

Nachschlagewerke

Geschichte der Mikroskopie

von
Dieter Gerlach

1. Auflage

Geschichte der Mikroskopie – Gerlach

schnell und portofrei erhältlich bei beck-shop.de DIE FACHBUCHHANDLUNG

Harri Deutsch 2009

Verlag C.H. Beck im Internet:

www.beck.de

ISBN 978 3 8171 1781 9

Polarisationsmikroskopie



Legende zu umseitigem Bild:
Erasmus Bartholinus (1625–1698)

Zusammenfassung

Polarisationsmikroskope dienen der Untersuchung doppelbrechender Objekte unter Verwendung (meist linear) polarisierten Lichts. Doppelbrechung wurde erstmals im Jahre 1669 von dem Dänen Erasmus Bartholinus am Kalkspat beschrieben. Er glaubte, dass diese Erscheinung durch zwei verschiedene Arten von Lichtbrechung zustande kommt, was Huygens mit zwei verschiedenen *Fortpflanzungen* von Lichtwellen erklärte. Außerdem hatte Letzterer festgestellt, dass die beiden Lichtstrahlen, die den Kalkspatkristall verlassen, etwas unterschiedliche Eigenschaften haben müssen, wofür er aber noch keine Erklärung geben konnte. Newton glaubte, dass die Abweichung des außerordentlichen Strahles durch eine Kraft bewirkt wird, die dem Kristall inne wohnt und die auf die Lichtteilchen einwirkt. Der französische Physiker Malus entdeckte die Polarisation des Lichtes durch Reflexion und erklärte den Vorgang ebenfalls mit Newtons Lichtteilchen. David Brewster fand eine Möglichkeit, mit einem Kalkspatkristall linear polarisiertes Licht herzustellen, was William Nicol zur Erfindung seines Polarisationsprismas führte. Für den gleichen Zweck kann man auch einen Turmalin-Kristall benutzen. Diese Entdeckung gelang den Physikern Biot und Seebeck unabhängig voneinander. Brewster baute das erste Polarisationsmikroskop unter Verwendung eines einfachen Mikroskops. Talbot wandelte als Erster ein zusammengesetztes Mikroskop in ein Polarisationsmikroskop um, indem er je ein Nicol'sches Prisma als Polarisator und Analysator benutzte. Nun folgten die ersten polarisationsmikroskopischen Untersuchungen an biologischen Objekten, wobei die Doppelbrechung pflanzlicher Zellwände auffiel. Der Botaniker Ambronn fand den Grund für das Zustandekommen der Doppelbrechung an biologischen Strukturen, so dass deren submikroskopischer Feinbau mit dem Polarisationsmikroskop aufgeklärt werden konnte. Auf diesem Gebiet arbeiteten besonders intensiv der deutsche Zoologe Schmidt und der schweizer Botaniker Frey-Wyssling.

Doppelbrechung

Lange bevor man etwas vom polarisierten Licht wusste, wurde die Doppelbrechung entdeckt. Der erste Bericht darüber erschien im Jahre 1669 und stammt von dem Dänen ERASMUS BARTHOLINUS (1625–1698). Dieser hatte zunächst Medizin studiert, dann England, Holland, Frankreich und Italien bereist und wurde 1656 an der Universität Kopenhagen Professor für Mathematik. Bereits ein Jahr später übertrug man ihm den Lehrstuhl für Medizin. Diese Laufbahn gab er jedoch später wieder auf und wechselte ins Justizwesen. Bartholinus schrieb verschiedene Abhandlungen, von denen diejenige über den doppelbrechenden Isländischen Kristall als die bedeutendste gilt. Sie erschien unter dem folgenden Titel: *Erasmi Bartholini. Experimenta Crystalli Islandici Diadactastici Quibus mira et insolita Refractio detegitur. Anno 1669. Hafniae, Sumptibus Danielis Paulii Reg. Bibl.* (Versuche mit dem doppelbrechenden isländischen Kristall, die zur Entdeckung einer wunderbaren und außergewöhnlichen Brechung führten).

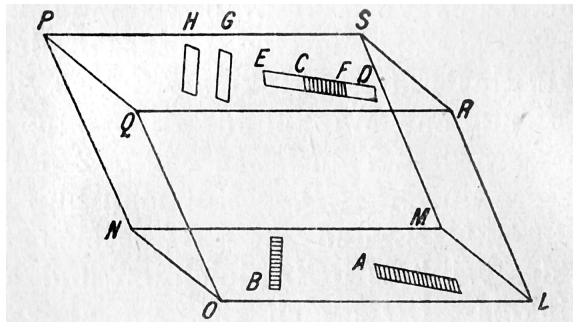
Bartholinus hatte das Mineral von dänischen Kaufleuten bezogen, die aus Island zurückgekehrt waren. Er beginnt seine Abhandlung folgendermaßen (Übers. nach Mielitner): »Hochberühmt ist bei allen Menschen der Diamant und mannigfach sind die Freuden, die dergleichen Schätze, wie edles Gestein und Perlen, gewähren, aber sie dienen doch nur zum Prunk und zum Schmuck von Finger und Hals; wer dagegen die Kenntnis seltsamer Erscheinungen dem Vergnügen vorzieht, der wird, wie ich hoffe, keine geringere Freude haben an einem neuartigen Körper, nämlich einem durchsichtigen Kristall, der vor kurzem aus Island zu uns gebracht wurde und vielleicht zu den größten Wundern gehört, welche die Natur hervorgebracht hat. Ich beschäftigte mich lange Zeit mit diesem merkwürdigen Körper und stellte verschiedene Versuche damit an, die ich nicht ungern veröffentliche ...«. Bartholinus bespricht zunächst die äußere Form der Kristalle sowie die Reibungselektrizität, die Härte und die



Erasmus Bartholinus

Spaltbarkeit. Er stellt fest, dass sich diese Mineralien beim Erhitzen in ungelöschten Kalk verwandeln und dass sie von Königswasser gelöst werden.

Doppelbrechung.
Erläuterungen im Text



Im 7. Versuch kommt er zum optischen Verhalten der Kristalle und schreibt: »Im weiteren Verlauf meiner Untersuchung des Kristalls zeigte sich eine wunderbare und außergewöhnliche Erscheinung: Gegenstände, die man durch den Kristall hindurch betrachtet, zeigten nicht wie bei anderen durchsichtigen Körpern ein ein-

faches, gebrochenes Bild, sondern sie erscheinen doppelt. Diese Wahrnehmung und ihre Erklärung beschäftigten mich längere Zeit, so daß ich deshalb andere Dinge aufschob; ich bemerkte nämlich, daß ich dioptrische Grundsätze der Refraktion berührt hatte. Bei oberflächlicher Betrachtung übersieht man diese Erscheinung leicht, jedoch kann man sie folgendermaßen feststellen: Man bringe auf einen Tisch oder auf reinem Papier irgend einen Gegenstand an, z. B. einen Punkt oder auch etwas anderes, von der Größe wie B oder A in Figur 4 und lege die untere Fläche LMNO des Rhomboids darauf. Dann betrachte man durch die obere Fläche RSPQ den Gegenstand B oder A, indem man das Auge durch die ganze Masse des Prismas RSPQOLMN hindurch zuerst auf B, dann auf A richtet. Durch andere durchsichtige Körper, wie Glas, Wasser usw., hindurch wird nun die Gestalt eines Gegenstandes gleich und einfach wieder gegeben, während man hier jeden derselben in doppeltem Bilde auf der Oberfläche RSPQ erblickt, nämlich B in G und H, A in CD und FE, wie es in Figur 4 dargestellt ist. Zu bemerken ist aber, daß der Abstand der Bilder H und G, die aus dem Gegenstand B hervorgehen, je nach der Größe des angewandten Kristallprismas bald größer und bald kleiner ist; bei dünneren Stücken ist er kaum wahrzunehmen und wächst proportional der Größe der Kristallstückchen.«

Weiter stellt Bartholinus im 9. Versuch fest: »Bei genauer Betrachtung erscheint von diesen beiden Bildern das eine etwas erhöht gegen das andere.« Außerdem fand er im 12. Versuch, dass der Abstand der beiden Bilder zueinander je nach Orientierung des Kristalls verschieden groß ausfällt.

Eine weitere Merkwürdigkeit folgt im 13. Versuch: »als eine besondere Eigenschaft unseres Kristalls erwähnten wir die, daß er einen Gegenstand doppelt wiedergibt, es muß aber noch eine andere genannt werden, die ganz eigenartig ist und den Kristall unter allen Mineralien besonders interessant macht. Wenn man nämlich Gegenstände durch durchsichtige Medien betrachtet, so bleibt ihr Bild stets und verrückbar an der gleichen Stelle, wie man auch das Medium hin und her bewegt, und nur, wenn der Gegenstand selbst verschoben wird, ändert auch sein Bild an der Oberfläche des durchsichtigen Mediums seine Lage; hier dagegen konnten wir beobachten, daß eines der beiden Bilder beweglich ist ...«. Das andere bleibt fest und unbeweglich und wird deshalb als das unbewegliche oder feste bezeichnet.

Im Versuch 16 überlegt Bartholinus, wie es wohl zur Entstehung der beiden Bilder kommt, und schließt dabei eine Reflexion an den Seitenwänden oder an Flächen, die im Inneren gelegen sind, aus. Deshalb zog er die Brechung in Betracht: »... bei Annahme von Brechung als Ursache der fraglichen Erscheinung war es daher folgerichtig, den Schluß zu ziehen, daß bei dem doppelten Bild auch eine doppelte Brechung zustande kommt. Ferner nahmen wir wahr, daß die beiden Bilder unseres isländischen Kristalls nicht gleichartig sind, sondern sich dadurch unterscheiden, daß das

eine von ihnen fest bleibt, das andere aber beweglich ist; wir beschlossen daher, die beiden Brechungsarten zu unterscheiden und bezeichneten diejenige, die das feste Bild liefert, als »gewöhnliche Brechung«, die andere aber, die das bewegliche Bild erzeugt, als »außergewöhnliche Brechung«. Den Kristall selbst nannten wir wegen der außerordentlichen und einzigartigen Eigenschaft dieser doppelten Brechung »doppeltbrechend«.

»Es lag nun die Vermutung nahe, daß diese beiden Brechungsarten auf zwei verschiedenen Grundlagen beruhen. Aus den Lehren der gewöhnlichen Dioptrik ist bekannt, daß ein Gegenstand, der in das Auge wahrnehmbare Strahlen entsendet, auf der Oberfläche eines durchsichtigen Körpers ein Bild und nur eines entwirft, solange nur eine Oberfläche vorhanden ist und untere und obere Fläche parallel sind; weiterhin, daß bei unbewegtem Auge und unbewegtem Gegenstand das Bild immer fest bleibt, auch wenn der durchsichtige Körper verrückt wird. Demzufolge konnte in unserem Falle zwar das feste Bild nach den ordentlichen Gesetzen der gewöhnlichen Brechung zustande kommen, für das Bild aber, das bei stillstehendem Gegenstand beweglich ist und im Sinne der Bewegung des durchsichtigen Körpers wandert, war die Möglichkeit einer außergewöhnlichen Brechung gegeben, die meiner Meinung nach in der Dioptrik bisher unbekannt war, aber den Gesetzen der normalen nicht unterworfen ist ...«.

Christian Huygens

Der Nächste, der sich mit dem merkwürdigen Verhalten des isländischen Kalkspates beschäftigte, war **CHRISTIAN HUYGENS** (1629–1695). In seiner Abhandlung über das Licht (siehe S. 115ff.) schreibt er im Kapitel 5 Über die eigentümliche Brechung des isländischen Spats und meint dazu: »Die Ursachen davon scheinen mir um so mehr einer sorgfältigen Untersuchung wert zu sein, als unter allen durchsichtigen Körpern dieser allein hinsichtlich der Lichtstrahlen die gewöhnlichen Gesetze nicht befolgt. Ich war gewissermaßen sogar gezwungen, diese Untersuchung anzustellen, weil die Brechungen in diesem Kristall meine vorstehende Erklärung der regelmäßigen Brechung umzustürzen schienen. Man wird jedoch im Gegenteil sehen, daß sie vielmehr zu deren Bestätigung dienen, nachdem sie auf dasselbe Grundgesetz zurückgeführt sind.«

Huygens hatte bei seinen Untersuchungen gefunden, »dass von den beiden verschiedenen Brechungen, welche der Strahl in diesem Kristall erleidet, der eine die gewöhnlichen Regeln befolgt ... Darum habe ich auch diese gewöhnliche Brechung von der anderen unterschieden ...«. Dann versucht Huygens diese Beobachtung mit seinen bereits früher entwickelten Vorstellungen über das Zustandekommen der Lichtbrechung in durchsichtigen Körpern in Einklang zu bringen und schreibt: »Erst nachdem ich, wie oben geschehen, die Brechung bei den gewöhnlichen durchsichtigen Körpern mittels kugelförmiger Lichtwellen erklärt hatte, nahm ich die Untersuchung über die Natur dieses Kristalls wieder auf, welche ich vorher durchaus nicht hatte enträtseln können.

Da zwei verschiedene Brechungen vorhanden waren, so faßte ich den Gedanken, dass es auch zwei verschiedene Fortpflanzungen von Lichtwellen gäbe, und dass die eine in der im Kristallkörper verbreiteten Äthermaterie stattfinden könnte. Da nämlich diese Materie in viel größerer Menge vorhanden ist als diejenige der Teilchen, die den Körper zusammensetzen, so mochte sie allein, gemäß den früheren Darlegungen, die Durchsichtigkeit bewirken. Ich schrieb dieser Wellenbewegung die regelmäßige Brechung zu, welche man bei diesem Steine beobachtet; nimmt man nämlich diese Wellen wie gewöhnlich als kugelförmig und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit

innerhalb des Kristalls als langsamer an wie außerhalb, so geht daraus, wie ich gezeigt habe, die Brechung hervor.«

Die andere Art der Brechung versuchte Huygens mit sphäroidischen Wellenfronten zu erklären, und er schrieb: »... hierbei nahm ich an, dass dieselben gleichermaßen sowohl in der durch den Kristall verbreiteten Äthermaterie, als auch in den ihn bildenden Körperteilchen sich fortpflanzten, entsprechend meiner letzten Erklärung der Durchsichtigkeit. Es schien mir, dass die Verteilung oder regelmäßige Anordnung dieser Teilchen dazu beitragen könnte, die sphäroidischen Wellen zu bilden (da hierzu nur erforderlich ist, dass die fortschreitende Bewegung des Lichts sich in der einen Richtung ein wenig schneller als in der anderen ausbreite) ...«.

Schließlich stellte Huygens fest, dass die beiden aus dem Kalkspatkristall hervortretenden Lichtstrahlen eine gewisse Veränderung erfahren haben und dadurch etwas unterschiedlich geworden sind, wofür er keine Erklärung fand. Denn man wusste damals noch nicht, dass es sich dabei um linear polarisiertes Licht mit zueinander senkrecht orientierten Schwingungsrichtungen handelt. Huygens schrieb: »Bevor ich die Erörterung über diesen Kristall schließe, will ich noch eine wunderbare Erscheinung hinzufügen, welche ich entdeckt habe, nachdem ich alles obige geschrieben hatte. Denn obwohl ich bis jetzt die Ursache derselben noch nicht habe aufklären können, so will ich doch darum nicht unterlassen darauf hinzuweisen, um anderen Gelegenheit zu geben, sie zu suchen. Es scheint mir, dass man dazu noch andere Voraussetzungen wird machen müssen, außer jenen, die ich gemacht habe; die letzteren werden deswegen doch ihre ganze Wahrscheinlichkeit behalten, da sie ja durch viele Beweise bestätigt sind.«

Huygens war zu diesen Äußerungen aufgrund der folgenden Überlegung gelangt: Wenn man zwei Kalkspate übereinander legt, wäre zu erwarten gewesen, dass jeder der beiden aus dem ersten Kristall hervorgetretenen Strahlen beim Verlauf durch den zweiten Kristall nochmals in je zwei Strahlen aufgespalten wird. Dem widersprach aber der folgende Versuch: Wenn man zwei Kalkspatkristalle so übereinander legt, dass »alle Seiten des einen denjenigen des anderen parallel sind, und wird alsdann ein Lichtstrahl ... in dem ersten Stück in zwei zerlegt, ... entsprechend den beiden Brechungen, der regelmässigen und unregelmässigen: so wird beim Eintritt in das andere Stück jeder Strahl weitergehen, ohne sich nochmals in zwei zu spalten; sondern derjenige, welcher von der regelmässigen Brechung herrührt ... wird nur noch eine regelmässige Brechung ... erleiden, und der andere ... eine unregelmässige.« Wenn man die beiden Kristalle so übereinander legt, dass sie einen Winkel von 90° bilden, dann wird der aus dem ersten Kristall als *gewöhnlicher* austretende Strahl im zweiten zum *ungewöhnlichen*. Waren die beiden Kristalle in einem anderen Winkel zueinander orientiert, dann wurde jeder aus dem ersten Kristall austretende Strahl – wie das zu erwarten war – im zweiten in zwei Strahlen aufgespalten, deren Intensität von der Orientierung der beiden Kristallen zueinander abhängt.

Huygens vermutete, »... daß die Lichtwellen infolge des Durchgangs durch den ersten Kristall eine gewisse Gestalt oder Anordnung erlangen ...« Weshalb sie sich beim Passieren des zweiten Kristalls anders verhalten. »Wie dies aber geschieht, dafür habe ich bis jetzt eine für mich befriedigende Erklärung nicht gefunden.«

Huygens fand die Doppelbrechung auch beim Bergkristall, nur nicht in so stark ausgeprägter Form wie beim isländischen Kalkspat.

Positive und negative Doppelbrechung

Man unterscheidet bekanntlich zwischen positiver und negativer Doppelbrechung und spricht von positiver Doppelbrechung, wenn der Brechungsindex des außerordentlichen Strahles größer ist als der des ordentlichen, falls das Licht senkrecht zur kristalloptischen Achse auf den doppelbrechenden Körper einfällt. Den Unterschied zwischen positiver und negativer Doppelbrechung hat **DAVID BREWSTER** (1781–1861) im Jahre 1818 gefunden und er schreibt in seinem Handbuch der Optik (1835): »Stellt man Versuche mit verschiedenen Krystallen an, so findet sich in einigen der ungewöhnliche Strahl gegen die Axe zu, in andern von ihr ab gebrochen. Im ersteren Falle heißt die Axe eine positive Axe doppelter Brechung, im letzteren eine negative Axe doppelter Brechung.« Ebenfalls im Jahre 1818 fand der französische Physiker **JEAN BAPTISTE BIOT** (1774–1862) die gleiche Erscheinung und er glaubte, dass dafür eine unterschiedliche Anziehungskraft durch die Achse verantwortlich ist. Deshalb bezeichnete er die positive Doppelbrechung als *anziehende* oder *attraktive* und die negative als *abstoßende* oder *repulsive*.

Polarisiertes Licht

Isaak Newton

ISAAC NEWTON (1643–1727) verglich die Kraft des Kalkspatkristalls auf das hindurchfallende Licht mit der Wirkung der Pole zweier Magnete. Er schrieb im dritten Buch seiner Optik im Zusammenhang mit der Frage 29: »... Endlich sieht die ungewöhnliche Brechung im isländischen Kristall gar sehr danach aus, als käme sie durch eine Art anziehender Kraft zu Stande, welche nach gewissen Seiten hin sowohl den Strahlen, als den Kristallteilchen inne wohnt. Denn wäre es nicht die Folge einer Art Disposition oder Kraft, die gewissen Seiten der Kristallteilchen innewohnt, anderen nicht, und die die Strahlen nach der Seite der ungewöhnlichen Brechung hin neigt oder biegt, so würden die senkrecht auf den Kristall fallenden Strahlen nicht nach dieser Seite hin mehr, als nach einer anderen gebrochen ... Und weil der Kristall durch diese Fähigkeit oder Kraft nur dann auf die Strahlen wirkt, wenn eine ihrer Seiten der ungewöhnlichen Brechung nach einer solchen Seite (im Kristall) gerichtet ist, so folgt daraus eine diesen Seiten der Strahlen innewohnende Kraft oder Fähigkeit, welche der des Kristalls ebenso entspricht oder mit ihr sympathisiert, wie die Pole zweier Magnete einander entsprechen. Und wie der Magnetismus verstärkt oder geschwächt werden kann und nur im Magnetstein und im Eisen gefunden wird, so ist diese Kraft, die senkrechten Strahlen zu brechen, größer im isländischen Kristall, kleiner im Bergkristall, und in anderen Körpern gar nicht vorhanden. Ich sage nicht, dass diese Kraft eine magnetische sei; sie scheint anderer Art zu sein; ich sage nur, was sie auch sein mag, dass es schwer zu begreifen ist, wie die Lichtstrahlen, wenn sie nicht aus Körperchen bestehen sollen, nach zwei Seiten eine dauernde Kraft besitzen können, die sie nach anderen Seiten hin nicht haben, und zwar ohne Rücksicht auf ihre Lage im Raume oder in dem Medium, welches sie durchlaufen.«

Etienne Louis Malus und die Entdeckung der Polarisation des Lichtes durch Reflexion

Eine weitere wichtige Entdeckung machte der französische Physiker **ETIENNE LOUIS MALUS** (1775–1812). Dieser war zunächst Militäringenieur und ging später als Lehrer an die Ecole polytechnique nach Paris. Er blickte im Jahre 1808 eines Abends durch ein Kalkspatprisma auf die Fenster des Palais Luxemburg in Paris, in denen sich die untergehende Sonne spiegelte. Dabei war bei einer bestimmten Orientierung des Kristalls die Spiegelung nicht, wie zu erwarten gewesen wäre, zweimal mit gleicher Helligkeit zu sehen, sondern es erschienen zwei Bilder mit unterschiedlicher Inten-

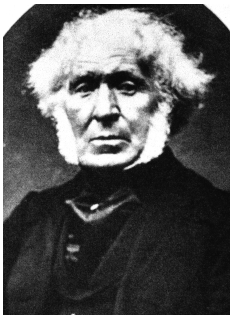


Etienne Louis Malus

sität. DOMINIQUE FRANÇOIS JEAN ARAGO, der von Malus einen mündlichen Bericht über diese Beobachtung erhalten hat, bemerkt dazu 1860 in einer Fußnote (Bd. 7, S. 313): »Man ist im Irrthum, wenn man sagt, er habe auf diese Weise das eine der Bilder verschwinden sehen: die Polarisation auf den Fensterscheiben war im Augenblicke des Versuchs nur partiell«. Außerdem fiel Malus auf, dass dieser Effekt nur dann auftrat, wenn das Licht vom Glas unter einem Winkel von $56^{\circ} 45'$ reflektiert wurde. Solches Licht hatte merkwürdigerweise fast die gleichen Eigenschaften, wie einer der beiden Lichtstrahlen, der aus dem Kalkspatkristall hervortritt. Nachdem die Sonne vollständig untergegangen war, wiederholte Malus den Versuch, indem er Kerzenlicht unter einem bestimmten Winkel auf der Oberfläche von Glas oder Wasser spiegelte und dieses Licht durch einen besonders orientierten Kalkspat betrachtete.

Malus erklärte seine Beobachtungen mit NEWTONS Emanationstheorie und nahm an, dass die kugelförmigen Lichtmoleküle bei der Reflexion gleichmäßig ausgerichtet werden, ähnlich wie die Pole von Magnetenadeln unter der Wirkung eines Magneten. Aus dieser Vorstellung leitet sich der Begriff *Polarisation* ab. Außerdem bezeichnete Malus diejenige Ebene als *Polarisationsebene*, in der sich der von der Glasoberfläche reflektierte polarisierte Strahl sowie das Einfallslot befinden, weil er glaubte, dass in dieser Ebene die Polachsen der Lichtmoleküle liegen. Sie entspricht also der Einfallsebene.

Malus bezeichnete den Winkel von $56^{\circ} 45'$, unter dem das Licht bei der Reflexion durch Glas polarisiert wird, als den *größten Polarisationswinkel*. Bei einer Reflexion unter einem kleineren oder größeren Winkel ergab sich nur eine teilweise Polarisation. Außerdem fand Malus, dass der *größte Polarisationswinkel* von dem Brechungsindex des reflektierenden Stoffes abhängt.



David Brewster

Weitere Untersuchungen führte der britische Physiker DAVID BREWSTER (1781–1861) durch, und er berichtet darüber in seinem Handbuch der Optik (1835, S. 144f.): »Durch eine sehr ausgedehnte Reihe von Versuchen, die ich mit verschiedenen festen und flüssigen Körpern anstellte, um das Maximum des Polarisationswinkels zu bestimmen, wurde ich im Jahre 1814 auf das einfache Gesetz geleitet: der Brechungsexponent ist die Tangente des Polarisationswinkels.« Diese Beziehung ist heute unter der Bezeichnung *Brewster'sches Gesetz* bekannt, während der Polarisationswinkel auch als *Brewster'scher Winkel* bezeichnet wird.

In der Praxis ist durch Reflexion selbst unter dem Brewster'schen Winkel keine vollständige lineare Polarisation des Lichts zu erzielen, weil die Oberfläche des Glases durch verschiedene äußere Einflüsse, wie Politur, Verunreinigungen und Spannungen, verändert ist. Deswegen benutzte Malus zusammen mit BIOT einen Stapel von zwölf Glasplatten, einen so genannten *Glasplattensatz* oder eine *Glasplattensäule*, wenn polarisiertes Licht durch Reflexion hergestellt werden sollte.

Von dem Licht, das auf die Glasplatte trifft, wird natürlich nur ein Teil reflektiert. Der Rest dringt in das Glas ein, wird gebrochen und ist – wie MALUS, BIOT und BREWSTER unabhängig voneinander fanden – teilweise polarisiert, jedoch in einer Richtung, die senkrecht zu der des reflektierten Lichts orientiert ist, was ebenfalls mit der Vorstellung von den polarisierten Lichtteilchen zu verstehen war. Denn man dachte sich, dass die an zwei gegenüberliegenden Polen polarisierten Kügelchen, aus denen das Licht besteht, je nach der Richtung, mit der sie auf die Glasoberfläche treffen, entweder reflektiert werden oder in das Glas eindringen.

Die bereits erwähnten Bezeichnungen *positive Doppelbrechung* und *negative Doppelbrechung* hatte Brewster im Jahre 1818 durch Vergleiche mit der Elektrizität und dem Magnetismus geprägt, als er noch an das Vorhandensein von Lichtteilchen glaubte.

Das polarisierte Licht bildete also zunächst eine starke Stütze für die Emanationstheorie, und die damals ohnehin nur sehr wenigen Vertreter der Wellenlehre hatten die allergrößten Schwierigkeiten, wenn sie die Polarisationserscheinungen mit ihrer Theorie verstehen wollten, weil sie noch an der Vorstellung von den Longitudinalwellen festhielten, bei denen also die Wellenberge und -täler in die Ausbreitungsrichtung weisen. Diese Lage änderte sich, als der englische Arzt, Physiker und Naturphilosoph **THOMAS YOUNG** (1773–1829) im Jahre 1817 die Polarisationserscheinungen mit **ROBERT HOOKES** (1635–1703) alten Vorstellungen von der Lichtausbreitung von Form von Transversalwellen erklärte, wonach die Amplituden senkrecht zur Ausbreitungsrichtung orientiert sind.

Die Herstellung linear polarisierten Lichts

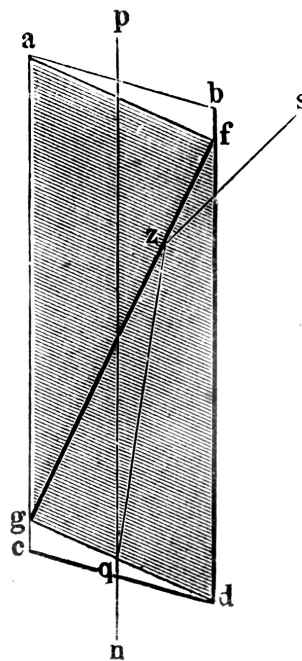
Kalkspatprismen

Brewster wollte für seine Experimente nur den einen der beiden aus dem Kalkspat hervortretenden Strahlen benutzen und den anderen ausschalten. Der übrig gebliebene Strahl ist linear polarisiert. Zu diesem Zweck durchschnitten Brewster einen Kristall schräg, raute die Schnittfläche auf und benetzte sie mit einer Flüssigkeit, die den gleichen Brechungsindex wie der ordentliche Strahl aufwies. Wenn er dann die beiden Kristalle wieder zusammensetzte, lief der ordentliche Strahl ohne Störung hindurch, während der außerordentliche an der Schnittfläche total reflektiert wurde. Wenn man die Flüssigkeit durch eine andere ersetzte, die den gleichen Brechungsindex wie der außerordentliche Strahl aufwies, führte das zur Ausschaltung des ordentlichen Strahles. Der Nachteil an dieser Anordnung war, dass die dabei benutzten Flüssigkeiten meist eine störende Färbung aufwiesen und außerdem mit der Zeit austrockneten, wodurch die ganze Vorrichtung unbrauchbar wurde.

Brewsters Gedanke wurde von dem in Edinburgh als Physiklehrer tätigen **WILLIAM NICOL** (um 1768–1851) weiter entwickelt, wobei dieser 1828 das nach ihm benannte Prisma erfand. Er schliff dazu die beiden Endflächen eines Kalkspatkristalls so ab, dass die ursprünglich mit der Seitenkante gebildeten Winkel von 72° auf 68° reduziert wurden. Dann schnitt er den Kristall diagonal durch und klebte die Schnittflächen mit Kanadabalsam wieder zusammen. Wenn nun ein Lichtstrahl durch die Seitenfläche in den Kristall gelangt, wird er so gebrochen, dass der ordentliche Strahl (der ja stärker abgelenkt wird als der außerordentliche) auf die Kanadabalsamschicht unter einem größeren Winkel als 68° trifft, weshalb er total reflektiert wird.

Turmalin und Herapathit

Eine weitere, praktisch leicht verwertbare Methode zur Herstellung linear polarisierten Lichts hatten **BIOT** 1815 und unabhängig davon der aus Reval stammende Arzt und Physiker **THOMAS JOHANN SEEBECK** (1770–1831) gefunden. Ihnen war aufgefallen, dass dann, wenn ein Lichtstrahl senkrecht zur optischen Achse in einen Turmalinkristall eintritt, der ordentliche Strahl vollständig absorbiert und nur der außerordentliche hindurch gelassen wird. Die allerersten diesbezüglichen Beobach-



Nicol'sches Prisma,
Schema

tungen hatte **BREWSTER** 1814 am Achat angestellt. **VALENTIN** (1861) schildert diese Erscheinung folgendermaßen: »Ein dünn auslaufender Turmalinkeil, dessen Kante der optischen Achse parallel geht, liefert ein doppeltes Bild an den dünneren und ein einfaches an den dickeren Stellen, weil eine der Achse parallele Platte vorzugsweise das ordentliche Bild verschluckt und nur das ausserordentliche durchlässt. Rothe bis rothbraune und vor Allem grüne Turmaline eignen sich am besten, diese Erscheinung nutzbar machen. ... Eine Turmalinplatte von einem Millimeter Dicke, wie man sie zu gebrauchen pflegt, macht schon den ordentlichen Strahl für die gewöhnlichen Beobachtungen unmerklich.« Deshalb schnitt **BIOT** aus einem Turmalinkristall Platten parallel zur optischen Achse und verwendete eine davon als Polarisator, während er für den Analysator immer noch einen Kalkspat benutzte. Der Erste, der sowohl für den Polarisator als auch für den Analysator je eine Turmalinplatte als Polarisationsfilter verwendete, war **JOHN FREDERICK WILLIAM HERSCHEL** (1792–1871). Verglichen mit dem Nicol'schen Prisma ergab sich mit einer Turmalinplatte zwar ein größeres, aber gleichzeitig auch ein gefärbtes Gesichtsfeld, so dass keine reinen Polarisationsfarben zu beobachten waren.

Anstelle der Turmalinplatte kann man auch eine von dem aus Bristol stammenden Arzt **WILLIAM BIRD HERAPATH** (1820–1868) im Jahre 1851 erfundene Jodchininverbindung benutzen, für die der Mineraloge **WILHELM HAIDINGER** (1795–1871) die Bezeichnung *Herapathit* vorgeschlagen hatte. Allerdings liefert dieser Stoff ebenfalls ein gefärbtes Gesichtsfeld, und außerdem war es schwierig, davon genügend große Kristalle zu erhalten. Die Herstellungsvorschrift ist nach **VALENTIN** (1861) die Folgende: »Herapath stellte die Verbindung her, indem er 100 Grm. saueren schwefelsauren Chinins in 3 Unzen Essigsäure und 2 Drachmen verdünnter (etwa 12 Gran trockener Säure enthaltender) Schwefelsäure bei 80° löste und eine Auflösung von 30 Gran Jod in 1150 Gran Weingeist nach und nach hinzufügte. ... Diejenigen, die sich in der Folge mit den Darstellungen beschäftigten, kamen zu der Überzeugung, dass hier eine Reihe glücklicher Nebenbedingungen trotz aller Vorsicht mitwirken muss, wenn das Ziel erreicht werden soll. Herapathitplatten mit grösseren Oberflächen werden daher theuer bezahlt. ... Blättchen von weniger als 0,002 engl. Zoll (nahezu 1/20 Mm.) Dicke polarisiren nach Herapath das Licht sehr vollständig. Zamminger bemerkte übrigens das Gleiche an halb so dünnen Blättern ...«.

Die ersten Polarisationsmikroskope

David Brewster

Der Erste, der mikroskopisch kleine anorganische und organische Objekte mit polarisiertem Licht untersuchte, war **DAVID BREWSTER** im Jahre 1816. Er benutzte als Polarisator einen unter einem Winkel von 35° geneigten schwarzen Spiegel oder einen Stapel aus Glasplatten. Als einen weiteren Polarisator erprobte er einen gewöhnlichen Kalkspatrhomboeder. Auf dessen untere Fläche kam eine kleine Lochblende, deren Öffnung so groß war, dass deren beide Bilder beim Durchblick durch den Kristall gerade getrennt erschienen. Dann wurde eines der beiden Bilder abgedeckt und das andere zur Beleuchtung des Objektes benutzt. Zur Untersuchung diente ein Einfaches Mikroskop mit einem Turmalinplättchen als Analysator, das mit etwas Wachs oder Kanadabalsam über die Linse geklebt worden war. Später empfahl Brewster den Gebrauch von zwei plankonvexen Linsen als Vergrößerungsoptik und ordnete das Turmalinplättchen zwischen den planen Linsenoberflächen an.



William Henry
Fox Talbot

William Henry Fox Talbot

Der als reicher Privatgelehrter lebende, außerordentlich vielseitige Physiker und Chemiker **WILLIAM HENRY FOX TALBOT** (1800–1877) hatte im Jahre 1834 als Erster ein

normales Zusammengesetztes Mikroskop in ein Polarisationsmikroskop umgewandelt. Er war seit 1834 Mitglied der Royal Society und außerdem von 1832 bis 1834 Abgeordneter im Parlament. Für sein Polarisationsmikroskop benutzte er zwei Nicol'sche Prismen, die in kleine Messingtuben gefasst waren. Eines davon kam in die Öffnung des Objektisches und wirkte als Polarisator, während das andere als Analysator diente und dem Okular aufgesetzt wurde. Dadurch kam es jedoch zu einer erheblichen Einschränkung des Gesichtsfeldes, weshalb CHEVALIER das Analysatorprisma in den Tubus unmittelbar über dem Objektiv anbrachte. Allerdings ergaben sich jetzt Probleme, wenn man den Analysator drehen wollte, weshalb HARTING ein von E. WENCKENBACH hergestelltes Nicol'sches Prisma mit besonders großem Durchmesser benutzte und dieses unten am Okular befestigte. Dadurch wurde das Gesichtsfeld nur geringfügig verkleinert.

Giovanni Battista Amici

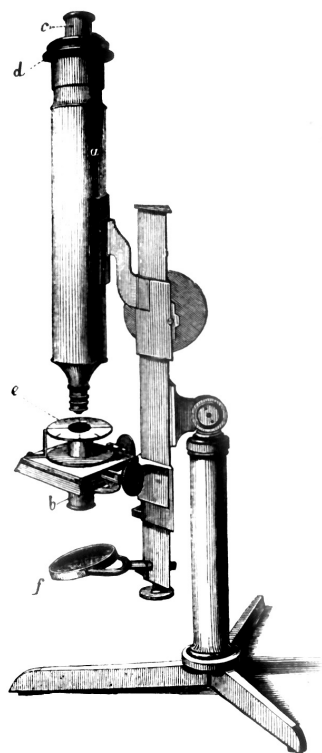
Besonders hohen Ansprüchen genügte ein von AMICI bereits im Jahr 1830 gebautes, spezielles Polarisationsmikroskop. Als Polarisator diente ein Satz aus 8 bis 10 Glasplatten und als Analysator ein Kalkspatrhomboeder, bei dem von den beiden hervortretenden, linear polarisierten Lichtbündeln jeweils eines mit einem Metallplättchen abgedeckt werden konnte und das andere zur Beobachtung diente. Analysator und Polarisator ließen sich drehen und die entsprechenden Winkel waren an Teilungen abzulesen. Außerdem war der Objektisch drehbar, und zwar sowohl um eine horizontale als auch durch eine vertikale Achse.

Erste Untersuchungen mit dem Polarisationsmikroskop an biologischen Objekten

C. Boeck, Jean Baptiste Biot

Der Dozent und spätere Professor C. BOECK hat in den Jahren 1839/40 im damaligen Christiania, dem heutigen Oslo, polarisationsmikroskopische Studien angestellt. Nach dem Referat von ADOLPH HANNOVER (1844) hat er dabei »einen Apparat aus Turmalinplatten« benutzt und damit Fasern untersucht. Diese blieben dunkel, wenn sie zu einer Achse der Turmalinplatte parallel verlaufen, und leuchteten auf, wenn sie einen Winkel von 45° bildeten, so dass man aus Dunkelheit oder Aufhellung darauf schließen kann, in welcher Richtung die Fasern in den verschiedenen Schichten eines Gewebes verlaufen. BOECK benutzte bei seinen Untersuchungen auch die Gipsplatte, die »zur Vergrößerung der Dicke des Gegenstandes dient«. An den Interferenzfarben ließ sich die Anordnung der Fasern selbst bei sehr unregelmäßigem Verlauf ermitteln.

Im Jahre 1844 hat BIOT erstmals von dem im Polarisationsmikroskop sichtbaren Kreuz auf den Stärkekörnern berichtet. Er glaubte später aus seinen Untersuchungen schließen zu können, dass die Stärkekörnern wie wahre Früchte, etwa wie Äpfel und Birnen, organisiert sind.



Polarisationsmikroskop

Karl von Erlach

KARL VON ERLACH untersuchte im Jahre 1847 Zwiebelchuppenzellen mit dem Polarisationsmikroskop genauer. Er benutzte dazu ein Schieck'sches Mikroskop »von der grössten Art, die dieser Künstler verfertigt« vorzugsweise bei 260facher Vergrößerung. Die beiden Nicol'schen Prismen hatten »die Herren Mechaniker Bötticher und Halske in Berlin auf sehr befriedigende Weise angefertigt.« Mit dieser Ausrüstung stellte v. Erlach fest, dass die Zellwände bei dunklem Gesichtsfeld unsichtbar sind, wenn sie zu der Polarisationsebene des einfallenden Lichts parallel orientiert sind. Dagegen werden sie mehr oder weniger aufgehellt, wenn sie schräg zu dieser Ebene verlaufen, und sie leuchten am hellsten, wenn die Verlaufsrichtung einen Winkel von 45° angenommen hat. Weiterhin untersuchte v. Erlach Muskelfasern, Nervenfasern und Stärkekörner. Besonders gut schien ihm das Polarisationsmikroskop zum Auffinden von Kristallen geeignet zu sein. Von Erlach hat auch die Gipsplatte ausprobiert, aber er meinte, dass »bei den vorliegenden Untersuchungen diese Modification der Beobachtungsweise nicht nur keinen weitem Aufschluß giebt, sondern vielmehr die Sache unnöthigerweise complicirt. Immerhin verdient jedoch die Zierlichkeit und Farbenpracht, womit unter diesen Bedingungen die Erscheinung der Analyse polarisirten Lichts durch organische Körper auftritt, dass man sich den Genuss eines solchen Anblickes verschafft.« Als Grund für das besondere Verhalten organischer Objekte im Polarisationsmikroskop führt v. Erlach Folgendes an: »Das Verhalten organischer Körper in durchsichtigen oder stark durchscheinenden Schichten polarisirtes Licht abzulenken oder zu analysiren, führt zu der Annahme, dass sie entweder aus parallelen Schichten einfach brechender Medien bestehen, die in einem gewissen Winkel zur Richtung der einfallenden Lichtstrahlen stehen, oder dass sie doppelbrechende Eigenschaft haben, wenn überhaupt angenommen werden soll, dass dieser Vorgang mit einem der bisher für ähnliche Erscheinungen bei unorganischen Körpern bekannten übereinstimme.« In der zweiten Hälfte des Aufsatzes wird die Wirkungsweise des Polarisationsmikroskops eingehend beschrieben. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen fasst v. Erlach folgendermaßen zusammen:

»Die meisten bis jetzt untersuchten organischen Substanzen sind in höherem oder geringerem Grade doppelbrechend, keine an sich einfachbrechend.

Die Doppelbrechung ist umso deutlicher, je weiter die Substanz in ihrer Entwicklung fortgeschritten ist.

Vegetabilische Substanzen zeigen im Allgemeinen stärker doppelbrechende Eigenschaften als animalische.

In faserigen Gebilden steht von den beiden Richtungen, nach welchen die Schwingungen des durchfallenden Lichtes gelenkt werden, die eine parallel mit der Längenausdehnung der Faser, die andere senkrecht darauf.

In Membranen folgt von den zwei Richtungen, nach welchen die Schwingungen des durchfallenden Lichtes gelenkt werden, die eine der Flächenausbreitung in jedem darin möglichen Sinn, die andere steht senkrecht auf der Flächenausdehnung.«

Von Mohls erste Bemerkungen über die Polarisationsmikroskopie

HUGO VON MOHL stufte den Wert des Polarisationsmikroskops für biologische Untersuchungen zunächst nicht besonders hoch ein und schrieb im Jahre 1846: »... indem die Anwendung des polarisirten Lichtes zur Untersuchung organischer Körper von keinem Nutzen, oder wenigstens nur in ausserordentlich seltenen Fällen, z. B. bei der Untersuchung der Crystallinse, von Nutzen ist. Mir wenigstens ist es bei wiederholten Versuchen, bei Untersuchung vegetabilischer Körper, z. B. der Zellenmembran durch Anwendung polarisirten Lichtes Structurverhältnisse, die nicht bei gewöhnlicher Beobachtungsweise erkennbar waren, zu entdecken, niemals gelungen, auch

nur den mindesten Nutzen aus diesem Verfahren zu ziehen.« Allerdings räumt er ein, dass das Polarisationsmikroskop zur Untersuchung von Kristallen nützlich ist.

Carl Christian Ehrenberg

Der bekannte Protozoologe und Mikropaläontologe **CARL CHRISTIAN EHRENBURG** hatte sich 10 Jahre lang gelegentlich mit der Polarisationsmikroskopie beschäftigt, bis genügend Resultate zusammengekommen waren, dass sie ihm im Jahre 1848 für eine Mitteilung an die Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften in Berlin geeignet erschienen. Dabei meinte er einschränkend: »Die Anwendung des polarisirten Lichtes ist für die Analyse des Organischen keineswegs das zweckmässigste Beleuchtungsmittel, sie gleicht oft nur einem Sehen durch farbiges Glas und hat dessen Nachtheile für die Schärfe der Untersuchung.« Ehrenberg glaubte damals noch, dass »organische Gewebe im Allgemeinen durch polarisirtes Licht einer wissenschaftlich sicheren Erläuterung« nicht zugänglich sind, aber dann zählt er doch eine Reihe von Objekten auf, an denen sich in der letzten Zeit Doppelbrechungserscheinungen feststellen ließen. Darunter war er von den folgenden Beobachtungen besonders begeistert und schrieb: »Das schönste aller einfachen optischen Bilder in organischen mikroskopischen Verhältnissen ist bei 100 maliger diametraler Vergrößerung ein breites zweifarbigen (blaues und gelbes, im rothen Grunde violett bis goldgelbes) Strahlenkreuz der schildartigen Pflanzenschuppen, welche die Blätter von Hippophae rhamnoides und besonders Elaeagnus argentea bedecken ...« Im Gegensatz zu seinen eingangs gemachten Bemerkungen steht Ehrenberg am Ende seines Aufsatzes der Polarisationsmikroskopie wohlwollender gegenüber und schreibt: »Künftig wird das polarisirte Licht in so vielen Fällen über organische, amorphe und crystallisirte sehr feine Zustände, mancher rückbleibenden Schwierigkeit ungeachtet, ganz allein directen Aufschluss geben, dass der mikroskopisch polarisirende Apparat den Chemikern, Mineralogen und Geologen unentbehrlich sein wird, wie es das Mikroskop nun schon geworden ist. An wichtigen Resultaten wird es nicht fehlen.«

Ehrenberg setzte seine polarisationsmikroskopischen Untersuchungen fort und brachte 1849 einen neuen Bericht darüber. Hier schreibt er zu Anfang: »Die wissenschaftlich nützliche analytische Wirkung dieser Methode hat sich zunächst ... weiter bestätigt«. Anschließend schildert er ausführlich Untersuchungen an verschiedenen Stärkekörnern. Es folgt eine Aufzählung einer großen Zahl von Objekten mit Angaben darüber, ob sie doppelbrechend sind oder nicht.

Hermann Schacht

HERMANN SCHACHT widmete in der ersten, 1851 erschienenen Auflage seines Buches *Das Mikroskop und seine Anwendung* dem Polarisationsapparat nur acht Zeilen. Er hatte noch keine Gelegenheit gehabt, damit eigene Erfahrungen zu sammeln, wollte das aber bald nachholen. In der zweiten Auflage aus dem Jahre 1855 ist dann der Abschnitt über den Polarisationsapparat bereits mehr als verdoppelt worden, aber Schacht meint dazu: »Der Polarisationsapparat ist am Mikroskop mehr für ausserordentlich hübsche Spielereien als zur wissenschaftlichen Belehrung geeignet ...«.

Trotzdem hatte Schacht in seinem 1852 erschienenen Buch *Die Pflanzenzelle* bereits einen Anhang unter der Überschrift *Der Polarisations-Apparat in seiner mikroskopischen Anwendung auf die Pflanzenzelle* beigefügt. Über sein Polarisationsmikroskop und dessen Anwendung schreibt er Folgendes (S. 430): »Der von mir benutzte Polarisations-Apparat ist von den Herren Bénéche und Wasserlein in Berlin gefertigt; er besteht aus zwei Nicol'schen Prismen, deren eines vermittels einer Fassung in den Schlitten des Blendungs-Apparates meines Oberhäuserschen Mikroskops geschoben wird. Durch dieses Prisma gelangt der Lichtstrahl vom Spiegel aufs Object. Das un-

tere Prisma kann, gleich dem Blendungsapparat, um seine Axe gedreht werden. Das zweite Prisma ist über dem Ocular angebracht und vermittelt eines Ringes mit dem Mikroskoprohr verbunden, es lässt sich auf die Seite schieben, aber nicht um seine Axe drehen; die Drehung wird durch den mit dem Rohre vereinigten Objecttisch des Mikroskopes selbst bewirkt. Eine mit einer Gypsplatte versehene Blende, für das untere Prisma bestimmt, vervollständigt den Apparat, der so wenig Licht verschluckt, dass ich ihn mit meinen stärksten Objectiven anzuwenden vermag. – Beim Gebrauche des genannten Apparates schiebe ich erst das obere analysirende Prisma zur Seite, stelle den Gegenstand genau und bei voller Beleuchtung ein, bringe darauf das obere Prisma in die Axe des Rohres und drehe den Tisch so lange, bis das Gesichtsfeld möglichst dunkel erscheint (bis sich beide Prismen kreuzen). Ist der zu beobachtende Körper doppelbrechend, so erscheint er jetzt mit hellem glänzenden Licht, in bestimmten Fällen sogar mit bunten Farben; ist er nicht doppelbrechend, so gewinnt es die Farbe des Gesichtsfeldes: Legt man die Gypsplatte auf das untere Prisma, so erscheint das Gesichtsfeld bei einer gewissen Drehung des Tisches und bei einer bestimmten Dicke des Gypsblättchens mit einer bestimmten Farbe, z. B. roth, um 45° weiter gedreht wird es farblos, um 90° gedreht grün, um 180° wieder roth u. s. w. Ist der zu beobachtende Körper doppelbrechend, so erscheint er auf dem rothen Felde mit einer anderen Farbe der Newton'schen Ringe; auf dem grünen Felde, dann mit der complementären Farbe der letzteren.« Im Folgenden werden polarisationsmikroskopische Beobachtungen an verschiedenen pflanzlichen Objekten besprochen. Außerdem erwiesen sich Muskelfasern vom Frosch nach mehrwöchigem Aufenthalt in Alkohol in Längsansicht als doppelbrechend, ebenso wie ein Querschliff vom Oberschenkelknochen des Menschen.

Hugo von Mohl

HUGO VON MOHL (1805–1872) hatte inzwischen Gelegenheit gehabt, sich näher mit der Polarisationsmikroskopie zu befassen, und fand 1858 die meisten der von SCHACHT 1852 in seinem Buch mitgetheilten Untersuchungen an pflanzlichen Materialien als ausgesprochen schlecht und schrieb: »Der Aufsatz von Schacht ist eine äusserst geringe Arbeit. Sie lehrt uns eine einzige, von seinen Vorgängern nicht angeführte, richtig beobachtete Thatsache, nämlich die Erscheinung eines schwarzen Kreuzes in der Umgebung der Tüpfel des Tannenholzes, der Albumenzellen von Phytelephas u. s. w. Seine sämtlichen übrigen Angaben (abgesehen von der längst bekannten und gar nicht zu übersehenden Thatsache, dass Amylumkörner und der Querschnitt dickwandiger Pflanzenzellen ein schwarzes Kreuz zeigen) sind falsch. Die ganze Arbeit ist daher nicht blos an sich werthlos, sondern sie ist positiv schädlich, indem sie nur dazu geeignet ist, den in der Sache nicht erfahrenen Leser zu Irrthümern zu verleiten ...«. Diese Kritik bezieht sich u. a. auf Angaben Schachts, wonach bestimmte Zellwände, wie die von Kambiumzellen und Flechten, nicht doppelbrechend sein sollen, während Mohl an diesen Objekten bei Anwendung feinerer Untersuchungsmethoden sehr wohl Doppelbrechung feststellen konnte.

Die 1858 erschienene Arbeit von v. Mohl ist einer der ersten umfangreicheren, zusammenfassenden Aufsätze über die biologische Polarisationsmikroskopie und auch einer der ersten, dem eine Tafel mit farbigen Abbildungen beigelegt ist, auf denen die Objekte unter Verwendung der Gypsplatte *Rot I. Ordnung* zu sehen sind.

Mohl erläutert am Anfang seines Aufsatzes den Aufbau und die Handhabung eines Polarisationsmikroskops und wählt als Untersuchungsobjekt zunächst Zellen, die im Querschnitt kreisförmig erscheinen. Er schreibt: »Bei gekreuzter Stellung der Nicol wird ein solches Organ auf dem schwarzen Gesichtsfelde des Mikroskops unter der Gestalt eines mit weissem Lichte selbst leuchtenden Ringes hervortreten. Das Licht desselben zeigt jedoch nicht an allen Stellen die gleiche Intensität. In der Richtung

zweier im Centrum des Ringes sich rechtwinklig kreuzender und auf dem Querdurchmesser der rhomboedrischen Flächen der Nicol senkrecht stehender Linien fehlt an dem Ringe jede Beleuchtung, so dass er an diesen Stellen unsichtbar ist und durch diese schwarzen Streifen in vier Quadranten getheilt erscheint, von welchen jeder in seiner Mitte (in der Entfernung von 45° von einem dunkeln Streifen) das hellste Licht zeigt, und von hier aus gegen die schwarzen Streifen hin gradweise dunkler wird.« Bei parallel gestellten Nicols erscheint das Gesichtsfeld so hell wie im gewöhnlichen Mikroskop, nur sind jetzt die vorher hellen Stellen der Zellwand dunkel und die vorher dunklen Stellen hell.

Dann erklärt v. Mohl die Wirkung der beiden Nicol'schen Prismen mit Hilfe der inzwischen weitgehend anerkannten Undulationstheorie: »Durch den unteren, zwischen dem Mikroskopspiegel und dem Objecte gelegenen Nicol wird das Licht in zwei Hälften getheilt, welche sich nach der jetzt herrschenden Undulationstheorie dadurch voneinander unterscheiden, dass die Ebene, in welcher die Wellen der einen Parthie schwingen, senkrecht auf der Schwingungsebene der andern Parthie steht. Die eine der beiden Lichthälften erleidet im Nicol eine totale Reflexion und gelangt daher nicht zum Objecte; die andere Hälfte, deren Strahlen wie gesagt alle in einer Ebene schwingen, tritt durch den Nicol zum Objecte und durch dieses ins Mikroskop. Dieses Licht ist nun unfähig, den zweiten über dem Oculare stehenden Nicol zu durchdringen, wenn derselbe mit dem untern Nicol rechtwinklig gekreuzt ist, das Gesichtsfeld des Mikroskops erscheint daher schwarz. Es dringen dagegen diese Strahlen ungehindert durch den zweiten Nicol, wenn derselbe parallel zum ersten gestellt wird, wesshalb in diesem Falle das Gesichtsfeld, wie im gewöhnlichen Mikroskop, hell erscheint.«

Wenn man bei gekreuzten Nicols ein einfach brechendes Objekt, z.B. einen Kochsalzkristall, ins Gesichtsfeld bringt, bleibt dieser unsichtbar. Anders verhält es sich mit einem doppelbrechenden Körper, etwa einem Plättchen aus Glimmer oder Gips. »Wenn man einen solchen Körper in horizontaler Richtung um die Achse des Mikroskops dreht, so wird derselbe in vier Lagen sich wie ein einfach brechender Körper verhalten und unsichtbar sein; dieses Unsichtbarwerden wird jedesmal aufs neue eintreten, wenn der Körper aus einer dieser Lagen um einen Viertelkreis gedreht wird, in den zwischenliegenden Stellungen wird derselbe dagegen sichtbar sein. Ziehen wir nun in jeder der vier Lagen, in welcher der Körper unsichtbar ist, in Gedanken oder in Wirklichkeit auf denselben eine durch seinen Mittelpunkt gehende Linie, welche auf dem Querdurchmesser eines der beiden Nicol senkrecht steht, so erhalten wir auf dem Körper zwei unter rechtem Winkel sich kreuzende Linien, welche mit dem Ausdrucke der centralen Achsen bezeichnet werden. Bei dieser Benennung von Achsen ist im Auge zu behalten, ... dass dieselben die zwei unter rechtem Winkel sich kreuzenden Richtungen bezeichnen, von denen die eine mit der Schwingungsrichtung des polarisirten Lichtes parallel, die andere senkrecht auf derselben steht, wenn der Körper unsichtbar ist ...«

»Wird der doppelbrechende Körper in irgend eine andere Lage gebracht, so wird derselbe durch den oberen Nicol sichtbar sein, und zwar in einem desto helleren Lichte, je mehr sich der Winkel, unter welchem seine neutralen Achsen gegen die Querdurchmesser der Nicol geneigt sind, dem Winkel von 45° nähert. Die Undulationstheorie erklärt dieses Sichtbarwerden des Körpers durch die Annahme, dass das polarisirte Licht, wenn seine Schwingungsebene nicht parallel mit einer der neutralen Achsen des doppelbrechenden Körpers ist, bei seinem Durchgange durch den letzteren in zwei Parthien getheilt wurde, deren Schwingungsebenen senkrecht auf einander stehen, wodurch das auf diese Weise modifizierte Licht die Fähigkeit erlangt, durch den oberen Nicol, freilich mit mehr oder weniger geschwächter Intensität,

durchzugehen und den Körper, in dessen Innerem diese Theilung des Lichtes in zwei Bündel stattfindet, gleichsam als selbstleuchtenden Körper sichtbar zu machen.«

»Stellt man die Nicols parallel, so wird, wenn die neutralen Achsen des Objectes senkrecht auf die Flächen des Nicols stehen, das Licht unverändert durch das Object und den oberen Nicol gehen, wenn hingegen die neutralen Achsen unter 45° gegen die Nicol gedreht werden, das Licht die oben angegebene Zerlegung erleiden und mit verminderter Intensität den oberen Nicol durchlaufen, der Körper folglich im Vergleiche mit dem freien Theile des Gesichtsfeldes mehr oder weniger verdunkelt gesehen werden.«

Von Mohl hatte inzwischen den Nutzen des Polarisationsmikroskops auch für biologische Untersuchungen erkannt und schreibt: »Die angegebenen Erscheinungen setzen uns in den Stand, zu untersuchen, ob ein Körper doppeltes Brechungsvermögen besitzt, und in welcher Richtung seine neutralen Achsen liegen.«

Im Folgenden konzentriert sich v. Mohl auf die Untersuchung pflanzlicher Zellwände und stellt dabei fest, »... dass bei einer geschichteten, auf ihrem Querschnitte beobachteten Zellmembran die eine neutrale Achse parallel mit ihrer Schichtung, die andere senkrecht auf derselben liegt.« Außerdem gibt er einige Hinweise zur Präparation. So müssen die Schnitte bei stark doppelbrechenden Objecten sehr dünn sein. Außerdem sollte man eine *Aufbewahrungsflüssigkeit*, das Einschlußmedium benutzen, deren Brechungsindex dem des Objectes möglichst nahe liegt. Stärkekörner und Zellulosewände sollten daher möglichst nicht in Wasser, sondern in ätherischen Ölen, wie Terpentinöl, eingeschlossen oder in Kanadabalsam oder einem ähnlichen Harz eingeschmolzen werden.

Von Mohl hat auch Überlegungen zur Ursache der Doppelbrechung der Zellwände angestellt und kommt zu dem Schluss, »dass die von den Zellmembranen ausgeübte Wirkung der dieselben bildenden Cellulose selbst zukommt und von der mit ihrem organischen Bau verbundenen Anordnung ihrer Molecüle abhängt.«

Große Bedeutung hat für v. Mohl die Verwendung von Hilfsobjecten: »Eine neue überraschende Reihe von Erscheinungen wird hervorgerufen, wenn man den polarisirten Lichtbündel auf seinem Wege von dem unteren Nicol zu dem zu untersuchenden Objecte durch ein doppelt brechendes Mittel, z.B. dünne Platten von Gyps, Glimmer, Bergcrystal gehen lässt. Werden diese Platten so gelegt, dass ihre centralen Achsen gegen die Nicol schief (am besten unter einem Winkel von 45° geneigt) sind, so erscheint ja nach der Dicke der angewendeten Platte das Gesichtsfeld mehr oder weniger erhellt, und wenn die Platte eine bestimmte, durch Proben zu ermittelnde Dicke besitzt, in einer der Farben der Newton'schen Farbenringe. Die mit Hülfe dieses modificirten Lichtes angestellte mikroskopische Beobachtung ist eine gemischte, weil das Object auf der einen Seite wie beim gewöhnlichen Mikroskope im durchgehenden Lichte gesehen wird; auf der andern Seite aber dieses Licht seinerseits wieder von der Substanz des Objectes modificirt wird und in Folge hiervor das Object wie in den bisher betrachteten Fällen theilweise als selbstleuchtender Körper auftritt, wobei seine verschiedenen Theile, je nach ihrer Lage zu der Gypsplatte und zu den Nicols von complementären Farben lebhaft gefärbt erscheinen. Man benutzt bekanntlich diese Verhältnisse um schwächere Grade von doppeltem Brechungsvermögen zu erkennen, indem manche Objecte, welche bei blosser Anwendung von zwei Nicols dieses Vermögen noch nicht zu erkennen geben, bei Einschaltung einer solchen Platte durch die von der Farbe des Gesichtsfeldes abweichende eigene Färbung sich als doppelbrechende Körper ausweisen. Es ist jedoch nicht dieses Verhältniß, welches ich hier besprechen will, sondern die bisher übersehene Thatsache, dass sich

in dem Verhältnis der pflanzlichen Membranen zum polarisierten Lichte analoge Verschiedenheiten finden, wie zwischen positiven und negativen Crystallen ...«.

Dann erklärt v. Mohl die Vorgehensweise bei der Verwendung des Hilfsobjekts *Rot I. Ordnung*: »Man kann diese Erscheinung ebenso wohl an ringförmigen Gebilden, als an Durchschnitten durch ebene Zellmembranen untersuchen. Man lege zwischen dem unteren Nicol und das Object eine Gypsplatte ein, welche das Gesichtsfeld roth erscheinen lässt und dreht dieselbe so, dass ihre neutralen Achsen mit den Nicols einen Winkel von 45° bilden. Stellt man nun das Mikroskop auf ein ringförmiges Object, z.B. den Querschnitt einer cylindrischen Zelle ein, so erblickt man dasselbe in vier Quadranten getheilt, welche in der Art in lebhaften complementären Farben gefärbt erscheinen, dass die zwei alternirenden Quadranten, deren Mittellinie der einen der neutralen Achsen der Gypsplatte entspricht, blau oder grün, die zwei anderen gelb oder roth gefärbt sind. Dreht man die Gypsplatte so weit, dass ihre neutralen Achsen auf die Nicol senkrecht stehen, so verlieren sich alle Farben und treten bei fortgesetzter Drehung wieder auf, nun aber in entgegengesetzter Ordnung, indem die vorhin blau gefärbten Quadranten nun gelb erscheinen und umgekehrt ...

Benutzt man als Object den Durchschnitt eines Zellgewebes mit geradlinigen Seitenwandungen, so werden alle Zellwände, welche gegen einen der Nicol senkrecht stehen, die Farbe des Gesichtsfeldes zeigen, alle diejenigen, welche mit einen der neutralen Achsen der Gypsplatte parallel verlaufen oder keinen grossen Winkel mit ihr bilden, blau, die mit der anderen Achse parallelen gelb gefärbt sein.«

Im Folgenden bespricht v. Mohl ausführlich seine Untersuchungen an den verschiedensten Zellwänden, wobei ihm an den Außenwänden von Epidermiszellen aufgefallen ist, dass sich die Zellulosewand polarisationsoptisch anders verhält als die aufgelagerte Cuticula, indem die eine bei gekreuzten Nicols mit der Gypsplatte eine blaue und die andere eine gelbe Färbung annimmt.

John Thomas Quekett

Inzwischen hatte man sich in England weiterhin mit dem Polarisationsmikroskop beschäftigt, weshalb JOHN THOMAS QUEKETT (1815–1861) dieses Thema auch in seinem 1850 in deutscher Übersetzung erschienenen Buch *Practisches Handbuch des Mikroskopie* mit behandelt. Als Polarisator und Analysator werden in erster Linie Nicol'sche Prismen empfohlen, aber es gibt auch Hinweise auf Turmalinplatten und Glasplattensätze. Im Übrigen wird besonders auf die einschlägigen Untersuchungen von EHRENBERG aus den Jahren 1848 und 1849 verwiesen. Außerdem findet sich auf Seite 591 eine Aufzählung verschiedener tierischer und pflanzlicher Objekte sowie von Kristallen und Gesteinen, die im Polarisationsmikroskop besonders schöne Interferenzfarben zeigen. Dazu gehören *Knochen* von Sepia, Quer- und Längsschnitte durch verschiedene Hufe und Hörner, Federspule, graues Menschenhaar, Flügeldecken von Käfern, Fischeschuppen, verschiedene Stärkekörner, Haare von Blättern von Deutzia und Elaeagnus, Schießbaumwolle, Baumwolle, Flachs sowie Kristalle von Kaliumchromat, Kaliumbichromat, Borax, Borsäure, Calciumkarbonat oder Zitronensäure.

Weitere Entdeckungen in der biologischen Polarisationsmikroskopie

Zu den wichtigsten Entdeckungen, die in der Mitte des 19. Jahrhunderts in der biologischen Polarisationsmikroskopie gemacht worden sind, gehören die Doppelbrechung der markhaltigen Nervenfasern durch CHRISTIAN GOTTFRIED EHRENBERG

und die Gliederung der quer gestreiften Muskelfasern in stark und schwach doppelbrechende Abschnitte. Dieser Befund gelang dem Wiener Physiologen ERNST WILHELM RITTER VON BRÜCKE (1819–1892) im Jahr 1858, und er stellte sich vor, dass die Änderung der Streifung bei der Kontraktion so erfolgt, dass die positiv einachsigen doppelbrechenden Teilchen, die *Disdiaklasten*, sich wie eine Kompanie Soldaten in verschiedener Weise formieren können.



Gabriel Valentin

Gabriel Valentin

In der 1851 erschienenen dritten Auflage seines Grundriß der Physiologie des Menschen zeigt VALENTIN ein für Biologen und Mediziner bestimmtes Polarisationsmikroskop, dessen grundsätzlicher Aufbau dem von TALBOT angegeben entspricht und der in der Folgezeit im Wesentlichen unverändert blieb. Als Polarisator und Analysator dienten jeweils ein Nicol'sches Prisma, und auf den Objektstisch war ein Drehtisch montiert. Der Hersteller des Gerätes wird zwar nicht angegeben, aber dem Aussehen nach scheint es aus der Werkstatt von PLÖSSL zu stammen.

GABRIEL VALENTIN (1810–1883) war in Breslau geboren worden, hatte an der Universität seiner Heimatstadt studiert und hier im Jahre 1832 bei PURKINJE mit einer histologischen Arbeit promoviert. Bereits 1836 erhielt er einen Ruf auf den Lehrstuhl für Physiologie und Zootomie an die Universität Bern, wo er bis zu seinem Lebensende blieb.

Valentin verfasste auch eines der ersten speziellen Bücher über polarisationsmikroskopische Untersuchungen an biologischen Objekten, das 1861 unter dem Titel Die Untersuchung der Pflanzen- und der Thiergewebe in Polarisirtem Lichte erschien und nach einer Aussage im Vorwort vor allem ein Leitfaden für die Untersuchung der organischen Gebilde im polarisiertem Licht bilden soll. Der erste Abschnitt unter der Überschrift Polarisation und Doppelbrechung befasst sich mit den physikalischen Grundlagen dieser Erscheinungen. Es folgt der Abschnitt über die Polarisationsinstrumente. Hier vertritt Valentin die folgende Meinung: »Das Mikroskop genügt in vielen Fällen nicht und erst andere vervollkommnete Polarisationsinstrumente können zu dem erwünschten Ziele führen, wie wir in den beiden letzten Abschnitten sehen werden. Wir wollen vorläufig nur ein Beispiel hervorheben. Die Schale der Malermuschel besteht aus äusseren Lagen, die den kohlsauereren Kalk in Form des Kalkspathes, also in einer einachsigen Modification, und aus inneren, die ihn in der Gestalt des Aragonits, mithin als zweiachsigen Körper führen. Die Kreuze, welche die einachsige Beschaffenheit verrathen, lassen sich nur unter starken Vergrößerungen des Mikroskopes und die Hyperbeln und die lemniscatenähnlichen Figuren, welche der zweiachsigen Beschaffenheit entsprechen, bloss unter grösseren Polarisationsapparaten mit geeigneten Linsensystemen nachweisen.« Valentin vertrat also die Meinung, dass man für konoskopische Untersuchungen spezielle Geräte benötigt. Dass sich auch ein gewöhnliches Polarisationsmikroskop so umbauen lässt, dass es für die genannten Zwecke geeignet ist, war ihm noch nicht bekannt.

Im dritten Teil des Buches werden Nebenapparate, wie Kompensatoren besprochen. Der letzte Abschnitt widmet sich biologischen Objekten, die man mit dem Polarisationsmikroskop untersuchen kann, sowie den Erkenntnissen, die dabei bereits gewonnen wurden. Es sind dies die Folgenden: »Krystalle und krystallinische Kugeln, Kieselschalen, Kalkstäbe und Kalknetze, vorzüglich der Polypen und Stachelhäuter, Kalkschalen und Perlmutter, Stärkmehl der Gewächse, Chitin und Horn, Knorpel, Knochen und Zähne, Zell- oder Bindegewebe, Sehnen und elastisches Gewebe, Hornhaut, Sclerotica, Linse und Glaskörper, Muskeln, Nervengewebe, Blut- und Lymphkörperchen und krankhafte Ausschwitzungen, Formbestandteile des Samens und des Eies, Embryonales Gewebe.«

Leopold Dippel, Carl Wilhelm von Nägeli und Simon Schwendener

In der Folgezeit nahm besonders bei den Botanikern das Interesse an der Polarisationsmikroskopie immer mehr zu, weswegen dieses Thema in Büchern, die sich mit der botanischen Mikroskopie befassen, mit behandelt wird. Dazu gehören die seinerzeit weit verbreiteten Werke von DIPPTEL sowie NÄGELI und SCHWENDENER. Für die Untersuchungen werden durchweg normale Mikroskope empfohlen, die mit Nicol'schen Prismen oder Abwandlungen davon ausgerüstet sind.

Polarisationsmikroskopie in der Mineralogie, Petrographie und Geologie

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts begannen sich auch Mineralogen, Petrographen und Geologen für das Polarisationsmikroskop zu interessieren, das sich dann zu einem außerordentlich wichtigen Forschungsinstrument für diese Wissenschaften entwickeln sollte. Eigentlich befasst sich das vorliegende Buch nicht mit diesen Fachrichtungen, und deshalb sollen nur einige ganz kurze Andeutungen gegeben werden.

Auf den genannten Gebieten wurde das Mikroskop erstmals 1852 benutzt, als der Deutsche ADOLPH FRIEDRICH OSCHATZ (1812–1857) Dünnschliffe herstellte und damit die genauere Untersuchung von Gesteinen ermöglichte. Er fand damit allerdings kaum Beachtung. Erfolgreicher war der englische Amateur-Wissenschaftler HENRY CLIFTON SORBY (1826–1908). Er hatte von seinem Freund W. C. WILLIAMSON erfahren, wie man von fossilen Hölzern oder Knochen Dünnschliffe herstellen kann, und benutzte diese Methode seit 1849 zur Präparation von Gesteinen. Der aus Bonn stammende FERDINAND ZIRKEL (1838–1912) lernte die Dünnschlifftechnik von Sorby kennen und wandte sie für seine Untersuchungen an. Weitere frühe Anwender waren Zirkels Freund HERMANN VOGELSANG (1838–1874) und HARRY ROSENBUSCH (1836–1914).

Es zeigte sich bald, dass bei der Untersuchung von Gesteinsdünnschliffen andere Anforderungen als etwa in der Biologie bei der Untersuchung von Schnittpräparaten gestellt werden. Kommt es hier auf eine gute Auflösung an, will der Petrograph die in den Schliffen befindlichen mineralischen Bestandteile identifizieren. Für diesen Zweck war es auch wichtig, dass der Mineraloge und Petrograph BECKE einen Weg fand, wie man ein Polarisationsmikroskop unter Verwendung hochaperturiger Objektive für konoskopische Untersuchungen geeignet macht. Damit wurden die bisher für diesen Zweck benötigten Spezialgeräte überflüssig.

Polarisationsmikroskope von Leitz und Zeiss

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts nahmen auch die Firmen LEITZ und ZEISS die Herstellung spezieller Polarisationsmikroskope auf. Bei Leitz erschien das erste derartige Gerät im Jahre 1882. SIEGFRIED CZAPSKI (1861–1907) konstruierte ein großes Polarisationsmikroskop, das von Zeiss 1891 auf den Markt gebracht wurde. Während sich Leitz in der Folgezeit weiterhin intensiv um die Vervollkommnung der Polarisationsmikroskope bemühte, fand dieses Teilgebiet bei Zeiss zunächst nicht so große Beachtung. Nachdem es aber zu einer Zusammenarbeit mit der Firma WINKEL gekommen war, wurde die Herstellung großer Polarisationsmikroskope nach Göttingen verlagert. Solche Instrumente fanden in erster Linie das Interesse von Mineralogen, während die Biologen und Mediziner meistens mit normalen Mikroskopen auskamen, die mit polarisationsoptischen Zusatzteilen versehen waren. An dem prinzipiellen Aufbau dieser Geräte hat sich bis heute nicht viel geändert, nur wurden die Polarisations-

tionsprismen inzwischen weitgehend durch Polarisationsfilter ersetzt, die nach dem Prinzip des Herapathits wirken.

Ursachen für die Doppelbrechung biologischer Objekte

Schon unter den ersten Forschern, die biologische Objekte mit dem Polarisationsmikroskop untersucht hatten, gab es einige, die Überlegungen darüber anstellten, wie dort die Doppelbrechung zustande kommt. So glaubte der durch seine Untersuchungen an Protozoen bekannt gewordene **CHRISTIAN GOTTFRIED EHRENBURG** (1849), dass bei den Stärkekörnern diese Eigenschaft auf winzig kleine Kriställchen zurückzuführen sei, die regelmäßig angeordnet sind, während **HUGO VON MOHL** (1859) an einen Aufbau der doppelbrechenden biologischen Objekte dachte, der dem von Kristallen ähnlich ist.

CH. ROUGET (1862) und **WILHELM HOFMEISTER** (1867) stellten sich vor, dass die an Zellwänden zu beobachtenden polarisationsoptischen Erscheinungen von Schichten und Streifen unterschiedlicher Dichte herrühren, an denen es zu Beugung, Lichtbrechung und Reflexion kommt, wie bei der Brechung und Reflexion an übereinander gelegten Glasplatten. Diese Ansicht ist unter der Bezeichnung *Depolarisationshypothese* bekannt geworden.

Mit dem Zustandekommen der Doppelbrechung an organischen Strukturen beschäftigte sich besonders gründlich der Botaniker **CARL VON NÄGELI**. Ihm war die anisodiametrische Quellung von Stärkekörnern und pflanzlichen Zellwänden aufgefallen und er folgerte daraus, dass diese Objekte aus regelmäßig angeordneten, länglichen, submikroskopischen Teilchen aufgebaut sind, die er Mizelle nannte und für die er wegen der Doppelbrechung eine kristalline Struktur annahm.

Der Nachfolger **CARL WEDLS** auf der Lehrkanzel für Histologie an der Universität Wien, **VIKTOR VON EBNER** (1842–1924), lehnte eine kristalline Struktur der Mizelle ab und stellte sich vor, dass die Doppelbrechung auf an sich isotrope Teilchen zurück geht, die nach verschiedenen Richtungen des Raumes in unterschiedlichen Abständen angeordnet sind. Zu einem solchen Feinbau sollte es während des Wachstums der Gewebe aufgrund dabei auftretender Spannungen kommen, weswegen man von der *Spannungshypothese* sprach. Als Beweis für seine Vorstellungen führte von Ebner Doppelbrechungserscheinungen an, die bei quellbaren Stoffen wie Leim unter der Einwirkung von Zug und Druck auftreten. Die Depolarisationshypothese lehnte er ab, weil beim Durchtränken der Gewebe mit Flüssigkeiten von hohem Brechungsindex die Beugung, Brechung und Reflexion aufgehoben oder wenigstens stark herabgesetzt werden, obwohl die Doppelbrechung bestehen bleibe. Von Ebner veröffentlichte seine Vorstellungen in dem Buch Untersuchungen über die Ursachen der Anisotropie organisierter Substanzen, das 1882 erschien.

Zu einer endgültigen Klärung dieser Fragen kam es in den Jahren 1910 bis 1919 durch Untersuchungen von **HERMANN AMBRONN** (siehe S. 615) u.a. an der Doppelbrechung von Gallerten, wobei er fand, dass diese Erscheinung auf zwei Ursachen zurückzuführen ist, nämlich auf die Eigendoppelbrechung und auf die später von **FREY-WYSSLING** so bezeichnete *Formdoppelbrechung*. Die Auswirkungen der Letzteren zeigten sich an dem folgenden Modellversuch: Wenn Aluminiumblech zunächst mit wässriger Sublimatlösung betupft und dann die Flüssigkeit mit Fließpapier abgesaugt wurde, wachsen nach einiger Zeit aus dem Blech faserartige, als *Tonerdefasern* bezeichnete Gebilde heraus. Diese zeigen, wenn die Wachstumsrichtung der Fasern diagonal zur Durchlassrichtung der Polarisationsfilter orientiert ist, in Bezug auf die Faserrichtung positive Doppelbrechung, deren Ausmaß vom Brechungsindex des Einschlussmediums abhängt. Sie ist in Luft besonders hoch, wird in Wasser schwä-

cher und erreicht in Kanadabalsam ein Minimum, um in noch höher brechenden Einschlussmedien wieder anzusteigen. Diese Erscheinung lässt sich nach der Theorie des Mischkörpers von dem Physiker **OTTO WIENER** (1862–1927) erklären. Wenn nämlich in einem Mischkörper der eine Bestandteil aus parallel gelagerten Kreiszyklindern besteht, deren Durchmesser und Abstände im Vergleich zu den Wellenlängen des Lichtes klein sind und wenn die Räume zwischen den Zylindern von einem Medium mit einem anderen Brechungsindex ausgefüllt sind, dann wird der Mischkörper anisotrop und verhält sich wie ein optisch einachsiger Körper. Dafür gab Wiener auch eine mathematische Begründung.

Ambronn konnte nun in Versuchen an gedehnten Streifen aus Gelatine und Zelloidin jede Änderung der Doppelbrechung in Abhängigkeit vom Brechungsindex des Einschlussmediums mit den Wiener'schen Vorstellungen vom Mischkörper in Einklang bringen. Die nach der Aufhebung der Formdoppelbrechung noch verbleibende restliche Doppelbrechung der Strukturen erklärte er mit der Eigendoppelbrechung kristalliner Mizelle im Sinne **NÄGELIS**, die sich im Röntgendiagramm nachweisen ließen. Änderungen im Ausmaß der Doppelbrechung in Abhängigkeit vom Brechungsindex des Einschlussmediums fanden sich auch bei organischen Strukturen, wie bei Zellwänden. Es liegt hier also ebenfalls eine Formdoppelbrechung vor, die zur Klärung der submikroskopischen Feinstruktur herangezogen werden kann. Die Prüfung der Doppelbrechung in Zellen und Geweben mit Einschlussmedien von verschiedenem Brechungsindex wurde als *Imbibition* bezeichnet.

Zusammen mit seinem damaligen Mitarbeiter **ALBERT FREY-WYSSLING** schrieb Ambronn über seine Untersuchungen zur Doppelbrechung ein Buch, das unter dem Titel *Das Polarisationsmikroskop* 1926 erschien und das auch eine gut verständliche Einführung in die Polarisationsmikroskopie bietet.

Eine kurze, ebenfalls sehr gut verständliche Einführung in die Polarisationsmikroskopie, die sich speziell an die Bedürfnisse der Biologen richtet, hatte Ambronn bereits 1892 unter dem Titel *Anleitung zur Benutzung des Polarisationsmikroskops bei histologischen Untersuchungen* in Leipzig geschrieben, als er noch am dortigen Botanischen Institut als außerordentlicher Professor tätig war.

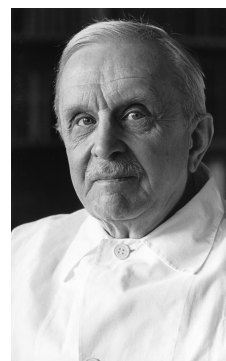


Albert Frey-Wyssling

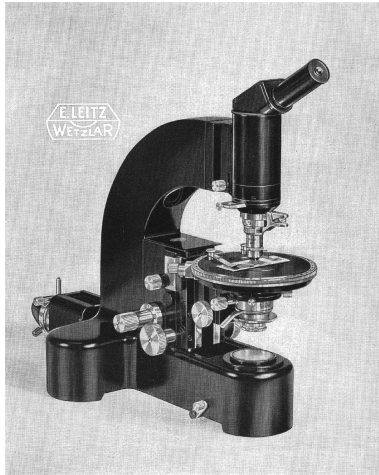
Aufklärung der submikroskopischen Feinstruktur mit dem Polarisationsmikroskop

Die Arbeiten Ambronn's bildeten die Voraussetzung dafür, dass das Polarisationsmikroskop für die Aufklärung der submikroskopischen Feinstrukturen biologischer Objekte herangezogen werden konnte, wenn es sich um Strukturen handelte, die in einer gewissen Regelmäßigkeit angeordnet sind. Auf diesem Gebiet haben der Züricher Botaniker **ALBERT FREY-WYSSLING** (1900–1988) und der Gießener Zoologe **WILHELM J. SCHMIDT** (1884–1974) besonders erfolgreich gearbeitet.

WILHELM JOSEPH SCHMIDT wurde als Sohn eines städtischen Steuereintnehmers in Bonn geboren, machte 1903 am dortigen Königlichen Gymnasium sein Abitur und studierte anschließend ebenfalls in Bonn Naturwissenschaften mit dem Schwerpunkt Zoologie. Nach dem Staatsexamen für das Lehramt an Höheren Schulen und der Promotion 1908 erfolgte die Habilitation in Bonn bereits im Jahre 1910 für die Fächer Zoologie und Vergleichende Anatomie. Noch vor dem Ersten Weltkrieg übernahm der junge Privatdozent neben anderen Lehrverpflichtungen auch einen Lehrauftrag für Mikroskopie. Seine Ernennung zum außerplanmäßigen Professor erfolgte 1918. Im Zusammenhang mit verschiedenen morphologischen Untersuchungen kam er zur Polarisationsmikroskopie, wobei ihm besonders die Arbeiten des Wiener Histolo-



Wilhelm Joseph Schmidt



Ortholux von Leitz
als Biopol

gen **VIKTOR VON EBNER** als Einführung dienten. Sie machten ihn zunächst zum Anhänger der dort vertretenen Ansichten über das Zustandekommen der Doppelbrechung durch Wachstumsspannungen. Im Jahre 1924 übernahm er dann die Vorstellungen **AMBRONNS** über die Ursachen für die Anisotropie in biologischen Objekten und hielt in der Folgezeit daran fest. Durch seine Berufung auf den Lehrstuhl für Zoologie und Vergleichende Anatomie der Universität Gießen im Jahre 1926 und die sich dadurch ergebende räumliche Nähe zu den **LEITZ**-Werken in Wetzlar entwickelte sich eine freundschaftliche Beziehung zur der Firmenleitung und zu den dort beschäftigten Wissenschaftlern. Dadurch kam es in Zusammenarbeit mit **MAX BEREK** zur Entwicklung von Polarisationsmikroskopen, die den Anforderungen der Biologen angepasst waren.

Als Erstes entstand das **CBMP**, bei dem man noch von einem großen mineralogischen Polarisationsmikroskop ausgegangen war. Als Nächstes kam das *Biopol* auf den Markt, das noch mehr Rücksicht auf Biologen nahm, die höchste Auflösung, raschen Objektivwechsel und eine streulichtfreie Objektbeleuchtung verlangten.

Die Feinstrukturuntersuchungen, die Schmidt mit dem Polarisationsmikroskop durchführte, befassten sich einmal mit tierischen Hartgebilden, wie Zahnschmelz und Zahnbein, und zum anderen mit verschiedenen Zellbestandteilen, wie der Kernteilungsspindel, der Kernmembran oder der Nervenscheide. Die daraus gewonnenen Ergebnisse fanden ihre Bestätigung durch elektronenmikroskopische Untersuchungen.

Schließlich verfasste Schmidt einige gut verständliche Einführungen in die Funktionsweise des Polarisationsmikroskops, und zwar als Beiträge für die Handbücher von **ABDERHALDEN**, **FREUND** und **PÉTERFI**.

ALBERT FREY-WYSSLING wurde in Küsnacht am Zürichsee geboren, wo sein Vater als Mittelschulprofessor für Chemie, Erdgeschichte und Anthropologie am dortigen staatlichen Lehrerseminar tätig war. Frey besuchte das kantonale Gymnasium der Stadt Zürich und studierte anschließend von 1919 bis 1923 Naturwissenschaften an der ETH in Zürich sowie im Wintersemester 1922/23 am Botanischen Institut der Universität Genf. Nach bestandener Diplomprüfung und der Promotion im Jahre 1923 erhielt er zwei Stipendien, und zwar zunächst eines für einen Aufenthalt am Institut für Wissenschaftliche Mikroskopie in Jena bei **HERMANN AMBRONN** und dann ein zweites für einen Besuch der Sorbonne in Paris. 1927 wurde Frey Privatdozent an der ETH in Zürich und ging von 1928 bis 1932 auf eine Weltreise, verbunden mit einem Studienaufenthalt auf Sumatra. Es folgten seit 1932 eine weitere Tätigkeit als Privatdozent an der ETH in Zürich und schließlich 1938 die Ernennung zum ordentlichen Professor für Allgemeine Botanik und Pflanzenphysiologie und zum Direktor des Instituts für Allgemeine Botanik an der ETH in Zürich, wo ihm 1948 ein Labor für Elektronenmikroskopie eingerichtet wurde.

Während sich Schmidt bei seinen Arbeiten auf das Polarisationsmikroskop beschränkt hatte, zog Frey-Wyssling für seine Untersuchungen auch andere lichtmikroskopische Spezialverfahren und das Elektronenmikroskop mit heran. Als Botaniker beschäftigte er sich intensiv mit der pflanzlichen Zellwand, worüber er auch mehrere zusammenfassende Werke schrieb. Weiterhin untersuchte Frey-Wyssling ebenso wie Schmidt den submikroskopischen Feinbau des Cytoplasmas.

Literatur

- Ambronn, H.: Anleitung zur Benutzung des Polarisationsmikroskops bei histologischen Untersuchungen. J.H. Robolsky, Leipzig 1892
- Ambronn, H., A. Frey: Das Polarisationsmikroskop. Seine Anwendung in der Kolloidforschung und in der Färberei. Akademische Verlagsgesellschaft m.b.H., Leipzig 1926
- Arago, F.: Ueber die Polarisation des Lichtes. In: Franz Arago sämtliche Werke. Bd. 7, S. 244–368. Hrsg. W.G. Hankel. Otto Wigand, Leipzig 1860. – Dieser Aufsatz wurde im Jahre 1824 für den 18. Band der Encyclopaedia Britannica geschrieben und von Thomas Young ins Englische übersetzt.
- Bartholinus, E.: Versuche mit dem doppeltbrechenden Isländischen Kristall, die zur Entdeckung einer wunderbaren und außergewöhnlichen Brechung führten. Übers. von K. Mieleitner. Ostwalds Klassiker der Exakten Wissenschaften, Bd. 205. Begr. von W. Ostwald, fortgeführt von A.v. Oettingen. Neu herausgegeben von W. Ostwald. Akadem. Verlagsges. m.b.H., Leipzig 1922
- Bretschneider, L.H.: Die polarisationsoptischen Untersuchungen W.J. Schmidt's und ihre Bedeutung für die Elektronenmikroskopie. In: Festschrift für W.J. Schmidt zum 70. Geburtstag 21. Februar 1954. S. 13–31. Wilhelm Schmitz, Gießen 1954. Zugleich erschienen als »Bericht der Oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde zu Gießen«, Neue Folge, Naturwissenschaftliche Abteilung Bd. 27 (1954)
- Ebner, V.v.: Untersuchungen über die Ursachen der Anisotropie organisirter Substanzen. Engelmann, Leipzig 1882
- Ehrenberg, C.G.: Über eine neue einflussreiche Anwendung des polarisirten Lichtes für mikroskopische Auffassung des Organischen und Anorganischen. Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königl. Preuss. Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Aus dem Jahre 1848. S. 238–247
- Ehrenberg, C.G.: Weitere Mittheilungen über Resultate bei Anwendung des chromatisch-polarisirten Lichtes für mikroskopische Verhältnisse. Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königl. Preuss. Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Aus dem Jahre 1849. S. 55–76
- Erlach, K.v.: Mikroskopische Beobachtungen über organische Elementartheile bei polarisirtem Lichte. Archiv für Anatomie, Physiologie und Wissenschaftliche Medicin, 313–337 (1847)
- Frey-Wyssling, A.: Das wissenschaftliche Werk W.J. Schmidts (21.2.1884–14.2.1974). Microscopica Acta 77, 105–113 (1975)
- Frey-Wyssling, A.: Lehre und Forschung. Autobiographische Erinnerungen. Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Peter Sitte, Freiburg. Grosse Naturforscher, Bd. 44, Hrsg. H. Degen. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart 1984
- Grehn, J.: Zum Tode von Wilhelm J. Schmidt (21.2.1884–14.2.1974). Microscopica Acta 76, 1–8 (1974)
- Hannover, A.: Bericht über die Leistungen in der skandinavischen Literatur im Gebiete der Anatomie und Physiologie in den Jahren 1841–1843. Archiv für Anatomie, Physiologie und Wissenschaftliche Medicin, S. 1 (1844)
- Mohl, H.v.: Die Untersuchung des Pflanzengewebes mit Hülfe des polarisirten Lichts. Botan. Zeitung 16, 1–6, 9–18 (1858)
- Mohl, H.v.: Einige nachträgliche Bemerkungen zu dem Aufsatz: Die Untersuchung des Pflanzengewebes mit Hülfe des polarisirten Lichtes und Erklärung der Taf. I. Botan. Zeitung 16, 373–375 (1858)

- Moore, H.: Henry Clifton Sorby 1826–1908. In: Geschichte der Mikroskopie. Leben und Werk großer Forscher. Bd. III Angewandte Naturwissenschaften und Technik. Hrsg. H. Freund, A. Berg. S. 409–416. Umschau Verlag, Frankfurt am Main 1966
- Mosebach, H.: Hermann Vogelsang 1838–1874. In: Geschichte der Mikroskopie. Leben und Werk großer Forscher. Bd. III Angewandte Naturwissenschaften und Technik. S. 473–481. Umschau Verlag, Frankfurt am Main 1966
- Mosebach, H.: Ferdinand Zirkel 1838–1912. In: Geschichte der Mikroskopie. Leben und Werk großer Forscher. Bd. III Angewandte Naturwissenschaften und Technik. Hrsg. H. Freund, A. Berg. S. 515–524. Umschau Verlag, Frankfurt am Main 1966
- Ramdor, P.: Harry Rosenbusch 1836–1914. In: Geschichte der Mikroskopie. Leben und Werk großer Forscher. Bd. III Angewandte Naturwissenschaften und Technik. Hrsg. H. Freund, A. Berg. S. 343–348. Umschau Verlag, Frankfurt am Main 1966
- Rosenbusch, H.: Mikroskopische Physiographie der Mineralien und Gesteine. Ein Hilfsbuch bei mikroskopischen Gesteinsstudien. Bd. 1 Die petrographisch wichtigen Mineralien. 2. Aufl. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1885. Bd. 2 Massige Gesteine 1887
- Schacht, H.: Physiologische Botanik. Die Pflanzenzelle, der innere Bau und das Leben der Gewächse. Für Botaniker, Anatomen, Chemiker, Forst- und Landwirthe, sowie für Naturkundige überhaupt. G.W.F. Müller, Berlin 1852
- Schmidt, W.J.: Die Bausteine des Tierkörpers in polarisiertem Lichte. Friedrich Cohen, Bonn 1924
- Schmidt, W.J.: Die Doppelbrechung von Karyoplasma, Zytoplasma und Metaplasma. Protoplasma-Monographien Bd. 11. Gebrüder Borntraeger, Berlin 1937
- Schmidt, W.J.: Instrumente und Methoden zur mikroskopischen Untersuchung optisch anisotroper Materialien mit Ausschluß der Kristalle. In: Handbuch der Mikroskopie in der Technik. Bd. 1. Die optischen Grundlagen, die Instrumente und Nebenapparate für die Technik. Teil 1: Allgemeines Instrumentarium der Durchlichtmikroskopie, S. 147–315. Hrsg. H. Freund. Umschau Verlag, Frankfurt am Main 1957
- Schmidt, W.J.: Victor von Ebner 1842–1924. In: Geschichte der Mikroskopie. Leben und Werk großer Forscher. Bd. I Biologie, S. 175–188. Hrsg. H. Freund, A. Berg. Umschau Verlag, Frankfurt am Main 1963
- Schmidt, W.J.: Gabriel Gustav Valentin 1810–1883. In: Geschichte der Mikroskopie. Leben und Werk großer Forscher. Bd. II Medizin, S. 413–422. Hrsg. H. Freund, A. Berg. Umschau Verlag, Frankfurt am Main 1964
- Valentin, G.: Grundriß der Physiologie des Menschen. Für das erste Studium und zur Selbstbelehrung. 3. gänzlich umgearbeitete und vermehrte Aufl. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig 1851
- Valentin, G.: Die Untersuchung der Pflanzen- und Thiergewebe in Polarisirtem Lichte. Wilhelm Engelmann, Leipzig 1861
- Zirkel, F.: Die mikroskopische Beschaffenheit der Mineralien und Gesteine. Engelmann, Leipzig 1873