

Der mikroskopische Blick

- der lange Weg von den Anfängen der Optik
bis zur Elektronenmikroskopie der Atome

Knut W. Urban,

*Ernst-Ruska-Centrum für Mikroskopie und Spektroskopie mit Elektronen,
RWTH Aachen und Forschungszentrum Jülich*

Als im frühen 12. Jahrhundert der Arabische Mathematiker Ibn-al-Haytham (Alhazen) sein berühmtes Lehrbuch der geometrischen Optik veröffentlichte, war dieses Gebiet bereits knapp zweitausend Jahre alt. Dass es noch ein weiteres halbes Jahrtausend brauchte, bis auf dieser Basis die ersten Lichtmikroskope gebaut wurden, liegt nicht zuletzt daran, dass die Menschen der damaligen Zeit keine Vorstellung dafür entwickelt hatten, dass es eine sichtbare Welt geben könnte, die zudem für sie von Bedeutung sein würde. Die Entwicklung der Lichtmikroskopie war im Wesentlichen abgeschlossen als es **Ernst Abbe** in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts gelang, die sphärische und chromatische Aberration durch den Einsatz von Systemen von Linsen, die aus verschiedenen Glassorten hergestellt wurden, zu beseitigen. Dies führte zu dem großartigen Siegeszug der Präzisionsoptik, deren heutiger Stand der Technik durch eine rund tausendfache Vergrößerung in der Mikroskopie, durch asphärische Vielfachlinsen-Objektive in der Photographie und durch Nanometer-Strukturen in der Lithographie der Mikroelektronik charakterisiert werden kann.

Ernst Ruska, Bodo von Borries und Max Knoll entwickelten um 1933 in Berlin die Durchstrahlungselektronenmikroskopie (TEM) aus der Oszillographentechnik ohne jede Kenntnis der zu dieser Zeit bereits bekannten Wellennatur der Elektronenstrahlen (G.P. Thomson, 1927). Die Rasterelektronenmikroskopie (STEM) wurde von **Manfred von Ardenne** ebenfalls in Berlin 1937 erfunden. Aus diesen Arbeiten entwickelte sich in den folgenden fünfzig Jahren eines der erfolgreichsten wissenschaftlichen Instrumente, ohne das die moderne Physik und Materialwissenschaft auf der einen und die Biologie und Medizin auf der anderen Seite nicht denkbar wären. Allerdings gelang es trotz jahrzehntelanger Anstrengungen nicht, die optischen Aberrationen der elektromagnetischen Elektronenlinsen zu beseitigen. Aufgrund des Gaußschen Gesetzes für den Magnetismus ($\nabla \mathbf{B}=0$) kann man mit einfachen magnetischen Feldern keine Zerstreulinse bauen, welche nach der Abbeschen Theorie zur Kompensation der Aberrationen unumgänglich ist. Noch Ende der 1980er Jahre ging man daher davon aus, dass der atomare Bereich der Elektronenmikroskopie aus prinzipiellen Gründen verschlossen sei. In den 1990er Jahren gelang es dann **Maximilian Haider, Harald Rose und Knut Urban** mit Hilfe eines Systems von Hexapollinsen, die zusammen, in zweiter Ordnung, die Wirkung einer Zerstreulinse haben, das durch das Naturgesetz gegebene Hindernis zu umgehen und auf der Basis einer neuen aberrationskorrigierten Elektronenoptik, das erste atomauflösende Elektronenmikroskop zu bauen.

Um die elektronenmikroskopischen Bilder in atomaren Dimensionen zu verstehen, muss man sich zuallererst klarmachen, dass für diese Dimensionen die Quantenphysik gilt. Daher entstehen Forschungsergebnisse der modernen Elektronenmikroskopie in einem Wechselspiel zwischen experimentellen Bildern und deren Interpretation mithilfe von Lösungen der relativistisch korrigierten Schrödingergleichung. Dies wird im Vortrag anhand von Untersuchungen an Oxiden und Dielektrika demonstriert und veranschaulicht. Dabei wird heute eine Präzision von Messungen der Atompositionen und Atomverschiebungen von 1 Pikometer erreicht, das ist ein Hundertstel des Bohrschen Atomdurchmessers des Wasserstoffatoms.