuchtung namentlich, also sowohl das Sichtbarwerden von neuem Detail, wie auch das markirtere Hervortreten des bei centralem Licht schon erkennbaren, ist in allen Fällen allein dadurch bedingt, dass bei schiefem Lichteinfall Beugungsbüschel in die freie Oeffnung hereintreten, die wegen ihrer starken Ablenkung sonst ausserhalb derselben bleiben, oder dass Beugungsbüschel, die bei centraler Beleuchtung nur unvollkommen aufgenommen werden, jetzt voll in das Mikroskop eintreten und, unter gleichzeitiger Abschwächung der ungebeugten Strahlen, mit grösserer Intensität zur Wirkung gelangen. — Abgesehen hiervon aber kommen bei der gewöhnlichen Beobachtungsweise auch solche Abblendungsformen vor, welche die Bedingungen für die unter (5) aufgeführten Wirkungen enthalten. In Folge dessen können an allen Objecten, welche überhaupt zwei einigermaassen gleichartige Streifungen darbieten, durch blosse Veränderung des Lichteinfalls deren noch mehrere in andern Richtungen sichtbar gemacht werden, wofern der Oeffnungswinkel des angewandten Objectivs zur Feinheit der Streifung ein passendes Verhältniss hat — wie u. A. an mehreren Diatomeen deutlich hervortritt. Selbst Abblendungen von solcher Wirkung wie in den Experimenten unter (4) können vielfach unbeabsichtigter Weise eintreten; es erklärt sich daraus z. B. das Auftreten feiner Längslinien zwischen den groben Längsstreifen auf Hipp. Jan., wie starke Objective unter gewissen Spiegelstellungen solche sichtbar machen.

17. Die hier aufgeführten Thatsachen scheinen mir hinreichend, um theils unmittelbar, theils in Verbindung mit unanfechtbaren

hier angeführt: Längsstreifen auf Hipp. Jan. 2μ , Querstreifen $0,7\mu$; Pleuros. ang. $0,48\mu$; Surirella Gemma $0,3\mu$; Frustulia Saxonica $0,25\mu$.

Lehrsätzen der Undulationstheorie, eine Reihe wichtiger Schlussfolgerungen, welche sowohl die mikroskopische Wahrnehmung als solche, wie auch die Einrichtung und den Gebrauch des Mikroskops berühren, sicher zu begründen. — Zunächst die Consequenzen in der ersten Richtung:

Solche Theile der mikroskopischen Präparate, welche entweder durch ihre Isolirtheit (einzelne Fäden, Körnchen u. dergl.) oder durch ihre, relativ zu den Lichtwellen, beträchtliche Grösse, selbst keine Beugung von merklichem Betrage herbeiführen, bilden sich im Mikroskop nach den gewöhnlichen dioptrischen Gesetzen der Strahlenconcentration ab. Die Abbildung geschieht dabei rein negativ, nämlich allein durch den ungleichen Lichtausfall, den in homogenen Massen partielle Absorption (z. B. Färbung) oder theilweise Ablenkung der Strahlen durch Brechung, in Theilen mit innerer Structur aber die durch diese bedingte Beugung hervorbringt. Das so erzeugte Absorptionsbild ist dem Object selbst unbedingt ähnlich und lässt bei richtiger stereometrischer Deutung des flächenhaft Gesehenen einen vollkommen sichern Rückschluss auf die — morphologische — Zusammensetzung desselben zu.

Alle feinere Structur hingegen, deren Elemente klein und nahe genug sind, um durch ihr Nebeneinandersein ein merkliches Beugungsphänomen hervorzurufen, wird nicht *more geometrico* abgebildet, d. h. nicht so, als ob die vom Object ausgehenden homofocalen Strahlenbüschel, indem sie nach vielerlei Veränderungen schliesslich wieder homofocale Büschel mit reellen oder virtuellen Vereinigungscentren werden, jenes Punkt für Punkt auf einer Bildfläche copirten. Denn wenn auch alle dioptrischen Bedingungen hierzu vollständig erfüllt sind, enthält doch das Bild Nichts von solchen Elementen, wofern nicht mindestens zwei der Theilstrahlen, welche durch die Zerlegung des Lichts entstehen, wieder vereinigt werden.

Für Jeden, der sich die Voraussetzungen deutlich macht, auf denen die gewohnte Annahme der Aehnlichkeit zwischen einem Objecte und seinem optischen Bilde beruht, muss das Gesagte zu dem Schlusse ausreichen: dass unter den nachgewiesenen Umständen eine solche Annahme eine vollkommen willkürliche Hypothese wird. Als positive Instanz steht ihr aber die Folgerung entgegen, zu welcher die unter 4) und 5) angeführten Versuche, bei genauerer

Discussion ihrer Resultate, führen: dass verschiedene Structuren stets das nämliche mikroskopische Bild liefern, sobald die Verschiedenheit des an sie geknüpften Beugungseffectes für das Mikroskop künstlich beseitigt wird; und dass gleiche Structuren stets verschiedene Bilder liefern, wenn der Beugungseffect, in dem für das Mikroskop wirksam werdenden Theil, künstlich ungleich wird. Damit ist aber gesagt, dass die unter Mitwirkung des Beugungsvorgangs entstandenen Structurbilder in keinem constanten Zusammenhang mit der wirklichen Beschaffenheit der sie veranlassenden Objecte, vielmehr blos in constantem Zusammenhang mit dem die Abbildung vermittelnden Diffractionsphänomen stehen.

Es ist hier nicht der Ort, auf die physikalische Erklärung dieser Erscheinungen näher einzugehen. Doch sei angeführt, dass die hier aus den unmittelbar beobachteten Thatsachen gezogenen Schlüsse in der Undulationstheorie des Lichtes ihre vollständige Rechtfertigung finden. Nicht nur lässt sich nach deren Grundsätzen davon Rechenschaft geben, warum mikroskopisches Structurdetail nicht nach dioptrischen Regeln abgebildet wird, sondern es lässt sich auch genau nachweisen, wie die anderweitige Art von Abbildung, welche die Beugungsbüschel hervorrufen, zu Stande kommt. Man kann zeigen, dass die in der obern Focalebene des Objectivs auftretenden Bilder der lichtgebenden Fläche — das directe Bild und die durch Beugung entstandenen Nebenbilder — in correspondirenden Stellen je gleiche Schwingungsphasen repräsentiren müssen, wenn man jede einzelne Farbe für sich betrachtet. Diese Oeffnungsbilder verhalten sich demnach ganz ebenso, wie z. B. die beiden Spiegelbilder einer Lichtflamme beim Fresnel'schen Interferenzversuch; das Zusammentreffen der von ihnen ausgehenden Strahlen muss in Folge der eintretenden Interferenzen einen periodischen Wechsel von Licht und Dunkelheit herbeiführen, dessen Form- und Maassverhältnisse von der Zahl, der Anordnung und dem gegenseitigen Abstand der interferirenden Lichtflächen abhängen. Die im Gesichtsfeld des Mikroskops erscheinende Structurzeichnung ist in allen ihren Merkmalen, sowohl in denjenigen, die der Beschaffenheit des Objects möglicher Weise conform, wie auch in denjenigen, die ihr nicht conform sind, nichts Anderes als das Resultat des Interferenzvorgangs beim

Zusammentreffen der sämtlichen wirksamen Strahlenbüschel.

Der unter (4) erwähnte Satz über den Zusammenhang zwischen den linearen Abständen im Oeffnungsbild und den Richtungs-differenzen der eintretenden Strahlen, in Verbindung mit der in (6) gelehrtten schematischen Zerlegung des Mikroskops, gewährt die ausreichende Grundlage zur vollständigen Durchführung dieser Folgerung. Es lässt sich daraus ableiten, dass bei einem achromatischen Objective die Interferenzbilder für alle Farben coincidiren, also — zum Unterschied von allen sonst bekannten Interferenzphänomenen — eine achromatische Gesamtwirkung ergeben müssen; ferner, dass die Maassverhältnisse der so erzeugten Bilder von denen der wirklichen Structur stets so abhängen, wie die lineare Vergrößerung des Mikroskops für dioptrische Bilder es mit sich bringen würde, und zwar bei jeder Einrichtung des optischen Systems und (von möglichen Verschiedenheiten des Beugungseffectes abgesehen) bei jeder Art der Beleuchtung; u. A. m. Nicht nur finden daraufhin alle Thatsachen der Beobachtung, wie sie unter (16) angeführt sind, ihre genügende Erklärung; es lässt sich auch das Structurbild, welches irgend ein beliebiges Object bei einer bestimmten Beleuchtung zeigen wird, in allen Einzelheiten vorausberechnen, wenn man nur das zur Wirkung kommende Beugungsphänomen nach Zahl, Anordnung und Lichtstärke der sämtlichen Beugungsspectra gegeben erhält.

18. Das Endresultat dieser Betrachtung stellt sich demnach dahin:

Alle diejenigen Erscheinungen im mikroskopischen Bild, welche nicht schon mit dem blossen Absorptionsbilde gegeben sind, sondern der Mitwirkung der durch Beugung entstandenen Strahlengruppen bedürfen, d. h. alle Anzeigen von Structurdetail, liefern im Allgemeinen keine der wirklichen Beschaffenheit der Objecte conforme, d. h. geometrisch ähnliche, Abbildung. Wie constant, markirt und scheinbar körperlich derartige Anzeigen (Streifensysteme, Felderzeichnungen u. dergl.) im Mikroskop auch auftreten mögen, so dürfen sie doch nicht morphologisch, d. h. als Bilder körperlicher Formen, sondern nur physikalisch, d. h. als Merkmale — nicht als Abbilder — gewisser materieller Verschiedenheiten in oder an den betreffenden Theilen gedeutet werden; und zwar kann aus dem mikroskopischen Befund mit Sicherheit auf

Nichts weiter geschlossen werden, als auf das Vorhandensein solcher Structurbedingungen, als zur Erzeugung des die Abbildung vermittelnden Beugungsphänomens nothwendig und hinreichend sind.

Je kleiner die linearen Maasse einer Structur werden, eine desto geringere Anzahl von Beugungsbüscheln kann auch beim grössten Oeffnungswinkel effectiv werden; desto weniger kann die Intensitätsabstufung in der Reihe dieser Büschel solche Verschiedenheiten, die innerhalb derselben Maassverhältnisse noch möglich sind, zum Ausdruck bringen; desto weniger bestimmt wird Dasjenige, was von der wirklichen Structur aus dem Bilde (oder auch aus dem sichtbaren Beugungsphänomen) rückwärts erschlossen werden kann.

Von diesem Standpunkte aus erscheinen u. A. alle Versuche, den Bau der feineren Diatomeenschalen durch morphologische Deutung ihrer mikroskopischen Bilder festzustellen, als auf unzulässige Prämissen gegründet. Ob z. B. *Pleur. angulatum* zwei oder drei Streifensysteme besitze; ob überhaupt wirkliche Streifung vorliege, oder ob die sichtbaren Zeichnungen von isolirten Erhöhungen, oder von isolirten Vertiefungen herrühren u. dergl., darüber kann kein noch so vollkommenes Mikroskop und keine noch so hohe Vergrößerung Aufschluss geben. Was sich behaupten lässt ist allein das Dasein der optisch nothwendigen Bedingungen für den die Abbildung begleitenden Beugungseffect. Soweit dieser aber irgend einem Mikroskop jemals zugänglich sein kann — sechs symmetrisch liegende Spectra, bei normalem Lichteinfall um ca. 65° (für Blau) gegen die Richtung der ungebeugten Strahlen abgelenkt — kann er von jeder beliebigen Structur herrühren, welche optisch heterogene Elemente (in Innern oder an der Oberfläche) in irgend einer Art nach einem System gleichseitiger Dreiecke von $0,48\mu$ Höhe geordnet enthält. Was diese Elemente sein mögen, geformte Theile oder rein moleculare Texturdifferenzen (Verdichtungscentra), immer werden sie die bekannten sichtbaren Zeichnungen ergeben. Es fällt jeder Grund fort, die fraglichen Structurelemente als gestaltet (als Erhöhungen oder Vertiefungen) voranzusetzen, nach dem erwiesen ist, dass weder das Sichtbarwerden der betreffenden Zeichnung überhaupt noch ihr stärkeres Hervortreten bei schiefer Beleuchtung mit Schatteneffecten irgend etwas zu thun hat¹⁾. Die Vertheilung von

1) Die Veränderungen, welche das Bild von *Pl. ang.* beim Heben und

Hell und Dunkel auf der Fläche der Schale in Form eines Systems von sechseckigen Feldern erscheint als das mathematisch nothwendige Resultat der Interferenz zwischen den sieben isolirten Lichtbündeln, welche die Beugung erzeugt, was deren physischer Grund im Object auch sein mag; die Lage der Sechsecke — zwei Seiten parallel der Mittelrippe — hat ihren zureichenden Grund in der sichtbaren Orientirung der Beugungsspectra gegen die Axe der Schale und kann daraus durch Rechnung abgeleitet werden, ohne dass man über den wirklichen Bau des Objects irgend etwas zu wissen braucht.

Dass auch für eine grosse Zahl rein organischer Gebilde auf dem Arbeitsfeld der Histologen im Wesentlichen die nämliche Sachlage besteht, kann das Beispiel der gestreiften Muskelfaser lehren. An guten Präparaten derselben lassen sich die Beugungserscheinungen ziemlich leicht beobachten und ihre Wirkungen im mikroskopischen Bild auf dem früher beschriebenen Wege experimentell studiren. Die mannigfachen Veränderungen in den Charakteren des Bildes, die sich dabei ergeben, erläutern einigermassen den bekannten Zwiespalt zwischen den Befunden verschiedener Beobachter in Bezug auf diese Gebilde, bekunden aber auch die Unmöglichkeit, über ihre wirkliche körperliche Zusammensetzung im Sinne der bisherigen Bemühungen irgend etwas Haltbares auszumachen.

Was hier bezüglich der Grundlagen mikroskopischer Wahrnehmung geltend gemacht worden ist, trifft übrigens nicht allein die morphologischen Verhältnisse der Objecte, sondern ebenso sehr die sonstigen Eigenschaften, welche aus der mikroskopischen Beobachtung erschlossen werden sollen. Dass Unterschiede der Durchsichtigkeit und Färbungen, die man im Bilde wahrnimmt, nicht nothwendig Merkmale der Objecte zu sein brauchen, sondern oft aus der gänzlichen oder partiellen Abblendung von Beugungsbündeln entspringen können, wird durch bekannte Erscheinungen an den Diatomeen hinlänglich illustriert. Wichtig aber scheint es, darauf hinzuweisen, dass

Senken des Tubus erfährt, können über das Vorhandensein von Erhöhungen schon deshalb nichts beweisen, weil sie bei gekreuzten Diamanttheilungen ganz in gleicher Weise auftreten. Ausserdem lässt die Beobachtung einer scharf begrenzten Lichtquelle durch eine Pl. Schale hindurch — nach der wiederholt erwähnten Methode — an den sie passirenden Lichtstrahlen keinerlei Ablenkung durch Brechung erkennen; die Schale verhält sich in dieser Hinsicht genau wie eine parallelfächige Glasplatte.

auch Polarisationsmerkmale an den Bildern von Objecten mit mikroskopischer Structur in mehrfacher Hinsicht anders beurtheilt werden müssen wie solche an reinen Absorptionsbildern. Von ihnen ohne Weiteres auf doppeltbrechende Substanzen, im gewöhnlichen Sinne, zu schliessen, ist mindestens sehr misslich. Denn es bleibt die Möglichkeit offen, dass dieselben Texturbedingungen, welche die Beugung bewirken, unter Umständen auch gleichzeitig Polarisations-effecte hervorrufen, die, als eine blosser Function des Beugungsphänomens, gar nicht wie bei Krystallen, Stärkekörnern u. dergl. vom Durchtritt der Lichtstrahlen an sich abhängen. Dass Derartiges in der That vorkommt, wird mir durch einige Wahrnehmungen an Pleur. ang. und anderen Diatomeenskeletten wahrscheinlich gemacht. Wenigstens zeigen* die Beugungsbüschel bei mehreren Objecten dieser Art, mit polarisirtem Licht beobachtet, Modificationen, welche schwer auf andere Weise zu erklären sein dürften. — Wie dem aber auch sein mag, jedenfalls bleibt es unzulässig, bei einem Object wie die gestreifte Muskelfaser z. B., dessen Detail nicht dioptrisch abgebildet ist, aus den Veränderungen des Beugungsbildes im polarisirten Licht nach den gewöhnlichen Kriterien auf nebeneinanderliegende einfach- und doppeltbrechende Schichten zu schliessen. Denn wenn eine gleichmässig doppeltbrechende Substanz mit irgend einer zur Erzeugung des bestehenden Beugungseffectes ausreichenden Differenzirung vorläge, so würde die aus der Interferenz der polarisirten Beugungsbüschel entspringende Streifung ganz ebensolche Modificationen zeigen müssen, wie die Muskelfaser im polarisirten Licht erkennen lässt.

19. In Anschluss an die vorstehenden, für den wissenschaftlichen Gebrauch des Mikroskops wichtigen Schlussfolgerungen ergeben sich ferner ganz bestimmte Grenzen für das Unterscheidungsvermögen sowohl jedes einzelnen Objectivs, wie auch des Mikroskops überhaupt.

Durch kein Mikroskop können Theile getrennt (oder die Merkmale einer real vorhandenen Structur wahrgenommen) werden, wenn dieselben einander so nahe stehen, dass auch der erste durch Beugung erzeugte Lichtbüschel nicht mehr gleichzeitig mit dem ungebeugten Lichtkegel in das Objectiv eintreten kann. Daraus entspringt für jede Grösse des Oeffnungswinkels eine bestimmte kleinste Distanz des Unterscheidbaren, deren numerische Angabe nur desshalb un-

sicher bleibt, weil sie, der ungleichen Wellenlänge wegen, für Licht der verschiedenen Farben ungleich ist, das relative Gewicht der einzelnen Farben aber bei der Beobachtung sehr wechselt. Irgend eine bestimmte Farbe zu Grunde gelegt, ergiebt sich der betreffende Minimalwerth für rein centrale Beleuchtung durch Division der Wellenlänge mit dem Sinus des halben Oeffnungswinkels, für den höchsten zulässigen Grad schiefer Beleuchtung aber bei jedem Oeffnungswinkel genau halb so gross — sonst gleiche Umstände vorausgesetzt. — Da nun auch beim Immersionssystem der Oeffnungswinkel durch kein Mittel erheblich über diejenige Grösse, die 180° in Luft entsprechen würde, hinausgeführt werden kann, so folgt, dass, wie auch das Mikroskop in Bezug auf die förderliche Vergrösserung noch weiter vervollkommnet werden möchte, die Unterscheidungsgrenze für centrale Beleuchtung doch niemals über den Betrag der ganzen, und für äusserste schiefe Beleuchtung niemals über den der halben Wellenlänge des blauen Lichts um ein Nennenswerthes hinausgehen wird.

Letztere Grenze ist — für das directe Sehen — bei den feinsten bekannten Diatomeenstreifungen und bei den letzten Liniengruppen der Nobert'schen Platte thatsächlich schon erreicht. Nur bei photographischer Aufnahme der mikroskopischen Bilder kann die Unterscheidung noch merklich weiter reichen. Denn wegen der bedeutend kürzeren Wellenlänge der chemisch wirksamen Strahlen werden bei jedem Objectiv die Bedingungen für die photographische Abbildung sehr viel günstiger; nämlich so, wie sie für das directe Sehen eine im Verhältniss von 3 : 2 gröbere Structur stellen würde¹⁾.

IV. Das optische Vermögen des Mikroskops.

20. Die vorstehenden Erörterungen gewähren die Grundlage für eine sichere Feststellung der Functionen, welche das optische Vermögen des Mikroskops ausmachen und damit zugleich für eine rationelle Formulirung der Ansprüche, welche an die optische Einrichtung desselben zu stellen sind.

1) Hieraus ist — von andern Gründen ganz abgesehen — zu entnehmen, dass die Leistung eines Objectivs bei photographischen Aufnahmen keinen Maasstab für seine Leistung im gewöhnlichen Gebrauch abgeben kann.

Die seit lange in der mikrographischen Literatur eingebürgerte Unterscheidung eines Definitions- und eines Auflösungsvermögens gewinnt durch die gegebenen Nachweise eine sehr viel grössere Tragweite, als ihr den bisher bekannten Thatsachen gegenüber füglich hat beigelegt werden können. Diesen Nachweisen zufolge ist — von zwei nahe liegenden Ausnahmefällen abgesehen — das mikroskopische Bild im Allgemeinen eine Superposition zweier Bilder von ganz verschiedenem Ursprung und ganz verschiedener Natur, die sich auch thatsächlich von einander trennen lassen — wie die im vorigen Abschnitt beschriebenen Experimente zeigen. Das eine ist ein negatives Bild, in welchem sich die Theile des Objects vermöge des ungleichen Lichtausfalls, den ihre Masse an den hindurchtretenden Strahlen bewirkt, geometrisch ähnlich abbilden. Man kann es kurz das Absorptionsbild nennen, weil partielle Absorption die hauptsächlichste Ursache des Lichtausfalls darstellt. Es ist der Träger des Definitionsvermögens, dessen Höhe, nach den Bedingungen dieser Art Abbildung, allein durch die grössere oder geringere Vollkommenheit bestimmt ist, mit welcher der direct einfallende Lichtkegel zu homofocaler Vereinigung gebracht wird. Demnach ist es immer dieser directe Lichtkegel, wie er durch Lage und Ausdehnung der lichtgebenden Fläche gegeben ist, welcher definirt, gleichgiltig in welcher Richtung er in das Objectiv gelangt, d. h. gleichgiltig, ob ein centraler oder ein peripherischer Theil der freien Oeffnung ihn aufnimmt. Unabhängig aber von diesem Absorptionsbilde werden solche Theile des Objects, welche innere Structur enthalten, nochmals wiedergegeben, und zwar in einem positiven Bilde, weil dieselben in Folge des eintretenden Beugungsphänomens quasi selbstleuchtend werden. Dieses zweite Bild, welches man das Beugungsbild nennen kann, besteht zwar selbst streng genommen aus so viel partiellen Bildern, als aus dem einfallenden Strahlenkegel isolirte Lichtbüschel abgesondert werden und in das Objectiv eintreten, indem, den angeführten Experimenten zufolge, jeder einzelne von diesen schon ein positives Bild erzeugt; weil aber diese partiellen Bilder, einzeln genommen, inhaltleer sind, das sichtbare Detail erst durch die Verschmelzung mehrerer erzeugt wird, kommt praktisch nur der Gesamteffect aller als selbständiger Factor in Betracht. — Dieses resultirende Beugungsbild erscheint nun offenbar als der Träger des Auflösungs- oder Unterscheidungsvermögens des Mikroskops. Seine Entwicklung hängt demnach zunächst und in erster

Reihe vom Oeffnungswinkel ab, insofern dieser allein — nach oben angegebenen Normen — die Grenze seiner möglichen Leistung bestimmt; seiner thatsächlichen Höhe nach aber hängt es zugleich ab von der Vollkommenheit, in welcher die partiellen, den einzelnen Beugungsbüscheln entsprechenden Bilder zur Verschmelzung gelangen; denn letztere erst ruft das Detail hervor, welches die Merkmale oder Anzeigen bestimmter Structurthatsachen liefert. Da nun aber die einzelnen Strahlenbüschel, deren confocale Vereinigung hiernach gefordert wird, verschiedene und je nach der Structur des Objects und der Beleuchtungsart immer wechselnde Theile der freien Oeffnung in Anspruch nehmen — wie man nach der mehrfach benutzten Beobachtungsweise, meist schon durch einen Blick in den offenen Tubus des Mikroskops, constatiren kann — so ist eine in allen Fällen gleich vollkommene Verschmelzung der verschiedenen Elemente des Beugungsbildes unter sich und nächst dem eine correcte Superposition desselben auf das neben ihm erzeugte Absorptionsbild offenbar nur dann möglich, wenn das Objectiv für den ganzen Umfang seiner freien Oeffnung gleichmässig frei von sphärischer Aberration ist.

21. Nach den bisher geltenden Vorstellungen über den Vorgang der Abbildung im Mikroskop durfte man annehmen, dass Aberrationsreste in den Objectiven nur die Schärfe der Abbildung beeinträchtigen würden, und dass solche demnach als nicht vorhanden oder doch als praktisch irrelevant anzusehen seien, soweit kein sichtbarer Mangel jener Art vorhanden ist.

Die hier nachgewiesenen Umstände, zusammengehalten mit Demjenigen, was unter (7) über die typische Form der sphärischen Aberration bei grossem Oeffnungswinkel gesagt ist, stellen deren Bedeutung in ein wesentlich anderes Licht. Die einzelnen Elemente des mikroskopischen Bildes, sowohl das Absorptionsbild wie die verschiedenen Bestandtheile des Beugungsbildes, werden durchweg durch isolirte Lichtkegel von relativ geringem Divergenzwinkel — fast nie über $30-40^\circ$ — erzeugt. Auch bei einem ansehnlichen Rest sphärischer Aberration können die Spitzen solcher isolirter Büschel, jedes für sich betrachtet, scharf genug sein, um keinen merklichen Zerstreungskreis übrig zu lassen. Da aber bei grossem Oeffnungswinkel diese einzelnen Büschel die verschiedensten Theile der freien Oeffnung gleichzeitig in Thätigkeit setzen, so können im vorausgesetzten Falle ihre Spitzen nicht in einem Punkte zusammentreffen,

sondern müssen hinter und nebeneinander auftreten. Die Bestandtheile des Gesamtbildes kommen daher nicht zu correcter Verschmelzung, sondern werden vielmehr longitudinal und lateral gegeneinander verschoben. Die ein und derselben Stelle und ein und demselben Niveau des Objects zugehörigen Structurmerkmale, wie z. B. verschiedene Streifensysteme, erscheinen daher sowohl von einander getrennt, wie auch getrennt von den Contouren der Objecttheile, zu denen sie gehören. — In Folge der Einseitigkeit, mit welcher in neuerer Zeit die Vervollkommnung des Mikroskops auf die Vergrößerung des Oeffnungswinkels gerichtet gewesen ist, sind die Bedingungen für derartige Abnormitäten, zumal für trügerische Niveaudifferenzen, bei neueren starken Objectiven zum Theil in der ausgiebigsten Weise vorhanden — wie zahlreiche Erfahrungen mich belehrt haben; und ich bin sicher, nicht fehlzugreifen, wenn ich die Meinung ausspreche, dass die Consequenzen dieser Sachlage in vielen Streitfragen der Mikroskopiker über verwickelte Structurverhältnisse eine unerwartet grosse Rolle spielen.

Da Jeder als die oberste Anforderung, welche die Rücksicht auf den wissenschaftlichen Gebrauch an das Mikroskop stellt, die anerkennen wird, dass Zusammengehöriges im Object auch im Bild als Zusammengehöriges dargestellt werde, und zwar bei jeder Structur und bei jeder Art der Beleuchtung, so folgt, dass die gleichmässige Correction der sphärischen Abweichung für den ganzen Umfang der freien Oeffnung die entscheidende Richtschnur bei der Construction der Mikroskope sein muss. Nun zeigt sich, wie unter (7) angeführt, dass beim Trockensystem eine gehörige Ausgleichung der sphär. Aberration über einen Oeffnungswinkel von 110° hinaus thatsächlich unmöglich wird; man gelangt daher zu dem Schlusse, dass ein Trockenobjectiv für den normalen wissenschaftlichen Gebrauch um so weniger geeignet sein kann, je feinere Streifensysteme, über die jenem Oeffnungswinkel entsprechende Unterscheidungsgrenze hinaus — ca. $0,35\mu$ für schiefes Licht — es noch sichtbar macht. — Die möglichste Steigerung des Auflösungsvermögens kann rationeller Weise nur beim Immersionsobjective als Ziel gesteckt werden, da allein die Immersion die Möglichkeit gewährt, ohne mit jener obersten Anforderung in Widerspruch zu kommen, den Oeffnungswinkel beliebig (d. h. bis an die Grenze des technisch Ausführbaren) zu vergrössern ¹⁾.

1) Die in dem neuen Catalog von C. Zeiss in Jena aufgeführten Mi-

22. In Anschluss an diese Darlegung ergeben sich unmittelbar einige Winke in Bezug auf die sachgemässe Prüfung fertiger Mikroskope.

Nach den früher bekannten Thatsachen durfte es als berechtigt erscheinen, den Werth eines Objectivs nach der Kleinheit des letzten Details, welches mit demselben wahrnehmbar ist, zu bemessen und daraufhin die Auflösung schwieriger Probeobjecte der bekannten Art vorzugsweise als Merkmale der Leistungsfähigkeit zu betrachten. Denn wenn auch immer zuzugeben war, dass die besondere Art des Details in diesen Testobjecten und die dabei meist benutzte Beleuchtungsweise nicht zu den gewöhnlichen Vorkommnissen gehören, so schien es doch wenigstens nicht zweifelhaft, dass der Erfolg unter diesen besondern Umständen von den nämlichen Eigenschaften der Construction, wie die Leistung im normalen Gebrauch, getragen sein werde. Dies muss nun aber auf Grund der vorstehenden Ausführungen direct abgelehnt werden. Eine Prüfung nämlich, welche auf Ermittlung der äussersten Grenze des Unterscheidungsvermögens, sei es an der Nobert'schen Testplatte, sei es an Diatomeen oder dergl. ausgeht, führt kraft der physikalischen Bedingungen für diesen Zweck einen ganz exceptionellen Strahlengang im Mikroskop herbei, wie er bei keiner anderen Art von Beobachtungen jemals wiederkehrt. Denn ein Detail liegt nur dann der Unterscheidungsgrenze nahe, wenn es so fein ist und eine so starke Zerlegung des Lichts durch Beugung bewirkt, dass auch unter den günstigsten Umständen nur der erste abgelenkte

kroskopsysteme sind sämmtlich nach den hier bezeichneten Grundsätzen berechnet und ausgeführt. Die Trockenobjective haben auch in den stärksten Nummern nur $105 - 110^\circ$ Oeffnungswinkel und können demnach nicht den Anspruch machen, in der Auflösung von Diatomeen u. dergl. mit allen andern concurriren zu wollen. Bei den Immersionsobjectiven ist das Maass der freien Oeffnung auf ca. 100° in Wasser, d. h. etwas mehr, als 180° in Luft entsprechen würde, gestellt worden, weil sich dieses noch ohne ernstliche Nachtheile erreichen lässt. Ich für meine Person bin zwar überzeugt, dass auch das Immersionssystem für die normalen Bedürfnisse des wissenschaftlichen Studiums nicht das Geringste an Werth verlieren, in manchen nebensächlichen Punkten aber erheblich gewinnen würde, wenn man die Construction auf einen geringeren Oeffnungswinkel einrichten wollte; im Hinblick aber auf den allgemein verbreiteten Maassstab der Werthschätzung kann man einem praktischen Optiker nicht zumuthen, sich um Leistungen zu bemühen, welche ziemlich sicher wären, in den zweiten Rang gestellt zu werden.

Lichtbündel noch eben gleichzeitig mit dem directen Strahlenkegel in das Objectiv eintreten kann. Dann ist aber, wenn es im Bilde sichtbar wird, eo ipso nur die äusserste Randzone des Objectivs bei der Abbildung thätig: der möglichst schief einfallende Strahlenkegel, den der Spiegel z. B. liefert, streift den Rand der freien Oeffnung auf der einen Seite und der einzige zur Wirkung gelangende Beugungsbündel streift ihn an der gegenüberliegenden Seite — wie man durch Beobachtung der Spuren beider in der obern Focalebene des Objectivs direct constatiren kann. Theorie und Erfahrung lehren aber, dass jedes nicht total verfehlte Objectiv, wie unvollkommen es auch im Punkte der sphärischen Aberration sein mag, wenn seine Linsen nur leidlich centrirt sind, immer für eine einzelne Zone, etwa für den äussersten Rand, aberrationsfrei erhalten werden kann; dauernd — wenn es bei der Verfertigung auf ein derartiges Testobject ausprobiert wurde, und während des Gebrauchs — wenn es eine sogen. Correctionsfassung besitzt; welche Vorrichtung denn in der That auch, nach meinen Erfahrungen, sehr viel öfter zu diesem als zu ihrem ostensibeln Zweck dienen muss.

Der Nachweis, dass ein Linsensystem eine sehr feine Streifung auf einem Diatomeenskelett oder auf der Nobert'schen Platte auflösen kann, besagt also genau genommen nichts weiter, als dass sein Oeffnungswinkel dem berechenbaren Beugungswinkel der betreffenden Liniendistanz entspricht und dass es nicht so schlecht construirt ist, als dass eine ausreichende Correction der Randzone unmöglich wäre. Welche Bedingungen für die correcte Verschmelzung der partiellen Bilder ein solches Objectiv in dem sehr viel ungünstigeren Falle der gewöhnlichen Beobachtung, wo fast immer ganz verschiedene Zonen der freien Oeffnung gleichzeitig thätig sind, darbieten werde, dafür giebt eine Prüfung dieser Art gar keinen Anhalt. Das Resultat derselben kann also nicht einmal den Anspruch machen, auch nur das Unterscheidungsvermögen nach seinen allgemeingiltigen Momenten zu characterisiren; es giebt allein die Unterscheidungsgrenze und constatirt damit ein Factum, das zwar an sich einen Werth haben mag, wegen der singulären Umstände aber mit der Höhe der Leistung im Allgemeinen keinen Zusammenhang hat.

Nicht viel höher kann die Prüfung des Auflösungsvermögens für gerades Licht angeschlagen werden. In der Nähe der dieser Beleuchtungsform entsprechenden Unterscheidungsgrenze passirt das

directe Licht den centralen und alles abgebeugte Licht den peripherischen Theil der freien Oeffnung. Abgesehen davon, dass mit Hilfe einer Correctionsfassung ein etwaiger Aberrationsrest immer in die unthätig bleibende mittlere Zone des Objectivs geschoben werden kann, hängt auch in diesem Falle das Factum der Auflösung wesentlich nur von der Wirkung der Randzone ab, weil alsdann stets mehrere — mindestens zwei einander gegenüberliegende — Beugungsbüschel in der Randzone liegen und diese auch bei mangelhaftem Zusammenwirken mit den ungebeugten Strahlen das Detail hervorrufen.

23. Vom Gesichtspunkte der hier aufgestellten Theorie ergibt sich hingegen eine andere Methode, welche unter Benutzung der gewöhnlichen Testobjecte unmittelbar die für den normalen Gebrauch des Mikroskops maasgebenden Momente ans Licht zu bringen erlaubt. Wenn es darauf ankommt, die Bedingungen für das correcte Zusammenwirken von Strahlenbüscheln, welche die verschiedensten Theile der freien Oeffnung passiren, auf eine recht empfindliche Probe zu stellen, so gibt es in der That keine bessern Hilfsmittel, als die Natur in manchen Diatomeenskeletten und in einigen Schmetterlingsschuppen darbietet; nur dass allerdings nicht die Thatsache der erfolgenden Auflösung an sich, sondern die nähere Beschaffenheit des entstehenden Gesamtbildes in Betracht gezogen werden muss. Wählt man nämlich ein Probeobject von solcher Feinheit des Details aus, dass ein zu prüfendes Objectiv dasselbe schon bei rein centraler Beleuchtung eben sichtbar macht, dass also bei schiefer Beleuchtung nicht die geringste Schwierigkeit bleibt, so kann damit ohne alle weiteren Hilfsmittel der empfindliche Strahlengang im Mikroskop herbeigeführt werden, dessen Herstellung die unter (10) erwähnte Prüfungsmethode durch Beleuchtung des künstlichen Probeobjects mit zwei getrennten Lichtbüscheln bewirkt. Die Ablenkung der ersten Beugungsbüschel gewinnt in diesem Falle ein solches Verhältniss zum Oeffnungswinkel des Objectivs, dass — wie die Theorie und die directe Beobachtung der Lichtspuren zeigt — bei zwei bestimmten Spiegelstellungen Theile aller Zonen der freien Oeffnung, jede durch einzelne Streifen vertreten, wirksam werden, und zwar unter Umständen, welche das Hervortreten der Correctionsmängel besonders begünstigen. Die eine erhält man, wenn man den Spiegel senkrecht zu einem Streifen-system der angenommenen Art so weit aus der Axe bewegt, dass

beiläufig der eine Rand in diese trifft. Alsdann erscheint die Spur des direct eintretenden Lichtkegels im Oeffnungsbild über dem Objectiv excentrisch dicht an der Mitte der freien Oeffnung, die Spur eines Beugungsbüschels aber auf der gegenüberliegenden Seite in der Randzone. Die zweite Stellung ist die der möglichst schiefen Beleuchtung, die das Objectiv ohne merkliche Verdunkelung des Sehfeldes erlaubt; wenn diese herbeigeführt wird, vertauschen die beiden Spuren einfach ihre vorher betrachteten Stellungen. In beiden Fällen hat man, wenn nur ein Streifensystem vorliegt, zur Abbildung zwei isolirte Lichtbüschel wirksam, welche einen Theil der centralen und einen Theil der peripherischen Zone der freien Oeffnung, beide auf entgegengesetzten Seiten von der Axe, gleichzeitig in Thätigkeit bringen. Enthält das Präparat mehrere gleichartige Streifungen, so treten zwar noch andere Beugungsbüschel theilweise in das Objectiv ein; doch wird hierdurch an den vorher betrachteten Verhältnissen nichts Wesentliches geändert.

Es kann natürlich nicht der Zweck einer solchen Probe sein, die Abbildungsfehler eines Objectivs im Einzelnen nachzuweisen, so wie die unter (10) erwähnte Methode es erlaubt; es soll sich dabei vielmehr darum handeln, an einem die normalen Bedingungen des mikroskopischen Sehens repräsentirenden Beispiel die thatsächliche Leistungsfähigkeit eines Systems im Ganzen zu erproben. Der praktisch wichtigste Factor derselben ergibt sich nun sofort, wenn man auf die Verschmelzung der partiellen Bilder, die ein und demselben Theile des Präparats angehören, achtet. Man hat das Contourenbild des Objects, wie es der directe Lichtkegel liefert und zugleich ein Structurbild, welches aus der Interferenz der Beugungsbüschel entspringt. Bei einem correcten Objectiv soll nicht nur jedes für sich vollkommen scharf hervortreten, sondern es sollen zugleich beide ohne Niveaudifferenz und ohne seitliche Verschiebung zusammenfallen, d. h. bei ein und derselben Einstellung deutlich sichtbar sein, wenn im Object Structur und Begrenzung ein und demselben Niveau angehören. Genügt ein Linsensystem dieser, mit ein paar Drehungen der Einstellungsschraube auszuführenden Probe wenigstens in der Mitte des Gesichtsfeldes, so kann man sicher sein, dass es von jedem beliebigen Object und bei jeder Art von Beleuchtung stets richtige Bilder liefern wird. Bemerkt man dagegen, dass, wenn auf die Contouren eingestellt ist, das Detail über oder unter dem Object zu schweben oder seitlich über die Contour hin-

wegzufließen scheint, so bekundet ein solcher Befund eine Construction, die keine Garantie dafür gewährt, an beliebigen Präparaten die zusammengehörigen Merkmale auch als zusammengehörig kenntlich gemacht zu sehen, wie hoch auch das Auflösungsvermögen des Systems bei der gewöhnlichen Prüfungsmethode sich stellen möge. — Uebrigens kann das Urtheil noch weitere Anhaltspunkte gewinnen, wenn man sich nicht ausschliesslich auf die beiden vorher namhaft gemachten Beleuchtungsformen beschränkt, sondern auch andere Spiegelstellungen auf ihre Effecte prüft, dabei aber immer auf die charakteristischen Merkmale für die Verschmelzung der partiellen Bilder achtet. — Dass man bei all diesen Versuchen den wirksamen Strahlengang durch directe Beobachtung des Oeffnungsbildes zu controliren hat, bedarf kaum einer ausdrücklichen Erwähnung.

Bei jedem Objectiv von grossem Oeffnungswinkel wird man Abweichungen der angedeuteten Art nach dem Rande des Sehfeldes hin wahrnehmen, wenn nicht etwa der Gesichtswinkel des Oculars ungewöhnlich klein ist. Sie entspringen meist nicht aus Aberrationen, sondern aus Differenzen der Vergrösserung, die bei der besten Construction unvermeidlich sind. Der Grad ihres Hervortretens bemisst die Vollkommenheit der Abbildung ausser der Axe.

Was ausserdem zur Vervollständigung des Urtheils über die Güte eines Linsensystems gehört, giebt ein Blick auf die Farbensäume, welche die Contouren eines Probeobjectes in der Mitte und am Rande des Sehfeldes zeigen. Dabei ist zu beachten, dass Abweichungen dieser Art, weil sie vorwiegend am Contourenbild haften, beim gewöhnlichen Gebrauch des Mikroskops, der fast immer auf gerade Beleuchtung angewiesen ist, nur in dem Maasse eine praktische Bedeutung haben, als sie bei centraler Spiegelstellung hervortreten.

Was nun die Probeobjecte anlangt, welche sich zum Gebrauch in der angegebenen Richtung eignen, so müssen sie namentlich zweien Anforderungen genügen. Erstens müssen sie so dünn und eben sein, dass man Grenzen und Structurdetail als in dem nämlichen Niveau liegend ansehen kann; zweitens müssen die abgebeugten Strahlen eine grosse Intensität haben, damit der von ihnen herrührende Effect neben dem des directen Lichtkegels gehörig zur Geltung kommen kann. Der letztern Rücksicht wegen eignen sich also nur trocken liegende Objecte mit kräftiger, gut markirter

Zeichnung, welche — wie man im Oeffnungsbild beobachten kann — stets sehr lichtstarke Beugungsphänomene geben, weil eben nur die Interferenz intensiver Strahlen starke Contraste von Hell und Dunkel im mikroskopischen Bild hervorrufen kann.

Für die schwächeren und mittleren Objective hat man in den Insectenschuppen und den gröberen Diatomeen, welche die mikrophischen Handbücher aufführen, eine hinreichende Zahl passender Objecte zur Verfügung; für die starken Objective dagegen wird die Auswahl sehr beschränkt durch die Rücksicht auf die erstgenannte Anforderung ¹⁾. Dem Oeffnungswinkel der Immersionssysteme entspricht, der Feinheit des Details nach, Pleur. ang. durchschnittlich am besten; es ist auch in der That noch für die schärfsten Nummern sehr gut brauchbar, wenn man von recht zarten Exemplaren Bruchstücke mit scharfen Bruchrändern verwendet und das Augenmerk nur auf die Beschaffenheit des Bildes dicht an einer solchen Randstelle richtet; die natürlichen Ränder bieten ebensowenig wie die Linien der Mittelrippe Garantie für Gleichheit des Niveaus. Zur Prüfung der stärkeren Trockensysteme können die gröberen Exemplare desselben Objects, gleichfalls in Bruchstücken, noch benutzt werden, wiewohl die Zeichnung für einen Oeffnungswinkel von 100 Grad schon etwas zu fein ist. Ausserdem kann man zerbrochene Exemplare der feineren Schuppen von Hipparchia Jan., deren Querstreifen für 80—90° Oeffnungswinkel passen, auch für höhere Beträge desselben ohne Nachtheil verwenden.

Meiner Erfahrung zufolge führt eine Untersuchung in dieser Art nach einiger Uebung zu einem sehr sichern Urtheil über die Vollkommenheit eines Linsensystems; wenigstens wird die Höhe des optischen Vermögens in seinen von der Grösse des Oeffnungswinkels unabhängigen Functionen sehr viel zutreffender eruiert als durch die getrennten Proben auf Begrenzungs- und Auflösungsvermögen jemals geschehen kann.

Was aber diese Methode nicht ergibt — die absolute Grenze des physischen Unterscheidungsvermögens — kann durch blosser Messung des Oeffnungswinkels ebenso gut wie durch directe Erpro-

1) Die Nobert'sche Testplatte ist natürlich für diese Art der Prüfung ungeeignet, weil sie überhaupt kein Absorptions- oder Contourenbild, sondern ein reines Beugungsbild liefert und deshalb das wichtigste Moment für die Beurtheilung der Wirkung bei ihr hinwegfällt.

bung an Testobjecten erhalten werden. — Wegen des Verfahrens, durch welches der Oeffnungswinkel in jeder nur wünschenswerthen Genauigkeit zu erlangen ist, verweise ich auf die Jenaische Zeitschr.

24. Zum Schluss sei noch einiger allgemeiner Folgerungen in Bezug auf die Construction der Mikroskope gedacht, welche die dargelegten Thatsachen und Theorien nach sich ziehen.

Den gegebenen Nachweisen zufolge hängt die Leistungsfähigkeit des Mikroskops von zwei Factoren ab, welche in ganz verschiedenen Elementen der Construction wurzeln. Der eine ist die geometrische Vollkommenheit des Strahlengangs. Sie bestimmt durch die Grösse der Zerstreungskreise in der Bildfläche die Maasse des kleinsten Details, welches rein geometrisch genommen im Bilde Ausdruck finden kann. Der zweite Factor dagegen ist die Fähigkeit des optischen Apparats, die physische Bedingung zu erfüllen, an welche die Wiedergabe solchen Details jedenfalls geknüpft ist, nämlich die Integration des durch Beugung zerlegten Lichtes, ohne welche das Bild inhaltleer bleibt. Wie aus geometrischen Gründen ein Detail nicht abgebildet wird, wenn seine Maasse unterhalb der Grösse bleiben, welche dem Durchmesser der Zerstreungskreise, auf die linearen Dimensionen des Objects reducirt, entspricht, so wird es aus physikalischen Gründen nicht abgebildet, wenn die Winkel- ausbreitung des Beugungsphänomens durch ihre Grösse eine Vereinigung von mindestens zwei Beugungsbüscheln unmöglich macht. Dem früher Gesagten zufolge wurzeln nun zwar die Bedingungen für beide Functionen in demselben Bestandtheil des optischen Systems, nämlich allein im Objectiv; aber sie wurzeln in ganz verschiedenen Elementen seiner Construction. Die dioptrische Unterscheidungsgrenze, welche die unvermeidlichen Mängel der Strahlenvereinigung herbeiführen, findet ihr Maass in der förderlichen Vergrösserung des Objectivs und ist, wie früher angegeben, für jeden bestimmten Grad der technischen Vollendung der Construction der Brennweite des Objectivs umgekehrt proportional; die physikalische Unterscheidungsgrenze dagegen hängt allein vom Oeffnungswinkel ab und ist dem Sinus seines halben Betrages proportional. Nun sind aber beide Functionen auf ein und denselben Zweck gerichtet, nämlich auf das Sichtbarmachen des räumlich Kleinen, und sind für diesen Zweck beide gleich unentbehrlich. Daraus folgt denn, dass eine rationelle Construction des Mikroskops darauf Bedacht nehmen muss, sie in der Weise ins Gleichgewicht zu setzen, dass die Grenzen

beider wenigstens annähernd zusammentreffen. Denn es ist offenbar ebenso nutzlos, den physischen Bedingungen der Abbildung in weiterem Umfang genügt zu haben, als die erreichbare Vergrößerung zu verwerthen erlaubt, wie es nutzlos ist, die Vergrößerungskraft des Mikroskops höher zu steigern, als die physische Capacität der Objective nöthig macht. Im ersten Fall, wenn der Oeffnungswinkel zu gross ist für die förderliche Vergrößerung, die der Brennweite entspricht, gewinnt das Objectiv ein latentes Auflösungsvermögen, welches keinem menschlichen Auge zu Gute kommt; im andern Fall, wenn die Stärke des Objectivs die dioptrische Unterscheidungsgrenze weiter hinausrückt, als das dem Oeffnungswinkel zugängliche Detail nöthig macht, entsteht eine leere Vergrößerung, d. h. eine solche, die im Bilde nichts vorfindet, was ihrer bedürfte.

25. Die Consequenzen dieser Erwägung führen zu gewissen Maximen für die richtige Anpassung zwischen Brennweite und Oeffnungswinkel bei den Objectiven, welche den Gewohnheiten der bisherigen Praxis in mehreren Punkten widersprechen. Hier mag Dasjenige Platz finden, was mir von allgemeinerem Interesse zu sein scheint, weil es die Tragweite der mikroskopischen Beobachtung im Ganzen ins Licht setzt und die Ergänzung der unter (9) gegebenen Darlegungen liefert.

Wenn für das Trockensystem die Theorie eine Beschränkung des Oeffnungswinkels auf ca. 110° unbedingt fordert, so kann man leicht ausrechnen, welches die feinste Structur ist, die diesem Oeffnungswinkel zugänglich bleibt; und es ergibt sich darauf hin, dass wenigstens für ein rationell construirtes Objectiv dieser Art, bei welchem nicht auf Kosten der wirklichen Vollkommenheit die Auflösung einseitig gesteigert ist, kein Detail in Frage kommen kann, das ein geübtes Auge nicht schon bei einer guten 4—500fachen Vergrößerung zu erkennen vermöchte. Bei den Ansprüchen, welche nach dem dermaligen Stand der optischen Technik an die relative Vollkommenheit der Constructionen gestellt werden dürfen, muss aber diese Höhe der Vergrößerung — auch wenn man es mit dem Attribut »gut« etwas strenger nimmt, als öfters geschieht — schon mit einer Brennweite von ca. 3 Mm. ($\frac{1}{8}$ engl. Zoll) erreicht sein. Beim Immersionssystem rückt, selbst wenn der Oeffnungswinkel auf das höchste technisch erreichbare Maass gebracht wird, die physische Unterscheidungsgrenze doch nicht so weit zurück, dass ihr nicht eine correcte 7—800fache Vergrößerung vollkommen gewachsen bliebe,

und diese muss hier bei guter Construction mit ca. 2 Mm. ($\frac{1}{12}$ Zoll) Brennweite sicher zur Verfügung stehen. Nun wird man zwar zugeben, dass eine weitere möglichst correcte Vergrößerung über das unerlässliche Minimum hinaus, obwohl sie die Wahrnehmung nicht mit neuen Thatsachen bereichern kann, doch der Leichtigkeit und Sicherheit der Beobachtung sehr zu Statten kommen mag. Indess wird man diese Bedeutung der leeren Vergrößerung schwerlich weit über die bezeichneten Grenzen hinaus anerkennen dürfen; und ich komme daher zu dem Schlusse, dass der wissenschaftliche Werth von Objectiven, deren Brennweite beim Trockensystem unter 2 Mm., beim Immersionssystem unter 1 Mm. erheblich herabgeht, durchaus problematisch ist.

Die eigentliche Capacität des Mikroskops im strengeren Sinne aber muss ich — so lange nicht Momente geltend gemacht werden, die ganz ausserhalb der Tragweite der aufgestellten Theorie liegen — schon bei der oben bezeichneten früheren Grenze als vollständig erschöpft ansehen; und im Besondern muss ich die Ansicht vertreten: dass mit keinem Mikroskop irgend etwas in der Beschaffenheit der Objecte wirklich Begründetes jemals gesehen worden ist und gesehen werden kann, was ein normales Auge nicht auch schon mit einer scharfen 800fachen Immersionsvergrößerung sicher zu erkennen vermöchte. — Was in neuerer Zeit, zumal aus England, über ganz ausserordentliche Leistungen ungewöhnlich starker Objective (bis $\frac{1}{50}$ engl. Zoll Brennweite) berichtet worden ist, ist nicht darnach angethan, mich in diesem Urtheil irre zu machen. Denn die Ueberlegenheit solcher Linsensysteme soll an Objecten constatirt sein, auf welche die unmittelbaren Ergebnisse meiner Experimente bedingungslos Anwendung finden; und sie soll unter Vergrößerungen zu Tage treten, deren Höhe Jeder als völlig illusorisch erkennt, der sich von den optischen Bedingungen einer solchen Leistung einige Rechenschaft geben kann.
