

I. Der Weg ins Kleinste

1. Atome, Kerne, Quarks; ihre Größenordnungen und wie man sie untersucht

1.1 Physik ist auch die Wissenschaft vom Messen

Mit der Physik verbindet man unwillkürlich die großen Gedankengebäude, mit denen erklärt wird, was "die Welt im Innersten zusammenhält". Beispiele dafür sind u.a. die Mechanik, die Relativitätstheorie und die Quantenphysik. Dabei vergisst man leicht, dass diese Gedankengebäude erst das Ende eines langen Forschungsprozesses waren, an dessen Anfang einzelne neue empirische Erkenntnisse standen. Denn die Grundlage naturwissenschaftlicher Erkenntnis ist die Beobachtung oder das Experiment. Das gilt für alle Naturwissenschaften. Speziell in der Physik ist die quantitative Beobachtung, d.h. das Messen, die Grundlage der Theoriebildung.

Messen aber ist keineswegs trivial. Ja, man kann sagen, dass ein Fortschritt in der Meßtechnik oft auch einen Fortschritt im Naturverständnis mit sich gebracht hat. Zunächst muss man sich Methoden ausdenken und die zugehörigen Geräte erfinden, mit denen eine bestimmte Eigenschaft gemessen werden soll. Dann muss man kontrollieren, ob die Methode auch verlässlich ist, d.h. man muss die Geräte auf alle möglichen Fehlerquellen untersuchen. Jede Methode hat jedoch auch ihre praktischen und prinzipiellen Grenzen der Genauigkeit. Man kann z.B. mit einem Lineal die Breite eines Blattes messen, aber nicht die Größe eines Atoms. Hier erhebt sich die Frage: Warum eigentlich nicht? Mit bloßem Auge können wir gerade noch ein Haar sehen, aber keine Details mehr erkennen.

Versuch: Bestimmung eines Haardurchmessers

Mit einem Overhead-Projektor werden ein Haar und ein durchsichtiges Lineal auf einen Schirm projiziert. Mit einem zweiten Maßstab misst man die Breite des vergrößerten Haares und eines vergrößerten Millimeters. Als Dicke eines Haares erhält man Werte zwischen 0,05 mm und 0,1 mm.

1.2 Größenordnungen

Objekte der materiellen Welt haben i.a. eine Ausdehnung, d.h. sie erfüllen ein gewisses, oft kompliziert geformtes Volumen des 3-dimensionalen Raumes. Ob es punktförmige Objekte gibt, d.h. solche, die keine Ausdehnung besitzen, wissen wir nicht. Es wird jedoch für bestimmte Elementarteilchen wie Elektronen, Neutrinos und Quarks vermutet, dass sie eine solch ungewöhnliche Eigenschaft besitzen. In dieser Vorlesung wollen wir die verschiedenen Objekte, die kleiner als wir sind, durch ihre ungefähre Größe charakterisieren. Hierbei kommt es uns nicht auf die exakte Größe und nicht auf ein einzelnes Objekt, sondern nur auf bestimmte Gattungen und die zugehörigen Größenordnungen an. So sagen wir z.B. ein Auto sei einige Meter lang, eine Ameise einige Millimeter groß, ohne dass wir uns dabei auf ein spezielles Auto bzw. eine spezielle Ameise beziehen und deren exakte Größe angeben.

Aus einem Biologiebuch entnehmen wir ein Diagramm mit den Größenordnungen biologischer Objekte, die vom Menschen bis zu kleinen Molekülen und Atomen reichen.

Bei jedem Schritt ins Kleinere nimmt dabei die Ausdehnung um einen Faktor 10 - das ist eine Größenordnung - ab. So ist ein Atom 10 Größenordnungen kleiner als ein Mensch. Durch Pfeile ist auch angegeben, mit welchen Methoden die Gestalt der Objekte für bestimmte Größenordnungen sichtbar gemacht werden können. Bis zu Objekten von einem Zehntel Millimeter Größe, dem ungefähren Durchmesser eines Haares, kann man das Auge benutzen, wobei die Lupe oder - wie in unserem Fall - der Overhead-Projektor als Vergrößerungshilfe willkommen ist.

Unterhalb dieser Grenze muss man andere Geräte, sogenannte Mikroskope einsetzen. Das Lichtmikroskop hat eine sinnvolle Vergrößerung von einem Faktor Tausend bis Zehntausend, so dass man damit entsprechend kleine Objekte auflösen kann.

Bei noch kleineren Objekten muss man ein Elektronenmikroskop zur Hilfe nehmen, in dem nicht Licht, sondern Elektronen benutzt werden, um das Objekt abzubilden. Dieses Gerät kommt beim Atom an seine Grenzen.

Die in Abb 1.1 gezeigte Skala der biologischen Objekte muss noch weiter fortgesetzt werden hin zu Objekten, die zwar für die Biologie und die Chemie nicht mehr interessant sind, aber in der Physik des vorigen Jahrhunderts entdeckt wurden: Atome enthalten Atomkerne, die Kerne bestehen aus Nukleonen und diese wiederum aus Quarks, den bisher kleinsten Bausteinen der Materie. Man untersucht heute Objekte, die fast acht Größenordnungen kleiner als ein Atom sind. Das Elektronenmikroskop, das die Biologen benutzen, ist in diesem Bereich nicht mehr brauchbar, aber das Messprinzip hat sich nicht geändert. Die hier benutzten Mikroskope sind große Elektronenbeschleuniger. Oft sind sie kreisförmig gebaut, wie z.B. beim DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) in Hamburg und können einen Durchmesser von einigen Kilometern haben. Als Faustregel gilt:

Je kleiner die Objekte, die man untersuchen will, desto größer, aufwendiger und auch teurer das Instrument.

Hinter dieser Faustregel steckt ein tiefes physikalisches Gesetz, das im folgenden diskutiert werden soll.

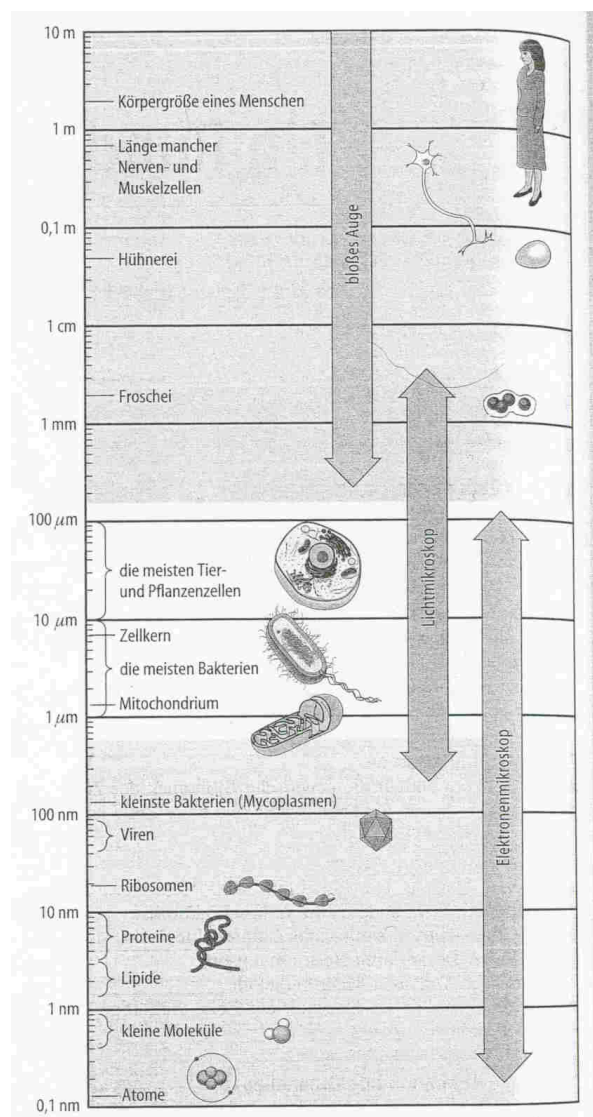


Abb. 1.1: Übersicht über die Größenordnungen vom Menschen bis zum Atom mit biologischen Objekten und Instrumenten zu ihrer Untersuchung.

1.3 Wellen und das Phänomen der Beugung

Als Beispiele für Instrumente, mit denen man Objekte untersuchen kann, haben wir im vorigen Abschnitt neben dem Auge Licht- und Elektronenmikroskope sowie Elektronenbeschleuniger kennen gelernt. Wir wollen nicht auf den detaillierten Aufbau und die Wirkungsweise dieser Apparate eingehen, sondern das entscheidende Phänomen diskutieren, das die Auflösung von Mikroskopen begrenzt. Man nennt den kleinsten Abstand, bei dem mit einem Mikroskop zwei Punkte noch getrennt wahrgenommen werden können, die Auflösungsgrenze. Sie hängt mit der Wellennatur des Lichtes oder der Elektronen zusammen.

Zunächst sollen einige Welleneigenschaften an den allen bekannten Wasserwellen erklärt werden. Wenn man auf eine Wasseroberfläche schaut, sieht man eine regelmäßige Abfolge von Bergen und Tälern. Der Abstand zweier benachbarter "Bergspitzen" wird Wellenlänge λ dieser Welle genannt. Es ist die entscheidende Größe, durch die eine Welle charakterisiert wird. Bei Schallwellen, die aus einer regelmäßigen Abfolge von "Bergen", das sind die Stellen hohen Luftdrucks und "Tälern", den Stellen mit niedrigem Luftdruck bestehen, hängt die Wellenlänge von der Tonhöhe ab. Zum Kammerton a' gehört z.B. eine Wellenlänge von $\lambda = 75$ cm. Je höher der Ton, desto kürzer die Wellenlänge; das wissen alle, die ein Instrument spielen.

Auch Licht kann man als Wellenphänomen beschreiben, wobei "Berge" und "Täler" Stellen großer bzw. kleiner elektrischer und magnetischer Feldstärke sind. Für das sichtbare Licht liegt die Wellenlänge im Bereich zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und $1 \mu\text{m}$ (10^{-6} m). Der genaue Wert hängt noch von der Farbe ab: rotes Licht hat eine größere Wellenlänge als blaues. Auch die Elektronen, das wissen wir aus der Quantenphysik, können als Wellen angesehen werden. Ihre Wellenlänge ist im allgemeinen noch viel kleiner als die des Lichtes und hängt von der Geschwindigkeit der Elektronen ab, kann also verändert werden.

Alle Wellen zeigen das Phänomen der Beugung. Ganz vereinfacht gesagt heißt das, dass Wellen "um die Ecke laufen" können. Dies soll an Hand einer ganz einfachen Szene erklärt werden. Hierzu stellen wir uns folgendes vor: Wir sitzen hier im Hörsaal, die Tür ist offen. Draußen im Flur findet eine Schiesserei statt. Wir werden von den Geschossen nicht getroffen, weil wir nicht in der direkten Schusslinie sind, hören aber die Schüsse. Warum? Weil die Schallwellen an der Türöffnung um die Ecke gehen, die Kugeln aber nicht.

Ja, aber warum sehen wir die Schiesserei nicht, wenn doch auch das Licht wie der Schall ein Wellenphänomen ist? Das liegt daran, dass Licht eben eine viel kürzere Wellenlänge als der Schall hat. Schall mit einer Wellenlänge von 1 m wird an einer etwa 1 m breiten Tür gebeugt. Aber für Licht ist die Tür viel zu breit. Könnte man die Tür so eng machen wie die Wellenlänge des Lichtes, dann würde auch das Licht gebeugt. Das wurde in einem Versuch mit Laserlicht und einem veränderlichen Spalt gezeigt. Wenn die Spaltöffnung kleiner oder vergleichbar mit der Wellenlänge des Lichtes ist, dann ist das Bild auf dem Schirm nicht mehr durch die Breite des Spaltes bestimmt, sondern nur noch durch die Beugungsbilder. Man sieht sogar, dass das Bild größer wird, wenn der Spalt schmaler wird. Daraus folgt, dass man Licht nicht mehr zur Abbildung sehr enger Spalte benutzen kann. Ähnliches zeigen Versuche mit Wasserwellen (siehe unten).

Das Phänomen der Beugung, d.h. dass das Licht um die Ecke geht und damit nicht mehr die genaue Gestalt des Objektes abbildet, begrenzt das Auflösungsvermögen optischer Instrumente.

Die prinzipielle Auflösungsgrenze eines Instrumentes ist erreicht, wenn das Objekt etwa so groß wie die Wellenlänge der im Instrument verwandten Strahlung ist.

Versuch: Beugung von Wasserwellen an Spalten mit verschiedener Öffnung

In einer Wellenwanne treffen Wasserwellen auf ein Hindernis mit einem Spalt, wobei sich die folgenden Wellenbilder ergeben.

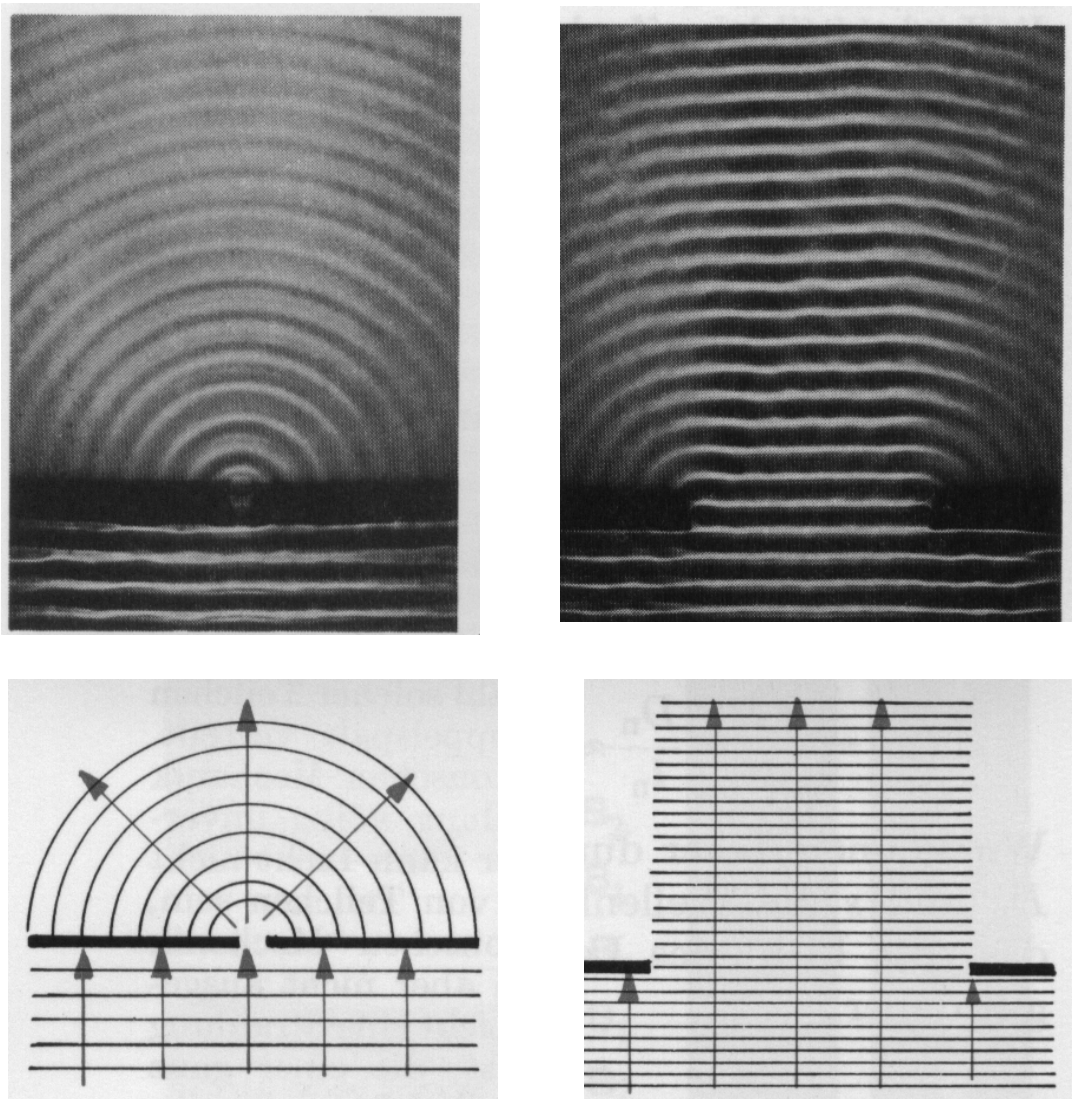


Abb. 1.2: Fotografien und schematische Darstellungen von an Spalten gebeugten Wasserwellen. Links: Die Spaltbreite ist etwa so groß wie die Wellenlänge, so dass die einlaufende Welle deutlich gebeugt wird, d.h. um die Ecke geht. Rechts: Die Spaltbreite ist deutlich größer als die Wellenlänge, so dass die Welle kaum gebeugt wird. Die linke Situation entspricht der Beugung von Schall, die rechte der von Licht an einer Türöffnung.

1.4 Licht- und Elektronenmikroskope und ihre Auflösungsgrenzen

Zunächst einmal ist folgende Unterscheidung wichtig: Für das Auflösungsvermögen eines optischen Instrumentes gibt es praktische und prinzipielle Grenzen. Letztere folgen aus Naturgesetzen und können nicht durch eine verbesserte Konstruktion überwunden werden. In diesem Sinn ist das Auflösungsvermögen des Auges nicht an der prinzipiellen Grenze angekommen, sondern durch seinen Bau bedingt. Und dieser ist auf die vielfältigen Aufgaben ausgerichtet, für die das Auge gebraucht wird. Im täglichen Leben z.B. müssen wir nicht nur die ganz kleinen Dinge sehen, sondern auch in die Ferne schauen können. Außerdem sollte das Auge nicht zu groß sein.

Auflösung des Auges:

Beim Auge tritt das Licht durch die Pupille von ca. 0.5 cm Durchmesser. Damit ist der Winkel der Aufspreizung durch Beugung etwa $0,006^\circ$, das entspricht 20" (Bogensekunden). Eine andere Begrenzung der Auflösung eines Auges ist die Dichte der Stäbchen auf der Netzhaut (Retina). Mit etwa 150 000 Stäbchen/mm² entspricht diese Begrenzung gerade etwa der, die durch die Öffnung der Pupille gegeben ist. Wieder einmal ein Beispiel, wie sinnvoll die Natur die Lebewesen ausstattet. Die obige Auflösung erlaubt es, in einer Entfernung von 25 cm noch ein Objekt der Größe 1/40 mm, z.B. ein Haar, zu erkennen.

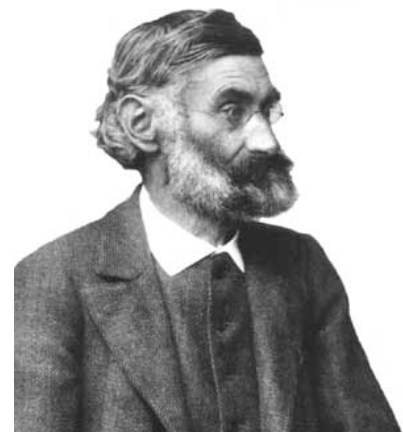
Die heutigen Lichtmikroskope erreichen im wesentlichen die Auflösungsgrenze für sichtbares Licht. Für Elektronenmikroskope bzw. -beschleuniger gibt es eigentlich keine prinzipielle Grenze, da man immer kleinere Wellenlängen erreichen kann, wenn man nur genügend viel Energie hineinpumpt. Die Grenze liegt deshalb heute eher im finanziellen Aufwand, der nötig ist, um solche Großgeräte zu bauen.

Eine Randbemerkung zur Fledermaus: Fledermäuse, die sich mit Hilfe von Schall orientieren, benutzen keine Schallwellen aus unserem Hörbereich. Deren Wellenlänge wäre viel zu groß, um mögliche Hindernisse oder Beutetiere zu erkennen. Der Ultraschall, den die Fledermäuse benutzen, hat Wellenlängen im Bereich unter einem Zentimeter.

1.5 Biographie: Ernst Abbe (1840 –1905)

Ernst Abbe wurde 1840 in Eisenach als erstes Kind eines Spinnereiarbeiters geboren. Er stammte also aus bescheidenen Verhältnissen, was sein ganzes Leben prägen sollte. Zur damaligen Zeit dauerte der Arbeitstag zwischen 14 und 16 Stunden und zwar ohne jede Pause. Wie hart die Arbeit war, erlebte der junge Ernst Abbe häufig, wenn er seinem Vater das Mitagsbrot brachte. Er selbst berichtet:

"Ich habe dabeigestanden, wie mein Vater das Essen, an eine Maschine gelehnt oder auf eine Kiste gekauert, aus dem Henkeltopf mit aller Hast verzehrte, um mir dann den Topf geleert zurückzugeben und sofort wieder an die Arbeit zu gehen."



Aufgrund seiner guten Leistungen erhielt Ernst Abbe vom Arbeitgeber seines Vaters ein Stipendium, das ihm ermöglichte, die höhere Schule zu besuchen. Mit 17 Jahren - ein Jahr vorzeitig - legte er die Reifeprüfung mit Auszeichnung ab. Seine Leistungen in Mathematik und in den Naturwissenschaften wurden besonders anerkannt.

Danach war es sein sehnlichster Wunsch zu studieren: Mathematik und Naturwissenschaften. Obwohl die finanzielle Grundlage für eine akademische Laufbahn nicht ausreichte, studierte Abbe von 1857 bis 1861 zunächst in Jena, dann in Göttingen - entschlossen, für das Studium auch größte materielle Entbehrungen hinzunehmen.

Bald schon erhielt er für ausgeschriebene Arbeiten Geldpreise. Als das in seinem Heimatort bekannt wurde, bewilligten ihm die Ratsherren ein bescheidenes Stipendium aus der öffentlichen Kasse, was es ihm ermöglichte, im teureren Göttingen weiter zu studieren. Auch dort führte er ein ähnlich bescheidenes Leben wie vorher.

Seine Doktorarbeit mit dem Titel "Erfahrungsmäßige Begründung des Satzes von der Äquivalenz zwischen Wärme und mechanischer Arbeit" wurde als "vorzüglich" beurteilt. Nach abgeschlossenem Studium arbeitete Ernst Abbe zunächst als Assistent an der Sternwarte in Frankfurt/ M., dann als Institutsleiter im "Physikalischen Verein".

Im Frühjahr 1863 habilitierte sich Abbe und begann als Privatdozent in Jena zu arbeiten. Da zu jener Zeit angehende Professoren üblicherweise aus wohlhabendem Hause stammten, stand ihnen kein Gehalt zu und die Kolleggelder waren lächerlich gering. Zu Abbes Aufgaben gehörte die Betreuung des sog. physikalischen Kabinetts der Universität; ihm oblag es, die vorhandenen Apparate und Instrumente in Ordnung zu halten. Die ganze Sammlung befand sich jedoch in einem erbarmungswürdigen Zustand, vieles war abgenutzt und beschädigt. Da der Etat des Instituts für Neuanschaffungen nicht ausreichte, richtete sich Abbe eine Werkstatt im Institut ein, reparierte und setzte neue Instrumente zusammen. Außerdem begann er in den Zeiß-Werken, selbst kleinere neue Apparate zu bauen. Während der Arbeit daran machte er sich mit der Herstellung optischer Instrumente (Mikroskope, Fotoapparate, Fernrohre) vertraut.

1870 wurde Ernst Abbe in Jena zum außerordentlichen Professor für Physik ernannt und behielt dieses Amt bis ins Jahr 1896.

Durch seine Arbeiten in den Zeiß-Werken erwuchs eine fruchtbare Zusammenarbeit mit dem Firmenbegründer Carl Zeiß. Abbe erhielt den Auftrag, an der Weiterentwicklung des Zeiß'schen Mikroskops zu arbeiten: Die optischen Linsen sollten nicht mehr durch zufallsbedingtes "Pröbeln" hergestellt werden, sondern nach wissenschaftlich exakter Berechnung der einschlägigen Naturgesetze serienmäßig und sicher gebaut werden! Abbes Forschungsdrang war geweckt - mit Begeisterung forschte er nun für einen praktischen Zweck!

1871 war es dann soweit: Abbe hatte die wissenschaftlichen Grundlagen zur Verbesserung der Mikroskopherstellung erarbeitet.

Der wissenschaftlich-praktische Erfolg ab 1870 führte dazu, dass Abbes geplante akademische Laufbahn in den Weg des Fabrikanten mündete. Einerseits erfüllte Abbe seinen Lehrauftrag an der Universität, andererseits verbreitete sich sein Ruhm in der naturwissenschaftlichen Welt auf Grund der neuen Mikroskope. Neben seinem auskömmlichen Gehalt als Professor erhielt er von Zeiß eine Gewinnbeteiligung aus dem Verkauf der von ihm entwickelten Mikroskope: Seit Abbes Forschungserfolg wurden zunehmend mehr Geräte verkauft.

1876 schloss Abbe einen Vertrag mit Zeiß ab, der seine Verdienste rechtlich sicherte: Abbe wurde "stiller Teilhaber" mit der Hälfte des Wertes des Unternehmens.

Ferner gründeten Ernst Abbe, der junge Chemiker Schott und Carl Zeiß im Jahre 1882 die Firma "Jenaer Glaswerk Schott und Gen.", in der vor allem Linsen nach dem seinerzeit entwickelten Verfahren hergestellt wurden.

Doch auch als Großindustrieller lebte Abbe mit seiner Familie nicht in prunkendem Luxus, sondern bürgerlich-solide: Eine verschwenderische Lebensführung hätte sein Gewissen belastet.

Nach dem Tod von Carl Zeiss im Jahre 1888 und dem Ausscheiden von dessen Sohn aus dem Unternehmen wurde Abbe 1889 Alleinbesitzer der Zeiss-Werke.

Nun beschäftigte er sich insbesondere mit sozialen Fragen: er führte Mitbestimmung, Achtstundentag, Gewinnbeteiligung, bezahlten Urlaub und fortlaufendes Einkommen für sechs Monate nach erfolgter Kündigung ein. Schließlich gründete er die Carl-Zeiss-Stiftung, der er 1891 die Firma und Teile seines persönlichen Vermögens übergab und der er bis 1893 vorstand.

Als Ernst Abbe im Jahre 1905 im Alter von 64 Jahren starb, hatte er viele optische Geräte erfunden bzw. ihre Herstellung vervollkommenet; er gilt als der Begründer der modernen optischen Technik.

Quellen:

1. H. Eberling: Ernst Abbe, Braunschweig 1954
2. Deutscher Sparkassen - und Giroverband e.V. Bonn (Hg.): Wir alle gehören nicht uns selber, Bonn 1958
3. Ernst Abbe Oberschule Berlin, <http://www.ernst-abbe.de/hp1024/abbe.html>
4. Neue Deutsche Biographie, Bd.1. Berlin, 1953