

H. Ambronn, *Farbenerscheinungen an den Grenzen farbloser Objecte im Mikroskop.* Mit einer Figur.

Wird ein farbloses Object in einem farblosen Medium eingebettet, so kann man die Grenzen zwischen dem Object und dem umgebenden Medium nur dann wahrnehmen, wenn die Brechungsexponenten der beiden Körper für die bei der Beobachtung benutzten Lichtstrahlen verschieden sind. Diese Bedingung ist im Allgemeinen immer erfüllt, wenn man im weissen Lichte beobachtet. Die Gründe dafür, dass man unter diesen Umständen die Grenze deutlich sieht, selbst wenn keine für das Auge bemerkbare Verschiedenheit der Absorption vorliegt, sind durch die *Ambronn'sche* Theorie der secundären Abbildung klargelegt worden. Nach dieser Theorie kann die Grenze nur dann in der dem Object conjugirten Ebene abgebildet werden, wenn von dem abgelenkten Licht, das durch die Nebeneinanderschichtung der beiden verschieden brechenden Körper erzeugt wird, wenigstens ein Theil in das Objectiv aufgenommen wird.

Legt man ein gewöhnliches Deckgläschen in eine farblose Flüssigkeit von erheblich anderem Brechungsvermögen, z. B. in Wasser oder Monobromnaphthalin, so sieht man die Grenze zwischen beiden Körpern vollkommen deutlich; sie erscheint bei Anwendung gut corrigirter Objective, besonders der Apochromate, unter Benutzung centraler Beleuchtung und bei genauer Einstellung vollständig farblos als dunkle Linie. Diese vollständige Farblosigkeit ist nun aber, wie im Nachstehenden gezeigt werden soll, selbst bei Anwendung apochromatischer Systeme von geringer numerischer Apertur und bei engen Beleuchtungskegeln durchaus nicht immer vorhanden. Sie ist vielmehr noch an eine weitere Bedingung geknüpft; sie tritt nur dann ein, wenn die Brechungsexponenten beider Körper *erheblich* von

einander verschieden sind. Weichen hingegen die Werthe für die Brechungsexponenten nur um wenige Einheiten in der dritten Decimale von einander ab, so beobachtet man im weissen Lichte an der Grenze gewisse oft sehr lebhaftes Farbenscheinungen, die sowohl für die Theorie des Mikroskopes wie auch für manche praktische Zwecke von einigem Interesse sind.

Es ist eine Erfahrungsthatsache, dass farblose flüssige Körper und farblose feste Körper, deren Brechungsexponenten für eine mittlere Farbe, z. B. für die *D*-Linie übereinstimmen, eine beträchtliche Verschiedenheit in der Dispersion zeigen. Es ist nämlich unter diesen Umständen immer der Werth $n_F - n_C$ für die Flüssigkeit grösser als für den festen Körper. Infolge dessen ist n_C für die Flüssigkeit kleiner als für den festen Körper und n_F für die Flüssigkeit grösser als für den festen Körper.

Hieraus ergibt sich für die Beobachtung im weissen Lichte eine eigenthümliche Ablenkung der mit streifender Incidenz an der Grenze beider Körper einfallenden Strahlen. Das gelbe Licht geht ohne jede Veränderung durch beide Körper hindurch und erleidet infolge dessen auch keine Beugung. Eine Abbildung der Grenze durch die gelben Strahlen ist also unmöglich, das Object verhält sich für diesen Bezirk des Spectrums wie eine homogene Schicht. Für die übrigen Strahlen ist das Object aber nicht homogen. Würde man z. B. im monochromatischen blauen Lichte beobachten, so müsste die Grenze in Folge der nun eintretenden Beugungserscheinungen wieder sichtbar sein, ebenso natürlich im rothen Lichte. Beobachtet man aber in weissem Lichte, so tritt ausser diesen Interferenzwirkungen für die einzelnen Strahlenbezirke, die sämmtlich nur die Sichtbarkeit der Grenze überhaupt ermöglichen, an Lamellen von grösserer Dicke noch eine andere Erscheinung auf. Die mit streifender Incidenz einfallenden Strahlenbüschel erfahren an der Grenze eine Veränderung, die mit jenen Beugungserscheinungen, wie sie besonders von QUINCKE¹⁾ an sehr dünnen Lamellen untersucht wurden, zunächst nichts zu thun haben. Die gelben Strahlen werden geradlinig fortgepflanzt, sie erzeugen in der hinteren Brennebene des Objectivs oder des ganzen Mikroskops ein directes Bild der Lichtquelle, eine Abbildung der Grenze

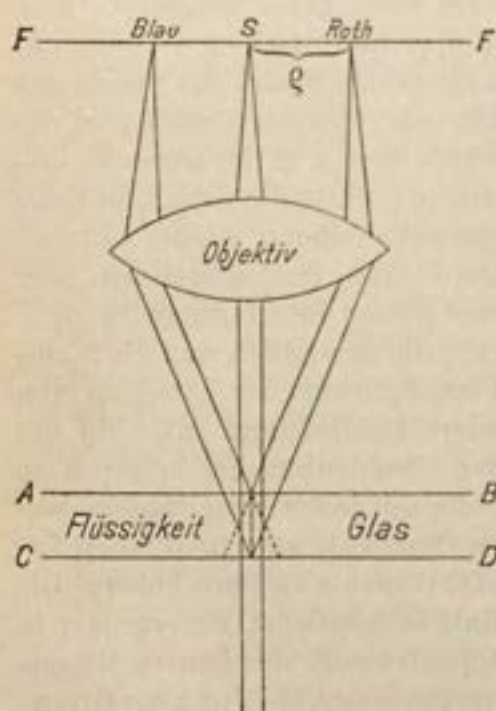
¹⁾ QUINCKE, Poggend. Ann. Bd. CXXXII, vergl. auch JOCHMANN ebda. Bd. CXXXVI.

kann aber durch sie nirgends ermöglicht werden. Die übrigen Strahlen erfahren eine mehr oder minder beträchtliche Ablenkung, da gerade unter solchen Umständen schon geringe Verschiedenheiten in den Brechungsexponenten eine erhebliche Verschiedenheit in den zu den einzelnen Strahlen gehörenden Grenzwinkeln der Totalreflexion hervorrufen. Wird dieser Winkel mit e , die Brechungsexponenten der Flüssigkeit mit n , die des festen Körpers mit n' bezeichnet und geben die Indices C und F den zugehörigen Bezirk des Spectrums an, so gelten die Gleichungen:

$$\sin e_C = \frac{n_C}{n'_C}, \quad \sin e_F = \frac{n'_F}{n_F},$$

wo also $n_C < n'_C$ und $n_F > n'_F$. Da die Sinus der Winkel in der Nähe von 90° nur sehr langsam sich verändern, so entspricht schon einer geringen Differenz der Brechungsexponenten eine nicht unbeträchtliche Aenderung des Grenzwinkels.

Die mit streifender Incidenz einfallenden rothen Strahlen werden also nach dem festen Körper hin, die blauen hingegen nach der Flüssigkeit hin abgelenkt, wie dies aus beistehender schematischer Zeichnung ersichtlich ist.



Für ein bestimmtes Beispiel sind die Brechungsexponenten sowie die Winkel α , unter denen die abgelenkten Strahlen die Axe des Mikroskops schneiden (Complementwinkel d. Grenzwinkel d. Totalreflexion) für verschiedene Spectralbezirke zusammengestellt. Die beiden Körper sind Glas und eine Mischung von Monobromnaphthalin mit Xylol. Die Werthe für die Brechungsexponenten sind z. Th. nach der CAUCHY'schen Dispersions-

formel mit zwei Constanten näherungsweise berechnet worden, da eine grössere Genauigkeit hierbei kaum nöthig war.

	Glas	Flüssigkeit	α
n_B	1,5434	1,5097	4°
n_C	1,5444	1,5446	$3^\circ 30'$
n_D	1,5470	1,5470	0°
n_E	1,5204	1,5236	$3^\circ 40'$
n_F	1,5234	1,5296	$5^\circ 40'$
n_G	1,5290	1,5406	7°
n_H	1,5335	1,5500	$8^\circ 20'$

Für das Bild der Lichtquelle — eines weit entfernten Spaltes — in der hinteren Brennebene FF des Objectivs ergibt sich hieraus (vgl. die Figur) Folgendes: In der Mitte bei S wird ein directes Bild des Spaltes entworfen, es wird erzeugt durch die mit streifender Incidenz einfallenden gelben und die nicht mit streifender Incidenz einfallenden weissen Strahlen. Die Vereinigung der abgelenkten Strahlen findet in derselben Ebene in bestimmter Entfernung von dem mittleren directen Bilde statt, da sie von den gleichfalls in weiter Entfernung liegenden virtuellen farbigen Spaltbildern ausgehen, die durch die Brechung an der Grenze entworfen werden. Es wird also in der hinteren Brennebene aus den verschiedenen nebeneinander liegenden reellen Bildern der Lichtquelle ein vollständiges Spectrum entstehen, wie dies ja in ähnlicher Weise auch bei dem PULFRICH'schen Refractometer der Fall ist, wenn man statt mit monochromatischem mit weissem Lichte beobachtet.

In dem gewählten Beispiel, das durch die Figur schematisch dargestellt ist, liegen also Grün, Blau, Violett auf der linken Seite, Orange und Roth auf der rechten Seite von S . Die Entfernung der einzelnen Farben von S , die durch ϱ bezeichnet werden soll, hängt von der Brennweite des Objectivsystems und von dem Winkel ab, unter dem die aus dem ganzen Präparat aus tretenden Strahlen die Axe schneiden. Berücksichtigt man noch die weiteren Ablenkungen, die durch den Uebertritt in Luft erfolgen, so kann man aus der Brennweite und der Entfernung ϱ den Winkel, unter dem eine bestimmte Strahlengattung die Axe schneidet, berechnen; aus diesem erhält man dann leicht auch den Winkel der Totalreflexion und somit das Verhältniss der Brechungsexponenten beider Körper für die betreffende

Farbe. Wird der Winkel, unter dem die austretenden Strahlen die Axen schneiden, mit u bezeichnet, so gilt, wie ABBE gezeigt hat, die Beziehung:

$$\frac{q}{\sin u} = f,$$

worin f die Brennweite des Objectivsystems ist. Die Grösse q lässt sich leicht direct messen, wenn man ein sog. Hilfsmikroskop einschaltet, wie es zur Bestimmung der numerischen Apertur mit dem ABBE'schen Apertometer oder bei Beobachtung der Axenbilder doppelbrechender Krystalle benutzt wird.

Hat man nun die Dispersionsverhältnisse der angewandten Flüssigkeit genau bestimmt, so ergibt eine einfache Rechnung, unter Berücksichtigung der Werthe q für die einzelnen Farben, auch die Dispersion des zu untersuchenden festen Körpers.

Das directe Bild der Lichtquelle muss stets an der Stelle des in der Austrittspupille des Objectivs entworfenen Spectrums liegen, für die der Brechungsexponent der aneinander grenzenden Körper den gleichen Werth hat. Benutzt man ein Flüssigkeitsgemisch, wie das oben angegebene aus Monobromnaphthalin und Xylol, und schützt dieses nicht genügend vor Verdunsten, so lässt sich sehr gut beobachten, wie das Spectrum sich allmählich verschiebt und das directe Spaltbild in das Roth zu liegen kommt. Dies rührt daher, dass das Xylol schneller verdunstet als das Monobromnaphthalin, wodurch der Brechungsexponent der Flüssigkeit allmählich höher wird. Bei einem anderen Gemische, in dem der stärker brechende Körper schneller verdunstet, tritt natürlich die umgekehrte Verschiebung ein¹⁾.

Es bleibt nun noch kurz zu erörtern, welche Wirkung diese Ablenkung der mit streifender Incidenz einfallenden Strahlen

1) Das in der hinteren Brennebene entworfene Spectrum zeigt übrigens an manchen Stellen Intensitätsunterschiede, die jedenfalls mit den ausserdem noch in derselben Ebene auftretenden Beugungsbildern für die einzelnen Strahlen in Zusammenhang stehen. Besonders deutlich beobachtet man eine Reihe dunklerer Streifen, wenn die Brechungsexponenten nicht für eine mittlere Farbe, sondern für Roth oder Violett übereinstimmen, oder wenn das ganze Spectrum auf der einen Seite des directen Spaltbildes liegt. Die von QUINCKE genauer studirten Beugungserscheinungen an sehr dünnen Lamellen müssen ja auch in ähnlicher Weise an dicken Lamellen auftreten, wenn die Brechungsexponenten der beiden Körper nur geringe Verschiedenheiten zeigen.

auf das eigentlich mikroskopische Bild des Objectes — in der dem Object conjugirten Ebene — ausüben wird. Eine eingehende theoretische Untersuchung dieser Frage vermag ich allerdings nicht zu geben, ich glaube aber, dass folgende einfache Ueberlegung den Sachverhalt richtig wiedergiebt. Stellt man auf die obere Ebene des Präparats (AB in der Figur) ein, so müssen die der Grenze zunächst liegenden Partien — wie dies auch die Beobachtung bestätigt — farbig erscheinen, und zwar muss bei gleichem n_D der Rand des Glases röthlich, der Rand der Flüssigkeit bläulichgrün erscheinen, weil sie ja von den abgelenkten Strahlenbüscheln der betreffenden Farben beleuchtet werden; die Grenze selbst erscheint dabei als zarte dunkle Linie zwischen den beiden Farbenrändern. Stellt man dagegen auf die untere Ebene CD ein, so wird sich infolge der Richtung der abgelenkten Büschel die Farbenscheinung gerade umkehren, jetzt muss der Rand des Glases blaugrün und der Rand der Flüssigkeit röthlich erscheinen, was ebenfalls die Beobachtung sofort bestätigt. Bei einer mittleren Einstellung zwischen AB und CD treten allerhand andere Färbungen auf und die Grenze selbst wird undeutlicher.

Die im Vorstehenden geschilderten Farbenscheinungen sieht man am schönsten bei Anwendung von Systemen mit langer Brennweite, so z. B. mit dem ZEISS'schen Systeme aa und dem schwachen apochromatischen Systeme von 46 mm Brennweite. Dass sie gerade unter diesen Umständen so deutlich zu sehen sind, beweist auch, dass sie nicht etwa in der Construction der Objectivsysteme begründet sind. Die Reste der chromatischen Abweichungen, die ja ähnliche Erscheinungen hervorrufen könnten, sind bei den Apochromaten fast vollständig beseitigt und kommen auch bei dem System aa (Brennweite 26 mm) kaum in Betracht. Das Spectrum in der hinteren Brennebene und ebenso die Farbenränder in dem eigentlichen mikroskopischen Bilde müssen deshalb ihren Grund in dem Objecte selbst haben¹⁾.

Von praktischer Bedeutung sind diese Farbenscheinungen für die Bestimmung der Brechungsexponenten mikroskopischer

1) Aehnliche Farbenscheinungen sind übrigens auch schon an Gemischen von Pulvern und Flüssigkeiten von C. CHRISTIANSEN beobachtet worden. Vgl. WIEDEMANN'S Annalen XXIII S. 302 u. XXIV S. 444.

Objecte, an denen man keine ebenen Flächen anschleifen kann. Eine einfache Ueberlegung ergibt, dass die Grenze beider Körper durchaus nicht eine ideale Ebene zu sein braucht, wenn die Farbenränder eintreten sollen; sie kann vielmehr ganz erheblich anders gestaltet sein, und trotzdem bleibt der Strahlengang nahezu derselbe, was auch die Beobachtung sofort bestätigt. Nach meinen bisherigen Erfahrungen lässt sich die Bestimmung der Brechungsexponenten mittels dieser Farbenererscheinungen bis zu einer Einheit in der dritten Decimale ausführen, was im Vergleich mit den bisher bei mikroskopischen Objecten angewandten Methoden als eine Verbesserung anzusehen ist. Man verfährt bei kleinen Objecten am besten in folgender Weise: Aus einer Reihe von Flüssigkeitsgemischen, deren Brechungsexponenten etwa um je fünf Einheiten in der dritten Decimale verschieden sind, sucht man sich diejenige heraus, in der die farbigen Ränder am deutlichsten auftreten; man ist dann sicher, dass der Werth für n_D in beiden Körpern nicht mehr sehr verschieden ist. Nunmehr beobachtet man in Natriumlicht, was bei den angewandten schwachen Systemen genügend helle Bilder liefert und variirt den Brechungsexponenten der Flüssigkeit noch innerhalb geringer Grenzen. Auf diese Weise findet man dann bald eine Mischung, in der die Grenzen vollständig verschwinden. Bei einiger Uebung lässt sich auf diese Weise die Bestimmung von n_D in verhältnissmässig kurzer Zeit ausführen. Hat man grössere Flächen zur Verfügung, z. B. Spaltungslamellen von Krystallen, so kann man durch Beobachtung des Spectrums in der hinteren Brennebene des Objectivs noch rascher zum Ziele kommen und zugleich in der oben angegebenen Weise die Werthe von n für verschiedene Strahlen berechnen.

Es lässt sich diese Methode auch bei anisotropen Körpern mit Erfolg anwenden, nur muss dann ein Nicol'sches Prisma in passender Weise eingeschaltet werden. So kann man z. B. an einer Kalkspathlamelle, die in Monobromnaphthalin eingebettet ist, diese Farbenererscheinungen sehr gut beobachten, da n_D für den ordentlichen Strahl des Kalkspaths und für die Flüssigkeit fast vollständig übereinstimmt, und die Werthe für n der Reihe nach mit guter Annäherung berechnen.