

Ueber die Grenze der Leistungsfähigkeit der Mikroskope

von

DR. HUGO KRÜSS.

(Nach einem Vortrage im Naturwissenschaftlichen Verein am 9. April 1879.)

Die Mikroskopiker haben schon seit längerer Zeit gefunden, daß die Steigerung der Vergrößerung der Mikroskope über eine gewisse Grenze hinaus ihnen keinen Vortheil mehr zu bieten vermag. Die Leistungen der Mikroskopverfertiger nahmen, seit Hartnack das von Amici erfundene Immerfionsprincip in äußerst vollkommener Weise in Anwendung brachte, einen neuen Aufschwung; in den letzten 10—15 Jahren hingegen ist trotz der stets wachsenden Bedeutung des Mikroskops für die wissenschaftliche Forschung und den damit wachsenden Anforderungen an dasselbe ein merkwürdiger Stillstand eingetreten.

Man hat vielfach die Frage aufgeworfen, warum das empirische Verfahren in der Mikroskopverfertigung nicht verlassen und, wie es seit Fraunhofer bei dem Fernrohre so erfolgreich geschieht, die Vervollkommnung des Mikroskops auf theoretischer Grundlage gesucht würde. Dr. E. Hartnack in Potsdam und Prof. E. Abbe in Jena (welcher bekanntlich für die Zwecke der Zeiss'schen Werkstätte thätig ist) haben der Construction des Mikroskops eine ebenso sichere theoretische Grundlage gegeben wie Fraunhofer derjenigen des Fernrohres und trotzdem sind auch die von ihnen in den letzten beiden Decennien gemachten Fortschritte nur gering; ja Abbe's Untersuchungen haben ihn sogar geradezu darauf hingewiesen, daß für die Leistung des Mikroskops eine Grenze vorhanden ist, deren Urfachen nicht im Bereiche der menschlichen

Macht liegen, fondern in der Natur des Lichtes selbst begründet sind. — Es ist demgemäfs vollkommen begreiflich, dafs sich trotz des Aufgebots aller vorhandenen praktischen und theoretischen Mittel dieser Stillstand in der Vervollkommnung der Leistungsfähigkeit der Mikroskope zeigt; während eine Reihe der tüchtigsten Kräfte an derselben arbeiten, stehen die von ihnen gelieferten Mikroskopsysteme, mit unerheblichen Unterschieden auf derselben Höhe der Vollkommenheit; sie stehen alle nahe der Grenze des überhaupt Erreichbaren.

Ueber den Grund dieses Zustandes besitzen wir nun zwei Arbeiten, die eine von Helmholtz,¹⁾ die andere von Abbe,²⁾ welche merkwürdigerweise fast gleichzeitig erschienen sind. Helmholtz beschränkt sich auf rein theoretische Untersuchungen, Abbe dagegen geht von praktischen Gesichtspunkten aus, verificirt die darauf gebauten theoretischen Arbeiten in der Zeiss'schen Werkstätte und sucht die Endresultate möglichst wiederum praktischen Zwecken nutzbar zu machen. Es ist auffallend und höchst bezeichnend für die Sachlage, dafs bei diesen verschiedenen Gesichtspunkten die letzten Folgerungen beider Arbeiten ganz die gleichen sind; wenn man beide Arbeiten mit einander vergleicht, so stimmen sie in der Abfassung der Resultate fast wörtlich überein.

In dem seit Veröffentlichung der beiden Arbeiten verflossenen Zeitraume haben die darin enthaltenen Behauptungen mehr und mehr durch die praktischen Erfahrungen ihre Bestätigung gefunden, so dafs es wohl geeignet erscheint, den von vielen Seiten gern gehegten Hoffnungen auf umfassende Fortschritte in den Leistungen der Mikroskope in den folgenden Zeilen gegenüberzutreten durch Erinnern an den Inhalt dieser beiden Arbeiten. —

¹⁾H. Helmholtz. Die theoretische Grenze für die Leistungsfähigkeit der Mikroskope. Pogg. Ann. d. Phys. u. Chem. Jubelband (1874) pag. 557 bis 584.

²⁾E. Abbe. Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. Max Schultze's Archiv für mikr. Anat. 9. Bd. (1873). p. 413 bis 468. Siehe auch: E. Abbe. Die optischen Hilfsmittel der Mikroskopie. Bericht über die wissenschaftlichen Apparate auf der Londoner Internationalen Ausstellung 1876, herausgegeben von A. W. Hoffmann p. 383—420.

Wenn es sich um die Grenze der Leistungsfähigkeit der Mikroskope handelt, so ist zuerst eine Antwort auf die Frage zu geben, was unter der Leistung eines Mikroskops verstanden werden soll.

Durch die Beschaffenheit unseres Auges ist demselben eine Grenze gesetzt in Bezug auf die Kleinheit der Gegenstände, welche wir erkennen können. Wenn zwei gerade Linien, gezogen von den äußersten Rändern eines Gegenstandes nach unserem Auge einen Winkel bilden, kleiner als eine gewisse Gröfse, so erscheint uns der Gegenstand nicht mehr als ausgedehnt, sondern falls er genügende Intensität besitzt als Punkt. Die Gröfse dieses Winkels nennt man die Sehschärfe des Auges; sie ist verschieden bei verschiedenen Individuen, verschieden bei demselben Individuum zu verschiedenen Zeiten oder in verschiedenen Zuständen und verschieden nach der Art der Gegenstände und der Stärke ihrer Beleuchtung. Man wird jedoch nicht weit fehlgehen, wenn man sie in Mittel auf 1 (Winkel-) Minute ansetzt.

Dafs Gegenstände sich unserem Auge unter kleinerem Winkel darbieten, als dessen Sehschärfe beträgt, kann zweierlei Ursachen haben. Es kann der Gegenstand an sich wohl grofs genug sein, sich aber sehr weit entfernt befinden; dann benutzen wir zur Vergröfserung des Gesichtswinkels ein Fernrohr. Oder aber der Gegenstand ist so klein, dafs er selbst in der Entfernung der deutlichen Sehweite (ca. 250 mm.) einen zu kleinen Winkel einschliesst; dann könnte man, um diesen Winkel zu vergröfsern, den Gegenstand dem Auge näher bringen. Dieses geht aber nur innerhalb der Accommodationsbreite des Auges; wird der Gegenstand noch näher gebracht, so wird das Bild im Auge unscharf und man ist genöthigt, zur weiteren Vergröfserung des Gesichtswinkels das Mikroskop zu benutzen.

Jedes zusammengesetzte Mikroskop besteht aus dem Objectiv und dem Ocular, die sich in der Entfernung der Tubuslänge von einander befinden. Das Objectiv entwirft von dem darunter befindlichen Gegenstande ein vergröfsertes Bild und dieses wird durch das Ocular wie durch eine Loupe betrachtet,

wodurch es nochmals vergrößert wird. Die Vergrößerung eines Mikroskops hängt demgemäß ab von der Beschaffenheit des Objectivs und des Oculars, außerdem aber noch von der Entfernung beider von einander. Aus den einfachen Regeln der Dioptrik folgt, daß die Vergrößerung eines Mikroskops um so stärker ist, je kürzer die Brennweite des Objectivs, je kürzer die Brennweite des Oculars und je größer die Entfernung des Oculars vom Objectiv ist. Die Objective werden angefertigt mit Brennweiten von 60 mm. (in England fogar von 5 Zoll) bis zu den stärksten mit 1,0 bis 0,5 mm Brennweite. Die Grenze ist hier gegeben durch die Kleinheit der nothwendig werdenden Krümmungsradien und Oeffnungen der Linfen und die Schwierigkeit ihrer Ausführung. — Die Aequivalent-Brennweiten der gebräuchlichen Oculare bewegen sich zwischen 40 und 15 mm., sollte es jedoch nothwendig werden, so ließen sich Ocularconstructions finden mit erheblich kürzerer Brennweite als die jetzigen Oculare besitzen.

Die Vergrößerung eines Mikroskops, hervorgerufen durch Tubuslänge und Ocular, wäre also nahezu unbegrenzt, vorausgesetzt, daß das durch das Objectiv erzeugte Bild des Objectes vollkommen richtig wäre. Dieses ist aber keineswegs der Fall, das in Frage kommende Bild besitzt eine Reihe von Fehlern, welche durch das Ocular bis zu folchem Betrage vergrößert werden können, daß sie die Schärfe desselben stören.

Die Fehler im Objectivbilde haben ihren Ursprung

1) in den Aberrationen des Objectivs,

2) in den Fehlern seiner Form, d. h. in denjenigen Fehlern, welche gemacht werden bei der Ausführung der richtigen Krümmungen seiner Flächen und bei der Centrirung seiner einzelnen Theile. Die zweite Ursache kann wohl als irrelevant angesehen werden, da man im Stande ist, auch den kleinsten Radius der Krümmung einer Linfenoberfläche bis auf unerhebliche Abweichungen von seiner Größe genau zu treffen und auch die Centrirung kann sehr genau besorgt und durch feste Verbindung aller Linfen unter einander erhalten werden.

Von viel beträchtlicherem Einflufs find die Aberrationen des Systems; fie bestehen in den von der Kugelgestalt der brechenden Flächen herrührenden Fehlern (sphärische Aberration) und in den durch die ungleiche Brechung der Strahlen von verschiedenen Wellenlängen hervorgebrachten Abweichungen (chromatische Aberration). Beide Aberrationen sucht man durch Anwendung mehrerer Linfen aus verschiedenen Glasarten zu heben, was jedoch nicht vollkommen möglich ist. Bei den großen Oeffnungen, welche den Mikroskop-Objectiven gegeben werden müssen, ist es nur möglich, die sphärische Aberration zu heben für Strahlenbüschel, welche nahe der optischen Axe und nahe dem Rande der Oeffnung einfallen, dazwischen bleibt eine uncorrigirte Zone. Ist ein Objectiv in einer sogenannten Correctionsfassung, durch welche mit Hülfe der Verschiebung einer Linse der verschiedene Einfluss verschiedener Deckglasdicken aufgehoben werden soll, so kann man diese Verschiebung der einen Linse des Systems auch benutzen, den von sphärischer Aberration freien Theil über die ganze Oeffnung des Systems zu verschieben, also immer gerade denjenigen Theil deselben zu corrigiren, welchen man augenblicklich braucht. Die chromatische Aberration kann bis jetzt nur gehoben werden für solche Strahlen die in der optischen Axe oder für solche, welche am Rande der Oeffnung das System treffen, für beide zugleich nicht. Gauß¹⁾ hat die gleichzeitige Vernichtung der Farbenabweichung für Axen- und Randstrahlen bei dem Fernrohr-Objectiv versucht, doch führt dieses schon hier zu entschieden ungünstigen Formen in Bezug auf Aufhebung des Kugelgestaltfehlers und die Ausführung der Krümmungen der einzelnen Flächen²⁾; erst in allerneuester Zeit hat Steinheil ein Fernrohr-Objectiv construirt, bei welchem dieser Fehler unter günstigen Bedingungen gehoben ist.

¹⁾ C. F. Gauß. Ueber die achromatische Doppellinse, Zeitschrift f. Astr. v. Lindenau u. Bohnenberger IV p. 345.

²⁾ Krüss. Vergleichung einiger Objectiv-Constructions. München 1873.

Es ist wohl mit Bestimmtheit vorauszufagen, dafs die Ver-
nichtung der Aberrationen der Mikroskop-Objective in vollkomme-
nerer Weise möglich fein wird, sobald andere Glasarten zur Ver-
fügung stehen werden wie bisher. Bis jetzt geht stets mit der
Zunahme der zerstreuen Kraft eine Zunahme des Brechungs-
vermögens Hand in Hand; wenn man Glasarten besitzen würde,
welche mit einer stärkeren Zerstreuung eine geringere Bre-
chung verbinden (oder umgekehrt), so würden noch eine ganze
Reihe von Fehlern gehoben werden können. Die Grenze ist hier
also gegeben durch die augenblickliche Beschaffenheit der Glas-
arten.

Die Folge der dem Mikroskop-Objectiv anhaftenden Aber-
rationsreste ist nun die, dafs ein Punkt durch das Objectiv nicht
wiederum als scharfer Punkt abgebildet wird, sondern als kleiner
Zerstreuungskreis. Werden diese Zerstreuungskreise durch
Tubuslänge und Ocular so weit vergrößert, dafs sie durch ein
Auge mit mittlerer Schärfe als von einem Punkt verschieden wahr-
genommen werden, so beginnen sie die scharfe Zeichnung des
vom Objecte durch das Mikroskop entworfenen Bildes zu stören.
Die Grenze für die Vergrößerung durch Tubuslänge und Ocular
ist demgemäfs gegeben durch die Gröfse der Zerstreuungskreise
im Objectivbilde und durch die Gröfse der Sehstärke des mensch-
lichen Auges.

Es folgt hieraus, dafs, je vollkommener die Aberrationen
des Objectivs beseitigt sind, eine um so stärkere Vergrößerung
angewendet werden kann, ein in der Praxis vielfach benutztes
Kriterium für die Güte eines Objectivs.

Im Mikroskope entstehen nun noch eine Reihe anderer
Bilder, die Oeffnungsbilder, auf deren wichtige Bedeutung
Abbe¹⁾ zuerst aufmerksam gemacht hat. Das Licht, welches
vom Beleuchtungsspiegel durch Object und Objectiv tritt, ver-
einigt sich oberhalb der Focalebene des Objectivs in einen kleinen
Kreis. Man kann denselben als kleine helle Scheibe über dem

¹⁾ Max Schultze's Archiv f. Anat. 9. Bd. p. 419.

Objectiv schweben fehen, wenn man das Ocular eines Mikroskops entfernt und in den Tubus hineinblickt. Von diesem Bilde erzeugt das Ocular an der Stelle der stärksten Zusammenschnürung der Strahlenbüschel ebenfalls ein Bild, welches man über dem Ocular beobachten kann. Es entsteht in dem Augenpunkt, an derjenigen Stelle, an welche die Pupille des durch das Mikroskop blickenden Auges gebracht wird.

Die Gröfse dieses Oeffnungsbildes oberhalb des Oculars hängt von der Vergrößerung des Mikroskopes ab, je stärker diese ist, desto kleiner ist der Durchmesser des Ocularbildes. So lange das Ocularbild größer als die Pupille ist, so lange also die Pupille vollkommen mit Licht ausgefüllt wird, ist die Helligkeit des Bildes (abgesehen von den in den Linfen stattfindenden Lichtverlusten durch Abforption und Reflexion) dieselbe wie diejenige des Objectes. Wird aber der Durchmesser des Ocularbildes kleiner als die Pupille, so nimmt die Helligkeit sehr schnell ab und zwar proportional dem Quadrate der Vergrößerung. Helmholtz berechnet¹⁾ die Normalvergrößerung d. h. diejenige Vergrößerung, bei welcher der Durchmesser des Ocularbildes gleich derjenigen der Pupille ist, bei welcher also die Pupille gerade noch vollkommen mit Licht erfüllt ist aus der Formel

$$N_o = \frac{s}{p} \sin \alpha$$

wo N_o die Normalvergrößerung, s die deutliche Sehweite des Auges, p die halbe Pupillenöffnung und α der halbe Oeffnungswinkel des Objectivs ist. Nimmt man $s = 250$ mm, $p = 1,5$ mm. und $\alpha = 90^\circ$ (äußerster Werth) an, so ergibt sich für die Normalvergrößerung die Zahl 166.7. Daraus folgt:

Wenn bei einer Vergrößerung von 166,7 mal die Helligkeit = 1 ist,
 so ist » » » » 333,4 » » » = $\frac{1}{4}$,
 » » » » 500,1 » » » = $\frac{1}{9}$

u. f. f. und es ist eine den Mikroskopikern sehr bekannte Thatfache, dafs bei starken Vergrößerungen die Helligkeit schnell abnimmt, weshalb zu denselben die Benutzung des Sonnenlichtes empfohlen wurde (Listing). —

¹⁾ Pogg Ann. Jubelband p. 566—569.

Eine kleine helle Lichtquelle dicht vor dem Auge, wie das Ocularbild es ist, ist das beste Mittel um die fogenannten entoptischen Erscheinungen im Auge sichtbar zu machen, welche entstehen durch Schatten auf der Netzhaut, entworfen von Objecten, die sich auf der Hornhaut (Feuchtigkeit, Risse u. dergl.) und in den Flüssigkeiten des Auges befinden (*mouches volantes*). Wenn man in ein Mikroskop mit starker Vergrößerung schaut, so sieht man das ganze Gesichtsfeld erfüllt mit kleinen Bläschen etc., welche sich über dasselbe bewegen. Diese Erscheinung kann allerdings unterdrückt werden, sie kann aber bisweilen auch sehr störend wirken.

Ein fernerer Uebelstand, welcher bei starken Vergrößerungen entsteht, geht aus dem Folgenden hervor. Dadurch, daß die Pupille in den Ort des Ocularbildes gebracht wird, ist die ganze Wirkungsweise so, als wenn man das Bild durch eine Oeffnung von dem Durchmesser des Ocularbildes betrachtet, und wenn diese Oeffnung klein wird, so treten an den Rändern derselben Beugungsercheinungen auf, wie man sie leicht beobachten kann, indem man durch ein feines Loch in einem Kartenblatt oder in Staniol nach hell beleuchteten Objecten blickt. Diefelben erscheinen umgeben von einer Reihe farbiger Säume. Helmholtz fand, daß beim Schauen durch eine Oeffnung von 1 mm. Durchmesser diese farbigen Säume so störend wurden, daß er Buchstaben und farbige Gitter nicht mehr deutlich zu erkennen vermochte. Er berechnete, daß die farbigen Säume einem Auge mit einer Sehschärfe von einer Minute sichtbar zu werden beginnen, bei einem Durchmesser von 1,89 mm. des Ocularbildes; (in Berechnung gezogene Wellenlänge $\lambda = 0,55$ mm.); diesem Durchmesser entspricht nach der Formel auf Seite 30 eine Vergrößerung von 264,5 Mal.

Mit diesem Allen stimmt vollkommen überein das Urtheil der Mikroskopiker, daß bei einer mittleren Vergrößerung am vortheilhaftesten gearbeitet und am bequemsten beobachtet werde; Mohl gibt in seiner Mikrographie 3—400 Mal, Harting 340 bis 450 Mal als die beste Vergrößerung an.

Die Leistungen verschiedener Mikroskope pflegen nun gewöhnlich mit einander verglichen zu werden nach der Kleinheit der Objecte, welche noch mit ihrer Hülfe erkannt werden können. Dazu wählt man meistens Systeme von Streifen, wie sie auf Schmetterlingschuppen und Diatomeenpanzern vorkommen. Möller in Wedel verfertigt für diesen Zweck Diatomeen-Test-Platten, welche eine Reihe von 20 Diatomeen enthalten, in denen die Feinheit der Streifungen von der einen zur andern fortschreitet, von den gröberen wie *Triceratium* über *Pleurosigma angulatum* etc. bis *Frustulia* und *Amphipleura*, welches letztere Object nur von den besten Systemen aufgelöst wird. Und ebenso verfertigt Nobert in Barth Probeplatten mit Systemen von auf Glas eingeritzten feinen Linien, deren Abstände von Gruppe zu Gruppe kleiner werden.

Bei derartigen fein gestreiften Objecten ist aber der Strahlenverlauf des durch sie hindurchtretenden Lichtes ein ganz anderer, als bei Gegenständen von grösseren Dimensionen. Das Licht, welches auf das Object fällt, pflanzt sich von diesem nicht nur geradlinig fort, sondern breitet sich durch Beugung nach allen Seiten aus. Wenn Licht durch eine feine Oeffnung fällt, so wird jeder Punkt der Oeffnung selbstleuchtend und sendet Licht nach allen Richtungen hin aus. Verlangt man, das das vom Objectiv entworfene Bild dem Objecte möglichst ähnlich sei, so muss das Objectiv auch alles vom Objecte kommende Licht aufnehmen, der Oeffnungswinkel des Objectivs muss also für derartige feine Objecte sehr gross sein und dieses ist der Grund, weshalb man in neuerer Zeit die Grösse des Oeffnungswinkels der Mikroskop-objective so sehr gesteigert hat, wie es bei keinem anderen optischen Instrumente üblich ist.

Wenn Licht auf ein Gitter mit so feinen Interstitien fällt, wie bei den mikroskopischen Testobjecten, so wird es nach allen Seiten hin abgelenkt und es entsteht aus der Interferenz der einzelnen zusammenwirkenden Strahlen das Beugungsspectrum. In der Mitte desselben, in der Richtung des auffallenden Lichtes, ist die grösste Helligkeit, nach beiden Seiten hin wechseln Maxima

und Minima der Intensität mit einander ab, nach Gesetzen, deren Entwicklung nicht hierher gehört. Die Helligkeit nimmt von einem Maximum zum andern nach beiden Seiten hin sehr schnell ab. Es ergibt sich bei der Untersuchung dieser Erscheinungen, daß bei normal auf das Gitter fallendem Licht im Beugungsbilde Maxima der Intensität in solchen Winkelabständen α von der Normalen stattfinden, für welche $\sin \alpha = 0, = \frac{\lambda}{d}; = 2 \frac{\lambda}{d}; = 3 \frac{\lambda}{d};$ etc. ist, wobei λ die Wellenlänge der in Betracht kommenden Lichtstrahlen, d der mittlere Abstand der Gitterfläbe von einander ist.

Diese Interferenzbilder der abgebeugten Strahlen kann man sehr leicht im Mikroskop beobachten, wenn man z. B. *Lepisma saccharinum* oder ein ähnliches Object unter das Objectiv legt und, nach Wegnahme des Oculars, in den Tubus hinab auf das über dem Objectiv schwebende Oeffnungsbild schaut. Dann sieht man dasselbe umgeben von einer Anzahl farbiger Ringe. Blendet man diese durch Anbringung passender Blenden ab, so verschwinden in dem (mit dem Ocular betrachteten) Bilde sämtliche feinere Details der Zeichnung, alle feinen Streifungen des Objects, nur die groben Umrisse bleiben stehen. Es ist dieses ein Beweis, welche wesentliche Rolle die abgebeugten Strahlen bei der Abbildung feinerer Objecte spielen. Außerdem folgt hieraus, daß das vom Mikroskop erzeugte Bild dem Objecte nur dann vollkommen ähnlich ist, wenn der ganze Beugungsbüschel von dem Objectiv aufgenommen wird.

Zu diesem Zwecke muß der Oeffnungswinkel des Objectivs eine bedeutende Größe haben. Es ergibt sich aus dem Obigen daß das Objectiv noch das erste, zweite, dritte u. f. w. Intensitätsmaximum des Beugungsbildes aufnimmt, wenn der Sinus seines halben Oeffnungswinkels (α) $= \frac{\lambda}{d}, 2 \frac{\lambda}{d}, 3 \frac{\lambda}{d}$ u. f. w. ist. Da die Intensität nach den Seiten des Beugungsbildes schnell abnimmt, so beschränken wir uns auf die Forderung, daß das erste Maxi-

num noch durch das Objectiv gehen solle, woraus sich die Forderung für den halben Oeffnungswinkel ergibt

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d}$$

Liegt nun ein Objectiv mit gegebenem Oeffnungswinkel vor, so folgt die kleinste Gröfse der Objecte, welche noch vollkommen abgebildet werden, aus der Gleichung

$$d = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$$

oder wenn man unter λ die Wellenlänge des Lichtes in Luft verstehen will,

$$d = \frac{\lambda}{n \sin \alpha}$$

Die Gröfse der noch untercheidbaren Einzelheiten eines Objectes hängt demgemäfs von dem Werthe des Productes $n \sin \alpha$ ab, wobei n der Brechungsexponent bezogen auf Luft desjenigen Mittels ist, aus welchem die Lichtstrahlen in das Objectiv übergehen, sei es nun wie bei den Trockensystemen Luft oder wie bei den Immersionsystemen die Immersionsflüssigkeit. Durch Einführung dieser Gröfse $n \sin \alpha$, welche von Abbe die numerische Apertur genannt wurde, sind also Trocken- und Immersionssysteme direct mit einander vergleichbar in Bezug auf ihre Leistung im Abbilden sehr kleiner Objecte.

Bisher wurde stets centrale Beleuchtung vorausgesetzt, es ist aber eine den Mikroskopikern bekannte Thatfache, dafs die Auflösung schwieriger Objecte häufig nicht mit centraler Beleuchtung gelingt, wohl aber bei Anwendung einer passenden schiefen Incidenz der beleuchtenden Strahlen. Da in diesem Falle die Strahlen auf den beiden Rändern der Interstitien in den Objecten bereits mit einem Phasenunterschied ankommen, so addirt sich dieser zu dem Phasenunterschied der abgebeugten Strahlen und es läfst sich zeigen, dafs in den Formeln für die Lage der Maxima im Beugungsbilde überall $2 \sin \alpha$ an die Stelle von $\sin \alpha$ tritt. Es wird für schiefe Beleuchtung also die Gröfse der noch erkennbaren Einzelheiten

$$d = \frac{\lambda}{n 2 \sin \alpha} = \frac{1/2 \lambda}{n \sin \alpha}$$

Es lassen sich demzufolge mit schiefer Beleuchtung noch Streifen im Objecte erkennen, deren Abstand nur die Hälfte derjenigen beträgt, welche bei centralem Lichte gesehen werden.

Aus den Ausdrücken für d geht hervor, daß die Grenze der Leistung eines Mikroskops weiter hinausgeschoben wird, wenn man Strahlen von kürzerer Wellenlänge (λ) anwendet. Dem entspricht die Wahrnehmung, daß blaues Licht häufig besser als weißes geeignet ist, besonders feine Strukturverhältnisse der Objecte sichtbar zu machen und daß bei Herstellung photographischer Abbildung mikroskopischer Objecte Details verzeichnet werden, welche das Auge nicht mehr wahrzunehmen vermag.

Ferner folgt aus den Ausdrücken für d , daß diese Größe um so kleiner wird, je größer n ist, je stärker brechend das Mittel zwischen Objectiv und Object ist. Es erklärt sich hieraus das Uebergewicht der Immersionsysteme über die Trockensysteme. Bis vor Kurzem ward als Immersionsflüssigkeit stets Wasser benutzt (Brechungsexponent 1,33), die Grenze ist hier offenbar gegeben in der Benutzung einer Flüssigkeit von dem Brechungsverhältnisse des zu der untersten Linse des Objectivs und zu dem Deckgläschen verwendeten Crown-Glases. Vom Object bis zu dem Objectiv befindet sich dann eine homogene Masse.

Das Princip der homogenen Immersion ist zuerst von J. W. Stephenson¹⁾ angegeben worden. Abbe²⁾ nahm diese Aufgabe auf, entwickelte die theoretischen Bedingungen für ihre Erfüllung und ließ solche Objective in der Zeiss'schen Werkstätte anfertigen. Mit Systemen für homogene Immersion wird also die Grenze des überhaupt Möglichen hart gestreift, die Erörterung der übrigen Vortheile solcher Objective, als die Vermeidung von Reflexen, der Wegfall der Correctionsfassung etc. gehört nicht hierher.

Es bleibt nun noch übrig die Grenze der Leistungsfähigkeit der Mikroskope, wie sie durch die Natur der Beugungserscheinungen gegeben ist, in Zahlen auszudrücken.

¹⁾ Journal of the mikroskop. Society 1878 p. 51.

²⁾ Sitzungsber. der Jena'schen Ges. f. Med. u. Naturw. 10 Jan. 1879.

Bei Trockenystemen ist	$n \sin \alpha$
bei einem Oeffnungswinkel von 105° die numerische Apertur	0,80
» » » » 110° » » »	0,85
» » » » 130° » » »	0,90

Der mögliche weitere Fortschritt in der numerischen Apertur ist also nur noch gering, selbst wenn man bis an die Grenze des Oeffnungswinkels (180°) gelangen könnte. Die größte numerische Apertur, welche Zeiss bei Wasserimmersion-Systemen erreicht hat, ist nach Abbe 1,10. Man wird also als Grenze für $n \sin \alpha$ 1,2 setzen können.

Nimmt man zur weiteren Berechnung für λ 0,55 mm. an, entsprechend Strahlen aus der hellsten Stelle des Spectrums, so ergibt sich als Grenzwert für d unter Anwendung von schiefer Beleuchtung 0,23 mm. Dieses ist also die Gröfse der kleinsten Details, welche mit Wasser-Immersionssystemen noch unterschieden werden können.

Dieser theoretisch gefundene Grenzwert stimmt sehr gut überein mit den Dimensionen der Streifenabstände bei den in der practischen Mikroskopie als an der Grenze der Auflösbarkeit stehend erkannten Testobjecten, wie die folgenden Angaben zeigen:

Möllers Test-Diatomeen:	Streifenabstand
Pleurosigma angulatum	0,50 mm.
Surirella Gemma	0,32 »
Frustulia saxonica	0,29 »
Amphipleura pellucida	0,28 »
Noberts Probeplatten	
Platte von 30 Gruppen; feinste Gruppe	0,28 »
Platte von 10 Gruppen; feinste Gruppe	0,226 »
Otto Müllers ¹⁾ Beobachtungen mit Drath- netzbildchen; kleinstes noch erkennbare Netz	0,29 »

Rechnet man nun aus, welche Vergrößerung nothwendig ist, um Details von dieser Gröfse bequem wahrzunehmen, so ergibt

¹⁾ Vergleichende Untersuchungen neuerer Mikroskopobjective. Berlin 1873. Tabelle I.

sich eine Vergrößerung von etwa 800 Mal. Eine bedeutende Steigerung über diese Zahl hat für den praktischen Erfolg keinen Werth, da durch keine noch so starke Vergrößerung dem Objectivbilde hinzugefügt werden kann, was nun einmal in Folge der angeführten Urfachen nicht darin enthalten sein kann.

Die Abbe-Zeiss'schen Systeme mit homogener Immersionsflüssigkeit gehen noch etwas weiter als die Wasser-Immersionssysteme. Der Brechungsexponent des als Immersionsflüssigkeit von Abbe gewählten Cedernholz-Oels ist 1,51, der Oeffnungswinkel der Objective ca. 114° , was eine numerische Apertur von 1,27 ergibt; der Fortschritt soll sich in der That durch eine Steigerung des Unterscheidungsvermögens bemerkbar machen.

In kleinen Schritten wird es der Theorie und Praxis vereint gelingen, noch etwas weiter die Leistungen der Mikroskope zu vervollkommen, nahe an der Grenze befindet man sich aber bereits seit längerer Zeit und jede Nachricht von erheblichen Fortschritten wird mit Vorsicht aufzunehmen sein. —

Nachschrift. Bei dem Niederschreiben der obigen Zeilen beschäftigt, erhielt ich durch die Güte des Herrn Prof. Abbe einige seiner neuesten Veröffentlichungen zugestellt. Aus denselben ist ersichtlich, daß es nach Ueberwindung nicht unbedeutender Schwierigkeiten, welche sich der practischen Ausführung entgegenstellten, Herrn Zeiss gelungen ist, ein System nach dem Principe der homogenen Immersion herzustellen, welches eine numerische Apertur von 1,40 besitzt, entsprechend dem Oeffnungswinkel von 138° ¹⁾. Außerdem hat Abbe es versucht, die chromatische Aberration für Axen- und Randstrahlen gleichzeitig zu heben,²⁾ wobei es allerdings nothwendig wurde, den in diesem Falle auftretenden Fehler der ungleichen Farbenvergrößerung in den äußeren Theilen des Gesichtsfeldes durch eine nur diesem Zwecke dienende Linsencombination zu vernichten.

Hamburg, Februar 1880.

¹⁾ E. Abbe. On New Methods for Improving Spherical Correction applied to the Construction of Wide-angled Object-glasses. Journ. of the R. Microsc. Soc. 1879 p. 821.

²⁾ Ebendasselbst p. 815—819.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins in Hamburg](#)

Jahr/Year: 1880

Band/Volume: [NF_4](#)

Autor(en)/Author(s): Krüss Hugo

Artikel/Article: [Ueber die Grenze der Leistungsfähigkeit der Mikroskope 24-37](#)