

Geschichte der Physik - Ernst Abbe

Copyright © Michel Messerschmidt 1997

Chronologie

- geboren am 23.1.1840
- 1857-61 Studium in Jena und Göttingen
- ab 1863 Privatdozent in Jena (für Mathematik und Physik)
- ab 1866 Mitarbeit bei dem Optiker Carl Zeiß
- 1871/72 Beginn des wissenschaftlich basierten Mikroskopbaus
- 1875 Teilhaberschaft an der Werkstätte von Zeiß
- 1879 erste Kontakte zu Otto Schott
- 1884 Gründung der "Glastechnischen Versuchsanstalt Schott & Gen." in Jena
- 1888 Tod von Carl Zeiß und daraufhin Gründung der Carl-Zeiß-Stiftung
- 1905 Tod von Ernst Abbe

Arbeitsweise

„Zu einem Physiker in der Praxis gehören zweierlei: Erstens, dass der Betreffende selbständig arbeiten, sich selbst Aufgaben stellen und die Hilfsmittel für ihre Bearbeitung sich selbst zurechtmachen könne. Mit überlieferten Regeln und Anweisungen ist nicht weit zu kommen, die Aufgaben sind zu mannigfaltig und werden fortwährend andere. Zweitens, eine lebendige Föhlung mit der Praxis, die natürlich nur in einer längeren Erfahrung erworben werden kann. Man muss wissen, welche Mittel die Technik zur Verfügung hat, um das zu erreichen, was die Theorie als möglich erweist; was man der Technik zutrauen kann und was nicht.“

Dieses Zitat Abbes kennzeichnet seine Arbeitsweise wohl am besten. Abbe, der den größten Teil seines Lebens in der „feinmechanischen Werkstätte“ von Carl Zeiß mitgearbeitet hat, legte großen Wert auf eine enge Verbindung von Theorie und Praxis. So war es sein Verdienst, eine umfassende Theorie des Mikroskops zu entwickeln. Allerdings entstand diese mit der Absicht, den Gerätebau auf eine wissenschaftliche Grundlage zu stellen. Auch die Tatsache, dass Abbe seine Theorie nie ausformuliert und veröffentlicht hat (es erschien lediglich eine kappe Übersicht seiner Ergebnisse) zeigt, dass Abbe die praktische Anwendung wichtiger war als die reine Theorie.

So sind viele seiner Erkenntnisse heute nur ungenau zu datieren, da sich kaum Schriften darüber finden lassen.

Die theoretische Herleitung seiner Theorie wurde nach seinem Tod aus Vorlesungsnotizen nachvollzogen und vervollständigt. Abbe selber hatte keine Zeit dafür gefunden.

Statt dessen verwandte er viel Zeit darauf, die verschiedenen Linsen zu berechnen und die fertigen Exemplare zu überprüfen. Besonders wichtig war es ihm, die Herstellungsmethoden so weit zu verbessern, dass die theoretisch möglichen Werte für das Auflösungsvermögen in der Praxis möglichst gut erreicht wurden. So gibt es viele Geräte zur Arbeitserleichterung und -präzisierung, die Abbe konstruiert hat: das Refraktometer (zur Bestimmung der Brechzahl eines festen oder flüssigen Stoffes), einen verbesserten Kondensator (Beleuchtungseinrichtung am Mikroskop), das Fokometer (Brennweitenmessung), etc.

Letztlich war die Entwicklung der Mikroskoptheorie eher eine Art „Nebenprodukt“ seiner praktischen Tätigkeit, als sein vorrangiges Forschungsziel.

Entwicklung des Mikroskops

Im Prinzip kann man sich jedes Mikroskop aus nur zwei Linsen, dem Objektiv und dem Okular, zusammengesetzt vorstellen, auch wenn diese in der Regel aus ganzen „Linsensystemen“ bestehen.

Das Objektiv (die dem Objekt zugewandte Linse) erzeugt ein vergrößertes, reelles Zwischenbild des Objekts in der Brennebene des Okulars. Die vom reellen Zwischenbild ausgehenden Strahlen werden vom Okular also so gebrochen (und nochmals vergrößert), dass

sie das Auge als parallele Strahlen erreichen. Somit sieht man ein virtuelles Bild des Objekts im unendlichen. Entscheidend ist dabei die Auflösung des Objektivs.

Allgemein galt, dass man mit einem größeren Öffnungswinkel auch eine bessere Auflösung erreichte. Allerdings verstärkten sich damit auch die Abbildungsfehler.

Beim Schleifen der Linsen wurde die Methode des „Pröbelns“ benutzt; vereinfacht gesagt wurde einfach solange herumprobiert, bis die Linsen zueinander passten. Einerseits war das relativ aufwendig, andererseits konnte oft nur ein geringer Teil der gefertigten Linsen für Mikroskope genutzt werden. Also versuchte Abbe, die benötigten Linsenformen erst zu berechnen, um dieses Verfahren abzukürzen. Dabei versucht er es zunächst mit einem kleineren Öffnungswinkel, um die Abbildungsfehler zu verringern. Wie allgemein erwartet, hatte die nach seinen Berechnungen gefertigten Objektive eine geringere Auflösung als geprübelte Objektive. Doch für Abbe war dies keineswegs selbstverständlich. Denn die vom Objekt ausgehenden Lichtstrahlen durchliefen eigentlich nur einen recht geringen Bereich des Objektivs. Warum brauchte man für besser aufgelöste Abbildungen noch einen „ungenutzten“ Randbereich des Objektivs? Abbes erster Ansatz war, dies durch Brechung des Lichts am Objekt zu erklären. Doch auch ausführliche Experimente lieferten dafür keinen Hinweis. Bei diesen Experimenten entdeckte er aber, dass man, wenn man das Okular entfernte und direkt auf das Objektiv blickte, ein Bild der Lichtquelle sowie ein ganzes Beugungsspektrum (also ein Beugungsbild der Lichtquelle in der Brennebene des Objektivs) sehen kann. Also entsteht das Zwischenbild (in der Brennebene des Okulars) durch Interferenz der am Objekt gebeugten Lichtstrahlen. Das Objekt wirkt somit wie ein Gitter.

Damit ist auch verständlich, warum der „ungenutzte“ Raum des Objektivs notwendig ist. Nämlich für die Nebenmaxima der Beugung. Würde nur das Hauptmaximum vom Objektiv erfasst werden, könnte keine Interferenz stattfinden und man würde nur ein einheitliche Fläche sehen. Für eine Mikroskopabbildung sind also mindestens noch das ± 1 . Nebenmaximum erforderlich.

Aus dieser Bedingung ergibt sich dann auch die Formel für das Auflösungsvermögen:

$$d = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha}, \text{ bzw. } d = \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \alpha} \text{ für schiefe Beleuchtung.}$$

Dabei ist d der minimal auflösbare Abstand, λ die Wellenlänge, n die Brechzahl des Mediums zwischen Objekt und Objektiv und α der halbe Öffnungswinkel.

Zwar erhöhen weitere Nebenmaxima die Qualität der Abbildung, da ihre Intensität aber sehr schnell abnimmt, sind sie für die Abbildung nicht von besonderer Bedeutung.

Weiterhin definiert man die numerische Apertur $A = n \cdot \sin \alpha$ als gerätespezifische Größe. Somit lässt sich die Auflösung durch eine geringere Wellenlänge (bei weißem Licht nicht realisierbar) oder eine größere Apertur steigern. Allerdings werden mit größeren Aperturen (bzw. Öffnungswinkeln) auch die Abbildungsfehler stärker, so dass der Auflösung eine natürliche Grenze gesetzt ist.

Eine weitere wichtige Erkenntnis war die Abbesche Sinusbedingung: $G \cdot \sin \theta_1 = B \cdot \sin \theta_2$ (mit G =Gegenstandsgröße, B =Bildgröße, θ_1, θ_2 = Abbildungswinkel auf der Gegenstands- bzw. Bildseite). Diese Formel ermöglicht eine scharfe Abbildung nicht nur eines Punktes sondern einer ganzen Fläche. Die nach diesem Prinzip gebauten Objektive heißen Aplanate.

Damit ließen sich jetzt Mikroskope berechnen, die so gut wie möglich an die theoretische Auflösungsgrenze angepasst waren.

Daraufhin wandte sich Abbe der Frage zu, wie sich die Abbildungsfehler verringern ließen. Er erkannte, dass man neue Glassorten statt der bisher üblichen (Flint- und Kronglas) brauchte. So begann eine Zusammenarbeit mit dem Chemiker Otto Schott, in deren Verlauf Hunderte von Stoffen auf Brechzahl und Dispersion untersucht wurden.

Dispersion ist ein Maß für die Abhängigkeit der Brechzahl von der Wellenlänge (z. B. werden rotes und blaues Licht von demselben Material verschieden stark gebrochen). Das Ergebnis dieser Bemühungen waren dann die Achromate. Da es recht lange dauerte, bis diese Forschungsergebnisse zeigten, versuchte Abbe Alternativen zu finden. Nach einigen Versuchen mit Flüssigkeitslinsen („Polyobjektive“) führte dies zu der homogenen Immersion. Bei

Immersionssystemen ist im Gegensatz zu den sog. Trockensystemen der Raum zwischen Objekt und Objektiv mit einer Flüssigkeit gefüllt, wodurch die Apertur und damit das Auflösungsvermögen gesteigert werden. Der Vorteil der homogenen Immersion ist, dass die Brechzahl der Flüssigkeit mit der Brechzahl der ersten Objektivlinse sowie der des Deckglases auf dem Objekt nahezu identisch ist (daher der Name homogen). Dadurch muss die Lichtbrechung am Deckglas nicht mehr wie bisher korrigiert werden, und man erzielt eine höhere Lichtstärke, da die Totalreflexion am Deckglas wegfällt. Außerdem ergibt sich dadurch eine größere Auflösung.

Mit der Einführung der Achromate, die erst durch Verwendung von Flussspat entstanden, konnte man dann die Abbildungsfehler erheblich gegenüber den herkömmlichen Linsen und Achromaten verringern. Durch die damit möglichen größeren Aperturen ließen sich auch höhere Auflösungen erreichen.

Weitere Entwicklungen

- Phasenkontrastverfahren (Zernicke, 1932):

Mikroskope können normalerweise nur sog. Amplitudenobjekte sichtbar machen. Diese heißen so, weil die Lichtamplitude von der Durchlässigkeit des jeweiligen Punkts der Objektstruktur abhängt. Statt dessen verändern Phasenobjekte nur die Phase der Lichtwellen (durch lokal schwankende Brechzahlen) nicht die Amplitude, sind also für das Auge durchsichtig, obwohl sie eine Struktur besitzen (z. B. bestimmte Bakterien). Die Abbildung von Phasenobjekten folgt dem selben Prinzip wie für Amplitudenobjekte. Zernicke fand heraus, dass der Unterschied zwischen den Beugungserscheinungen an einem Amplitudenobjekt und einem Phasenobjekt „nur“ in einer Phasenverschiebung der Lichtintensität um $\pi/2$ besteht. Also wird das Objektiv um eine „Phasenplatte“ ergänzt, die eine entsprechende Phasenverschiebung bewirkt und die Phasenobjekte somit sichtbar macht. Damit entfällt dann das Einfärben der Objekte.

- Elektronenmikroskop (1931):

Das Objekt wird von einem Elektronenstrahl durchdrungen, der je nach Struktur mehr oder weniger stark abgelenkt und auf einen Leuchtschirm projiziert wird. Die Objektpräparation ist sehr aufwendig.

- Raster-Elektronenmikroskop (1939):

Das Objekt wird punktwise mit einem Elektronenstrahl abgetastet. Dabei werden vom Objekt sekundäre Elektronen emittiert, deren Anzahl die Intensität des Bildpunkts bestimmt. Ergibt sehr plastische Bilder. Sehr einfache Präparation des Objektes.

- Tunnel-effekt-Raster-Elektronenmikroskop (1982):

Es nutzt den Tunnel-Effekt, der darin besteht, dass die Elektronenwolke der Oberflächenatome eines Materials auch außerhalb der Materialoberfläche wirkt. Eine winzige nadelförmige Elektrode wird gerade so über die Objektoberfläche geführt, dass eine konstante Elektronendichte gemessen wird. Ergibt sehr genaue dreidimensionale Strukturen bis zu einer Größe von 10-11 m (einzelne Atome sind erkennbar).

Carl-Zeiß-Stiftung

Nach dem Tod von Carl Zeiß 1888 wurde darauf von Abbe 1889 die Carl-Zeiß-Stiftung gegründet, die nach seinem eigenen Tod den Betrieb weiterführen sollte. Nachdem ihm Roderich Zeiß, der Sohn Carls, seine Anteile gegen eine Abfindung überlassen hatte, überschrieb Abbe 1891 das Zeiß-Werk und seine Hälfte des Schott-Werkes an die Stiftung und nahm selber die Stelle eines der drei Geschäftsführer ein. Die Stiftungsstatute sahen unter anderem einen Achtstundentag, z. T. bezahlten Urlaub, Krankenversicherung und begrenzte Mitbestimmung der Arbeiter vor, was in jener Zeit keineswegs selbstverständlich war. So wurde Abbe dann, als er 1903 von der Geschäftsleitung zurücktrat, von der Belegschaft mit einem Fackelzug durch Jena geehrt. Diese Tatsachen ebenso wie seine Bemühungen für die Jenaer Universität (u. a. ließ er auf eigene Kosten eine neue Sternwarte bauen) gehören meiner Meinung nach zu Abbe Leben ebenso dazu wie seine wissenschaftlichen Erfolge, wenn man versuchen will, seine Ideen nachzuvollziehen.

Literatur

Wittig, Joachim: Ernst Abbe, Teubner, Leipzig 1989

Freitag, C., Rechenberg, H.; Ernst Abbe, in Phys. Bl. 1990 Nr.1, S.8-10

Große Männer der Weltgeschichte, Neuer Kaiser Verlag, Klagenfurt 1987, S.7

Breuer, Hans: dtv-Atlas zur Physik, dtv, München 1989

Bergmann, Schäfer: Experimentalphysik - Band 3: Optik, de Gruyter, Berlin 1993