

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Leben und Werk von Georg Simon Ohm

1. Ohms Curriculum Vitae

Ohm gehört zu den bedeutendsten Wissenschaftlern des 19. Jahrhunderts. Durch seine bahnbrechenden Arbeiten auf dem Gebiet der Elektrizitätsleitung wurden die Grundlagen für die rasante Entwicklung der Elektrotechnik geschaffen. Aber auch auf anderen Gebieten, wie z. B. auf dem Gebiet der Akustik und der Optik hat Ohm wichtige Erkenntnisse zum Fortschritt der Physik beigetragen.

Georg Simon Ohm wurde im Jahr der französischen Revolution am 16. März 1789 als Sohn des Universitätsschlossermeisters Johann Wolfgang Ohm in Erlangen geboren. Von seinen sechs Geschwistern überlebten nur zwei, nämlich der spätere Mathematiker Martin Ohm und seine Schwester Barbara. Sein Geburts- und Vaterhaus stand in Erlangen. Seine Mutter starb bei der Geburt ihres siebten Kindes im Jahre 1799. Ohm wurde also bereits mit zehn Jahren mutterlos, und die gesamte Erziehung lag in den Händen seines Vaters.

Schon sehr frühzeitig zeigte es sich, daß Ohm besonders auf dem Gebiet der Mathematik ein außerordentlich begabtes Kind war. Seinen ersten Unterricht in Mathematik, Physik und Philosophie erhielt Ohm zusammen mit seinem drei Jahre jüngeren Bruder Martin von seinem Vater. Dieser hatte erst im Alter von 40 Jahren beschlossen, diese Fächer im Selbststudium zu studieren. Seine Kenntnisse suchte er nun seinen beiden Söhnen zu vermitteln. Dabei wurden von den dreien Bücher wie Eulers "Einleitung in die Analysis des Unendlichen", Eulers "Differenzialrechnung" und schließlich Eulers lateinisch geschriebene "Integralrechnung" durchgearbeitet.

Von 1800 an besuchte Ohm das Erlanger Gymnasium, wo er am 22. April 1805 seine Abschlußprüfung ablegte. Für einen armen, mittellosen Handwerkersohn war es zur damaligen Zeit äußerst schwierig zu studieren. Denn Studenten waren in Preußen - Erlangen gehörte damals vorübergehend von 1791 bis 1810 zu Preußen - vom Militärdienst befreit, und es lag nicht im Interesse des Staates, die Zahl der vom Wehrdienst Befreiten zu erhöhen. Vor allem den Söhnen von Bauern und Handwerkern wurde der Zugang zur Universität erschwert. Sie wurden nur dann zugelassen, wenn sie über genügend Mittel verfügten oder wenn der Nachweis einer außergewöhnlichen Begabung vorlag. Dieser Nachweis mußte noch während der Gymnasialzeit erbracht werden.

Im Falle Ohms wurden die außergewöhnlichen geistigen Fähigkeiten durch eine gründliche Prüfung auf allen Gebieten der Mathematik erbracht. Dieses Examen, das sich über fünf Stunden hinzog, wurde von dem Erlanger Universitätsprofessor der Mathematik Karl Christian von Langsdorf durchgeführt. Das Gutachten von Langsdorf über Ohm ist uns erhalten geblieben. Es

sagt über den damals fünfzehnjährigen Georg Simon Ohm: "... in einem fünfständigen Examen ging ich mit demselben die wichtigsten Sätze der Elementarmathematik, nämlich der Arithmetik, Geometrie, Trigonometrie, Statik und Mechanik, dann auch die der gemeinen und höheren Analysis und der höheren Geometrie durch und erhielt von ihm durchaus die promptesten richtigen Antworten auf alle meine Fragen.

Möchte doch diese Familie, aus der vielleicht die beiden Brüder Bernoulli wieder auferstehen, die solchem Fleiße und solchen Talenten und die den Wissenschaften selbst gebührende Achtung und Unterstützung finden." [1]

Besonders der Hinweis auf die Gebrüder Bernoulli ist ehrenvoll und zeigt, welche außerordentlichen Kenntnisse und Fähigkeiten Ohm bereits im Alter von 15 Jahren auf dem Gebiet der Mathematik gehabt haben mußte, denn die Bernoullis galten zu ihrer Zeit als die Päpste der Mathematik und Physik.

Nach seiner Gymnasialzeit studierte Ohm an der Universität Erlangen von 1805 bis 1806 drei Semester lang Mathematik, Physik und Philosophie. Doch er genoß die akademische Freiheit in vollen Zügen. Er war ein flotter Tänzer, und er liebte Schlittschuhlaufen und Billardspielen mehr als das trockene Studieren. Dieser Lebenswandel führte fast zum Zerwürfnis mit seinem Vater, der sich die Studien seines Sohnes anders vorgestellt hatte. Ohm bricht sein Studium in Erlangen ab und geht auf Anraten seines Vaters 1806 als Mathematiklehrer zunächst an eine Privatschule in Gottstadt im Schweizer Kanton Bern und wechselt dann 1809 als Privatlehrer nach Neuchâtel über. Während dieser Zeit führt er neben dem Unterricht seine Studien in Mathematik und Physik intensiv fort. Im Laufe eines sehr regen Briefwechsels, der uns erhalten ist, legt sich Ohms väterlicher Zorn über den liederlichen Sohn und das ursprüngliche herzliche Verhältnis stellt sich wieder ein.

1811 kehrt Ohm nach Erlangen zurück und nimmt sein Mathematik- und Physikstudium dort an der Universität wieder auf. Bereits am 25. Oktober 1811, d. h. also mit 22 Jahren, promoviert er zum Dr. phil. und beginnt anschließend eine Tätigkeit als Privatdozent. Seine Vorlesungen hält er in der Giebelstube des Hauses seines Großvaters in Erlangen, Friedrichstraße 20 ab, da Privatdozenten damals ihre eigenen Vorlesungsräume zur Verfügung stellen mußten. Eine Gedenktafel kann dort heute noch bewundert werden.

Von den spärlichen Einnahmen durch seine Privatdozententätigkeit konnte Ohm unmöglich leben. Er begann daher gleich nach seiner Promotion, sich um eine Lehrerstelle an einem bayerischen Gymnasium zu bewerben. Lehrerstellen waren auch damals knapp, und so nahm er am 06.12.1812 eine Stelle als Realstudienlehrer an der Realstudienanstalt in Bamberg an. Solche Realschulen und Realinstitute standen damals im Brennpunkt des Kampfes um das bayerische Schulwesen. Sie waren erst 1808 eingeführt worden und hatten ein denkbar schlechtes Ansehen.

Es fanden sich daher so viele Gegner, daß mit Ende des Schuljahres 1815/16 ihre Aufhebung erfolgte. Auch an der Bamberger Realstudien­schule, an der Ohm lehrte, waren die Verhältnisse äußerst unerfreulich: Wegen ihres schlechten Ansehens hatten sie nur sehr wenig Schüler und meist nur solche, die an anderen Schulen versagt hatten. Zu allem Überfluß wird Ohm 1814 zusätzlich als Lehrer am Progymnasium eingesetzt, und nach Auflösung der Realstudienanstalt 1816 wird er an die Oberprimärschule versetzt. Hier mußte sich Ohm - wie er schreibt - "mit uninteressierten, faulen, geistig verwahrlosten Schülern" abplagen, und was ihn am meisten verdroß, er mußte vornehmlich Lateinunterricht erteilen.

In dieser Zeit veröffentlicht Ohm ein Buch mit dem Titel: "Grundlinien einer zweckmäßigen Behandlung der Geometrie als höherem Bildungsmittel an vorbereitenden Lehranstalten" [2]. Er legt darin seine Ideen für einen modernen Mathematikunterricht dar. Insbesondere verwirft er die seinerzeit übliche, sinnentleerte Einpaukereie von Lehrsätzen und strebt nach einem Unterricht, der Schüler zu echtem mathematischen Verständnis führt. Dieses Buch findet allerdings nur wenig Anerkennung, wohl weil Ohms Anliegen zu dieser Zeit nicht richtig verstanden wird.

Ohms Situation in Bamberg wird immer unerträglicher. Auf Anraten eines früheren Bamberger Kollegen, der wegen der unerquicklichen Bamberger Verhältnisse nach Köln an das Jesuitengymnasium gegangen war, bewirbt sich Ohm dort ebenfalls und erhält ab 21. November 1817 in Köln eine Oberlehrerstelle für Mathematik und Physik. Das Jesuitengymnasium besitzt eine ausgezeichnete Ausstattung an physikalischen Geräten. Dies regt ihn zum Experimentieren an, und so wird aus dem Mathematiker Ohm der Physiker Ohm.

Ab 1825 beginnt er sich intensiv mit dem Problem der geschlossenen galvanischen Kette zu beschäftigen, und zwar sowohl experimentell als auch theoretisch. Er wählt dieses, von den Forschungsrichtungen der damaligen Zeit etwas abseits liegende Gebiet, weil er - wie er sagt - neben seinen schulischen Pflichten für die Forschung zu wenig Zeit hat, um mit anderen Forschern ernsthaft konkurrieren zu können. Um sich allerdings die Priorität für seine empirisch gewonnenen Ergebnisse zu sichern, publiziert er zu voreilig sowohl in Schweiggers Journal für Chemie und Physik als auch in Poggendorffs Annalen eine Arbeit mit dem Titel: "Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontaktelektrizität leiten" [3]. Sein vorläufiges Ergebnis, nämlich eine logarithmische Abhängigkeit zwischen Strom und der Länge verschieden langer Drähte ist jedoch falsch! Erst in einer zweiten Veröffentlichung wurde das richtige Gesetz publiziert.

Obwohl Ohm als Lehrer sehr beliebt und auch erfolgreich ist, strebt er die Universitätslaufbahn an, um sich seiner Forschung intensiver widmen zu können. Doch seine Bewerbungen an einer preußischen Universität sind erfolglos. 1826 läßt er sich deshalb zunächst für ein Jahr vom Lehrdienst in Köln beurlauben, um seine Forschungsarbeiten in Berlin vorantreiben zu können. Dort

wohnt er bei seinem Bruder Martin, der an der Berliner Universität einen Lehrstuhl für Mathematik innehat. In das Jahr 1826 fällt auch die Veröffentlichung seines empirisch gefundenen Gesetzes, das wir heute als "Ohmsches Gesetz" bezeichnen [4].

Da seine Beurlaubung nicht verlängert wird, gibt er seine Lehrtätigkeit in Köln vollends auf und nimmt eine Lehrstelle an der Kriegsschule sowie der Artillerie- und Ingenieurschule Berlin an. Neben dieser Lehrtätigkeit arbeitet er zielstrebig an einer Theorie des geschlossenen elektrischen Stromkreises. 1827 veröffentlicht er seine berühmte Arbeit "Die galvanische Kette - mathematisch bearbeitet" [5].

Ohm hofft nun, aufgrund seiner wissenschaftlichen Arbeit eine Universitätsprofessur zu erhalten: Doch wieder wird seine Bewerbung durch das preußische Ministerium abgewiesen. Diese Ablehnung hatte Ohm vermutlich dem Philosophen Hegel zu verdanken, der ein ausgemachter Gegner der mathematischen Naturwissenschaften war und an der Universität Berlin großen Einfluß hatte. Ohm versucht weiter eine Stellung an einer Universität zu bekommen. Von 1829 bis 1833 bewirbt er sich fünfmal erfolglos, diesmal in Bayern. Frustriert schreibt er: "Berlin vertausche ich mit der Hölle, wenn es sein muß. Aber nur unter einer Bedingung: Der Ort, wo ich mich niederlasse, muß mir die Fortsetzung meiner rein wissenschaftlichen Arbeiten gestatten." Am 03. Juli 1833 endlich erhält er eine Professorenstelle für Physik an der polytechnischen Schule, der heutigen Georg-Simon-Ohm-Fachhochschule, in Nürnberg. Dort wird er 1839 zum Rektor ernannt.

Langsam erfolgt nun auch seine wissenschaftliche Anerkennung. 1839 wird er zum korrespondierenden Mitglied der königlichen preußischen Akademie der Wissenschaften ernannt. Im Jahre 1841 wird ihm durch die Royal Society of London die Copley-Medaille verliehen. Diese Medaille stellte damals eine der höchsten wissenschaftlichen Auszeichnungen dar. Sie würde heute etwa dem Nobelpreis entsprechen. Vor Ohm hat sie in Deutschland nur der Mathematiker Gauß erhalten. 1842 wird Ohm zum korrespondierenden Mitglied der Royal Society of London ernannt. Aufgrund dieser Anerkennungen im Ausland wird man nun auch in Deutschland auf ihn aufmerksam. Im Jahre 1845 wird er zum ordentlichen Mitglied der bayerischen Akademie der Wissenschaften ernannt. Im Jahre 1853 wird ihm der Maximiliansorden verliehen. Viel zu spät, erst fünf Jahre vor seinem Tod, erhält Ohm endlich, wonach er sein Leben lang gestrebt hat, nämlich einen Ruf auf einen Lehrstuhl der Physik. Er wird 1849 als Professor der Physik an die Universität München berufen. Aus seinen Vorlesungsmanuskripten entsteht sein einziges Lehrbuch "Grundzüge der Physik", das im Jahre 1854 erscheint [6]. Am 06. Juli 1854 stirbt Ohm in München und wird dort auch begraben. Im Jahre 1929 wird ihm im Englischen Garten in München vom Verein Deutscher Ingenieure ein Denkmal errichtet.

2. Ohms wissenschaftliches Werk

Ohm gehört zu der Kategorie von Physikern, die sowohl auf dem Gebiet der Experimentalphysik als auch auf dem Gebiet der theoretischen Physik Hervorragendes geleistet haben. Im Laufe seines Lebens hat er sich mit drei sehr unterschiedlichen Gebieten der Physik intensiv und erfolgreich auseinandergesetzt: (1) mit dem Galvanismus (24 wissenschaftliche Publikationen), (2) mit der Akustik (3 Publikationen) und (3) mit der Kristalloptik (3 Veröffentlichungen). Ein weiteres Gebiet muß hier noch erwähnt werden, nämlich die Molekularphysik. Ohm war überzeugter "Atomist", d. h. für ihn gab es keinen Zweifel, daß Atome und Moleküle die letztendlichen Bausteine der Materie darstellen, und es schwebte ihm vor, aus einfachen Annahmen über Gestalt und Größe der Moleküle bzw. der Atome sowie aus den zwischen ihnen wirkenden Kräften auf *mathematischem Wege* die Erscheinungen des Lichts, der Wärme, der Elektrizität, des Magnetismus und der Kristallbildung abzuleiten. Es war dies ein gewaltiges Vorhaben, das Ohm bereits 1829 begann und nach seiner Berufung nach München wieder stärker voranzutreiben versuchte. Sein Tod hat die Vollendung dieses Werkes, von dem bereits der erste Band gedruckt worden war, vereitelt.

Im folgenden werden die wissenschaftlichen Leistungen Ohms auf den drei genannten Gebieten vorgestellt. Dies soll jedoch nicht in der historischen Reihenfolge geschehen, es werden vielmehr zuerst die im öffentlichen Bewußtsein weniger bekannten Arbeiten auf den Gebieten der Optik und Akustik und erst dann Ohms Arbeiten über den Galvanismus betrachtet.

2.1 Arbeiten auf dem Gebiet der Optik

Optik war schon von jeher eines der Lieblingsfelder Ohms. Bereits 1840 hatte er in Poggendorffs Annalen eine rein experimentelle Arbeit zur Demonstration von Interferenzerscheinungen mit dem Titel "Beschreibung einiger einfacher und leicht zu behandelnder Vorrichtungen zur Anstellung der Licht-Interferenz-Versuche" veröffentlicht [7]. Doch erst nach seiner Berufung an die Universität München widmet er sich wieder mit großem Elan umfangreichen Untersuchungen auf dem Gebiet der Kristalloptik. Er beschäftigte sich dabei sowohl experimentell, insbesondere aber ganz intensiv theoretisch mit Interferenzerscheinungen, die sich bei einer bzw. bei zwei doppelbrechenden übereinanderliegenden Kristallplatten beobachten lassen. Seine im Jahre 1852 und 1853 veröffentlichte, 99 Seiten lange Abhandlung darüber trägt den Titel: "Erklärung aller in einachsigen Kristallplatten zwischen geradlinig polarisiertem Licht wahrnehmbaren Interferenzerscheinungen in mathematischer Form mitgeteilt von Dr. G. S. Ohm" [8]. Ohm gelang es, die Theorie dieser Erscheinungen in allgemeiner Weise zu entwickeln, und er kommt zu einem mathematischen Ausdruck, der alle bis dahin bekannten Einzelfälle umfaßte. Mit Enttäuschung mußte er aber feststellen, daß ein Großteil der von ihm experimentell beobachteten Interferenzerscheinungen, die er für neu hielt, bereits 1841 von dem norwegischen Physiker Langberg veröffentlicht worden waren. Seine mathematischen Untersuchungen dazu wurden dadurch aber kei-

neswegs überflüssig.

2.2 Arbeiten auf dem Gebiet der Akustik

Ein besonders anschauliches Beispiel für Ohms mathematisch-analyisierenden Verstand und sein Einfühlungsvermögen in physikalische Phänomene zeigen seine Arbeiten auf dem Gebiet der Akustik.

Es gab damals mehrere Physiker, wie z. B. Savart, Cagniard de Latour und vor allem Seebeck, die sich experimentell mit der Erzeugung von Tönen mit Hilfe einer Lochsirene beschäftigten. In diesen Experimenten wurde eine Lochsirene jeweils durch zwei oder mehrere Luftdüsen angeblasen. Je nachdem, ob die dadurch entstehenden Luftstöße synchron oder zeitversetzt erfolgten, erhielt man unterschiedliche Tonwahrnehmungen in Höhe, Klang und Intensität. Mit dem althergebrachten Verständnis der Akustik waren diese Phänomene völlig rätselhaft und nicht zu klären.

In Anbetracht dieser Situation schreibt Ohm denn auch: "Es kam mir vor, als forderten sie zu einer neuen Definition des Tones auf". Kurz darauf aber fragt er sich [9], "ob nicht die Definition des Tones, wie sie von unseren Vorfahren auf uns übergegangen ist, alles in sich enthalte, was zur vollständigen Erklärung der neuen Tatsachen notwendig und hinreichend ist." Ohm ging diesen Weg. Er legte die althergebrachte Definition des reinen Tons als einfache Sinusschwingung $a \sin 2\pi(m t + p)$ zugrunde, wobei a die Amplitude, m die Frequenz (Schwingungsmenge) und p die Phase bedeutet. Er fordert, daß in den Tönen bzw. in den durch die Lochsirene erzeugten Luftstöße diese Sinusschwingungen rein oder wenigstens als realer Bestandteil enthalten sein müssen. Ohm wandte zum Beweis dieser Annahme zum ersten Mal die Fourier-Analyse auf die durch die Lochsirene erzeugten Druckschwankungen der Luft an, und er erhielt dadurch eine glänzende, bis in alle Details der Beobachtung übereinstimmende Deutung der Phänomene an der Lochsirene.

Seine Ergebnisse hat er in Poggendorffs Annalen 1843 veröffentlicht unter dem Titel: "Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen" [9]. Die in dieser Arbeit von Ohm erhaltenen Resultate gingen später in die Literatur als "Ohmsches Gesetz der Akustik" ein. Es besagt: "Das menschliche Ohr empfindet nur sinusförmige Luftschwingungen als einfache Töne. Es zerlegt jede andere periodische Luftschwingung in eine Reihe pendelförmiger Schwingungen, deren jede bei genügender Stärke die Empfindung eines Tones hervorruft. Für den akustischen Eindruck eines Klanges kommt es nur auf die Frequenzen und die relativen Intensitäten seiner Teiltöne an, nicht auf ihre Phasenbeziehung". Diese auch heute noch für die Akustik grundlegenden Erkenntnisse fanden zunächst keinerlei Anerkennung, ja sie wurden von Seebeck, einem auf diesem Gebiet hervorragenden Experimentator, sogar heftig bekämpft.

Oft werden die von Ohm gefundenen akustischen Gesetzmäßigkeiten Helmholtz zugeschrieben. Das Verdienst Helmholtz besteht jedoch vor allem darin, daß er Ohms theoretische Resultate durch umfangreiche Experimente bestätigt hat. Erst das von Helmholtz acht Jahre nach Ohms Tod veröffentlichte Werk "Die Lehre von den Tonempfindungen" brachte den Ohmschen Satz zu allgemeiner Anerkennung. Fairer Weise hat Helmholtz auf Ohms Priorität an mehreren Stellen seines Buches hingewiesen.

2.3 Arbeiten auf dem Gebiet des Galvanismus

2.3.1 Bemerkungen zur Vorgeschichte

Jede Entdeckung, jede wissenschaftliche Großtat hat seine Geschichte und Vorgeschichte. So auch das Ohmsche Gesetz. Ohne Kenntnis dieses geschichtlichen Hintergrunds ist die Würdigung der wissenschaftlichen Leistung kaum möglich.

Heute stellt das Ohmsche Gesetz in der Physikausbildung allenfalls einen Schul- oder Praktikumsversuch dar, der ohne experimentelle Schwierigkeiten in kürzester Zeit durchgeführt werden kann. Zu Ohms Zeiten jedoch war der galvanische Strom ein rätselhaftes, mit vielen widersprüchlichen Beobachtungen verbundenes Phänomen. Als Spannungsquelle diente damals meist die 1799 von Volta erfundene und nach ihm benannte Voltasäule. Wurden die Enden einer Voltasäule mit einem "Schließungsbogen" aus Metall verbunden, so entstand ein Stromkreis, der damals "geschlossene hydroelektrische Kette" oder "galvanische Kette" genannt wurde. Da der Widerstand des metallischen Schließungsdrahtes meist wesentlich kleiner war als der Innenwiderstand der Voltasäule - was den Leuten damals natürlich nicht bewußt war -, stellte der Schließungsbogen einen Kurzschluß dar. Stromkreise wurden damals also mehr oder weniger stark im Kurzschluß betrieben, und dies wirkte sich verheerend auf die zeitliche Konstanz der Spannung aus, die damals mit den von Volta entwickelten Strohhalm- und Plättchenelektrometern bestimmt werden konnte. Die Messung der Stromstärke aber war höchst problematisch. Häufig verwendete man die physiologische Wirkung. Man schaltete sich selbst in den Stromkreis ein, und die dadurch ausgelöste "elektrische Erschütterung" wurde als qualitatives Maß für die Stromstärke gewertet.

Die Wirkungen des elektrischen Stromes waren zur damaligen Zeit alle bekannt, teilweise waren sie auch schon qualitativ untersucht worden:

So hat sich J. W. Ritter (1776 bis 1810) ausgiebig mit der Wärmewirkung des elektrischen Stromes befaßt, und er kam im Rahmen dieser Untersuchungen dem Ohmschen Gesetz bereits 1805 sehr nahe. Die Experimente des Engländers Davy (1778 bis 1829) zeigten, daß sich Eisen unter sonst gleichen Bedingungen bis zu einem gewissen Maße schneller erhitzte als Gold, Silber, Kupfer, Blei und Zink. Auch die Elektrolyse, d. h. die chemische Wirkung des elektrischen Stroms war von Ritter und Davy intensiv untersucht worden, und im Jahre 1820 wurde von Oer-

sted die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes entdeckt. Im Hinblick auf den elektrischen Strom waren die folgenden Beobachtungen jedoch völlig unverständlich: Erhöhte man die Spannung der Voltasäule durch zusätzliche Plattenpaare, so wurde die physiologische Wirkung eindeutig stärker, die chemische Wirkung nahm ebenfalls leicht zu, die Wärmewirkung aber schien völlig unbeeinflusst. Bei Parallelschaltung von Voltasäulen waren die beobachteten Wirkungen seltsamer Weise gerade umgekehrt, d. h. die physiologische Wirkung blieb unverändert, während die Wärmewirkung eindeutig zunahm. Mit dem Konzept des Innenwiderstandes der Spannungsquelle sind diese so rätselhaften Erscheinungen sofort verständlich.

Intuitiv haben manche Physiker zu Beginn des 19. Jahrhunderts erahnt, daß es so etwas wie einen Widerstand geben müßte, der von der Elektrizität zu überwinden ist, damit Strom fließen kann. Es wurden auch Zusammenhänge zwischen Strom und Spannung von einer Reihe von Physikern ausgesprochen, die mehr oder weniger in die Nähe des Ohmschen Gesetzes kamen. Den wirklichen Zusammenhang zu entdecken, das jedoch war Ohm vorbehalten.

2.3.2 Ohms Experimente

Ohm begann seine entscheidenden Experimente am Jesuitengymnasium in Köln im Jahre 1825. Als Spannungsquelle verwendete er zunächst eine Voltasäule. Damit hatte er aber ganz erhebliche experimentelle Schwierigkeiten, weil die Spannungskonstanz seiner im Kurzschluß betriebenen Voltasäule alles andere als zufriedenstellend war. Wiederholt klagt er über das "Wogen der elektrischen Kraft" beim Schließen und Öffnen einer "hydroelektrischen Kette". Seine ersten Messungen werden durch Polarisationsspannungen zunächst so sehr gestört, daß er als empirischen Zusammenhang zwischen Strom und den Widerständen verschieden langer Drähte fälschlicherweise eine logarithmische Abhängigkeit herausfindet. Poggendorff, der Herausgeber der *Annalen der Physik*, kommentiert in einer Fußnote zu Ohms Veröffentlichung die Beschreibung vom "Wogen der elektrischen Kraft" mit dem Hinweis, daß sich mit Hilfe des 1821 von Seebeck entdeckten Thermoelements Spannungen mit sehr hoher zeitlicher Konstanz herstellen ließen. Ohm griff diesen Hinweis dankbar auf und erreichte nun mit der "thermoelektrischen Kette" eine Meßgenauigkeit, die ihn die richtige Gesetzmäßigkeit sofort finden ließ. Voraussetzung dafür war allerdings eine möglichst exakte Methode zur Messung der Stromstärke. Hierfür benützte Ohm eine von ihm selbst entwickelte Drehwaage, die in Abb. 1 gezeigt ist. Am Drehknopf q ist an einem dünnen Goldband eine Magnetnadel t-t parallel über dem Kupferdraht, durch den der zu messende Strom fließt, aufgehängt. Der bei Stromfluß erzeugte Ausschlag der Magnetnadel kann durch Verdrillen des Goldbandes am Drehknopf kompensiert werden. Der Drehwinkel am Drehknopf wird als Maß für die elektrische Stromstärke verwendet. Um diese Nullpunktskompensation genau durchführen zu können, ist eine Lupe l am Instrument angebracht. Zum Schutz gegen Luftströmungen ist die ganze Anordnung unter einem Glassturz v-v montiert.

2) Nicht nur, dass man die Potentiale an der
 Oberfläche des Leiters bei Fortbewegung (und nicht
 an den Enden) unabhängig ist, so ist in dem
 in dem Leiter durch den Stromfluss an jedem Punkte
 die Gleichheit mit dem Leiter, d. h. die
 die Potentialdifferenz zwischen zwei
 Stellen gleich Null, es sei denn, es sei
 ein Widerstand vorhanden, so wird die
 von der Potentialdifferenz durch die Leitung
 sich aus

$$-dv = \alpha v dx \quad \text{oder}$$

$$-\frac{dv}{v} = \alpha dx \quad \text{oder} \quad d \ln v = -\frac{\alpha dx}{v}$$

$$\int \frac{1}{v} = \alpha x + C$$

(Bestimmte $\ln v = i$ für $x=0$ bestimmt)

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{i} = \alpha x \quad \text{oder}$$

$$v = \frac{i}{1 + \alpha x} \quad \text{oder}$$

$$i v = i = \frac{i^2}{1 + \alpha x} \quad \text{oder}$$

$$\alpha x = \frac{i}{b + x} \quad \alpha x^2 = \frac{a}{b}$$

oder auf die Spannung kein Verhältnis gemacht
 werden ist

$(b+x)$ ist die Länge des Drahtes
 und mit der anderen Potentiale
 ist dann $\frac{a}{b+x}$

$$\alpha x = V = \frac{a}{b} - \frac{a}{b+x} \quad \text{oder} \quad \text{bist groß in} \frac{a}{b+x}$$

$$V = \frac{a}{b} \left(1 + \frac{a}{b} + \frac{a^2}{b^2} + \frac{a^3}{b^3} + \dots \right)$$

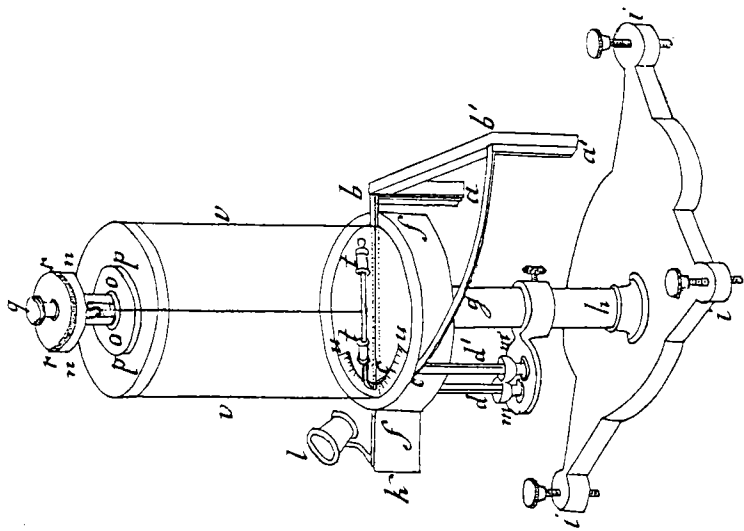


Abb. 1: Torsionsparameter Ohms einschließlich
 Thermoelement (a'b'-ab) [4].

Abb. 2: Ohms Laborbucheintrag im Januar 1825, wo er das
 Gesetz $X = a/(b+x)$ erstmals formuliert.

Ohm verwendete ein Kupfer-Wismut-Thermoelement, das er zunächst bei einem Temperaturunterschied $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($U \approx 8 \text{ mV}$) betrieb. Als Schließungsbögen, die sich am Torsionsamperemeter zwecks guter Kontaktierung bei m und m' in Quecksilbernäpfchen einhängen ließen, verwendete Ohm 8 verschiedene Kupferdrähte (2, 4, 6, 10, 18, 34, 66, 130 Zoll, 1 Zoll $\approx 2,5 \text{ cm}$) mit einem Durchmesser von $7/8$ Linien (1 Linie $\cong 2,18 \text{ mm}$). Der Innenwiderstand der Ohmschen Meßanordnung betrug in heutigen Maßeinheiten $R_i \approx 3 \text{ m}\Omega$, die Kupferdrähte rangierten von $R_1 = 0,3 \text{ m}\Omega$ bis $R_8 = 19,6 \text{ m}\Omega$, und es floßen Ströme von $I_1 = 2,4 \text{ A}$ bis $I_8 = 0,36 \text{ A}$.

Wie man Ohms erhalten gebliebenem Laborbuch entnehmen kann, fanden die entscheidenden Messungen mit dem "thermoelektrischen Apparat" im Januar 1826 statt. Befriedigt vermerkt Ohm unter der ersten Messung: "Von dem bei der hydroelektrischen Kette beobachteten Steigen und Fallen der Kraft war nichts zu merken". Ohms Neigung, alle Ergebnisse sofort theoretisch zu analysieren, zeigt sich im Laborbuch ein paar Seiten weiter, wo das Gesetz $X = a / (b + x)$ zum ersten Male auftaucht. Er leitet es aus einer von ihm aufgestellten, allerdings unzutreffend begründeten Differenzialgleichung her (Abb. 2). Dann wendet er diese Gleichung auf seine Meßdaten an und stellt mit Befriedigung "eine Übereinstimmung der Rechnung mit der Beobachtung, die nicht größer gewünscht werden kann", fest. Seine experimentellen Ergebnisse veröffentlicht Ohm in Schweiggers Journal für Chemie und Physik unter dem Titel "Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontaktelektrizität leiten, nebst einem Entwurf zu einer Theorie des Voltaschen Apparats und des Schweiggerschen Multiplikators" [4]. Seine Meßwerte sind in Abb. 3 gezeigt. Durch Zusatzversuche, bei denen Ohm die Thermospannung variierte, stellt er mit Erstaunen fest, daß nur der Parameter a nicht aber b von der Spannung abhängt. Er schließt daraus, daß a die gesamte "elektromotorische Kraft" der Kette darstellt.

2.3.3 Theoretische Behandlung der galvanischen Kette durch Ohm

Aufgrund seines experimentellen Erfolgs und im Vertrauen auf eine Universitätsstelle gibt Ohm 1826 seine Lehrtätigkeit in Köln auf und geht nach Berlin, wo sein Bruder eine Professur in Mathematik innehatte. Dort widmet sich Ohm ganz der theoretischen Behandlung der galvanischen Kette. Die Ergebnisse legt er in seiner berühmten Schrift: "Die galvanische Kette - mathematisch bearbeitet von Dr. G. Simon Ohm" nieder. Interessant ist sein Vorwort zu diesem Buch. Läßt es doch erahnen, mit welchen Schwierigkeiten und Frustrationen Ohm zu kämpfen hatte. Er schreibt: "... Die Verhältnisse, in welchen ich bis jetzt gelebt habe, waren nicht geeignet, weder meinen Mut, wenn ihn die Tageskälte (Ohms Zimmertemperatur betrug im Winter oft nur $7,5 \text{ }^\circ\text{R}$, was $9,3 \text{ }^\circ\text{C}$ entspricht) zu zerstören drohte, aufs neue anzufeuern, noch, was doch unumgänglich nötig ist, mich mit der auf ähnliche Arbeiten Bezug habenden Literatur in ihrem ganzen Umfange vertraut zu machen; daher habe ich zu meiner Proberolle ein Stück gewählt, wobei ich Konkurrenz am wenigsten zu scheuen brauchte. Möge der geneigte Zuschauer meine Leistungen mit derselben Liebe zur Sache aufnehmen, aus der sie hervorgegangen ist! Berlin,

Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contactelektricität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Volta'schen Apparates und des Schweißgeräths von

Dr. G. S. Ohm.

So gelangte Ich zu nachstehenden Ergebnissen:

Zeit der Beobachtung.	Verrechnung.	L e i t e r.							
		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
8. Jan.	I.	326½	300½	277½	258½	190½	134½	88½	48½
11. Jan.	II.	311½	287	267	250½	188½	129½	80	46
	III.	307	284	263½	226½	181	128½	79	44½
15. Jan.	IV.	305½	281½	259	224	178½	124½	79	44½
	V.	305	282	258½	223½	178	124½	78	44

Es fällt auf, daß die Kraft von einem Tage zum andern fühlbar abnimmt. Ob der Grund dieser Abnahme in einer Veränderung der Berührungsstellen oder vielleicht darin zu suchen ist, daß der 8te und 11te Januar sehr kalte Tage waren und das Eisgefäß noch am Fenster einer nicht stark geheizten und schlecht verwahrten Stube stand, wage Ich nicht zu entscheiden; nur das glaube Ich hinzuzufügen zu müssen, daß Ich vom 15ten ab keine bedeutenden Unterschiede mehr wahrnehmen konnte.

Obige Zahlen lassen sich sehr genügend durch die Gleichung

$$X = \frac{a}{b+x}$$

darstellen, wobei X die Stärke der magnetischen Wirkung auf den Leiter, dessen Länge x ist, a und b aber constante, von der erregenden Kraft und dem Leitungswiderstande der übrigen Theile der Kette abhängige Größen bezeichnen. Gibt man nämlich der Größe b den Werth 20½ und der Größe a nach den verschiedenen Versuchsreihen die Werthe: 7285, 6965, 6885, 6800, 6800, so erhält man durch die Rechnung nachstehende Bestimmungen:

Verrechnung.	L e i t e r.							
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
I.	328	300½	277½	240½	190½	134½	84½	48½
II.	318	287½	265½	230½	182	128½	80½	46½
III.	309½	284	262½	228	180	127	79½	45½
IV.	305½	280½	259	224½	177½	125½	79	45
V.	305½	280½	259	224½	177½	125½	79	45

Vergleicht man diese durch die Rechnung erhaltenen Werthe mit den vorigen, auf dem Wege der Erfahrung gefundenen, so wird es sich zeigen, daß die Unterschiede so gering sind, wie man sie bei Versuchen der Art nur immer zu erwarten berechtigt ist.

Abb. 3: In Schweiggers Journal für Chemie und Physik veröffentlichte Messwerte, die Ohm zur Gesetzmäßigkeit $X = a/(b+x)$ führten [4].

den 01. Mai 1827".

Ohms Schrift zeichnet sich durch große Klarheit und didaktisches Einfühlungsvermögen aus. Er stellt seine Theorie zweimal dar: Zunächst einmal ausschließlich mit geometrischen Mitteln. Dies war wohl notwendig, weil um 1827 zumindest viele deutsche Physiker mit den Methoden der Infinitesimalrechnung noch nicht sehr gut vertraut waren. Erst im Hauptteil behandelt er die galvanische Kette differentiell. Seine Gedankengänge und Ergebnisse sollen nun ganz kurz angedeutet werden.

Leitfaden für Ohm ist die Analogie zur Wärmeleitung. Er schreibt: "Die Form und Behandlung der Differentialgleichungen ist denen der Wärmebewegung durch Fourier und Poisson uns gegebenen so ähnlich, daß sich schon hieraus, wenn auch weiter keine anderen Gründe vorhanden wären, der Schluß auf einen inneren Zusammenhang zwischen beiden Naturerscheinungen mit allem Recht machen ließe, und dieses Identitätsverhältnis nimmt zu, je weiter man es verfolgt." Auf diese Analogie kommt er im Laufe seiner Abhandlung immer wieder zurück. Das enge Festhalten an dieser Analogie dürfte wohl auch der Grund sein, weshalb in der ganzen Abhandlung niemals der Begriff des elektrischen Widerstandes auftaucht. Ohm spricht nur von "Leitungsgüte" oder "Leitungsvermögen". Die Größe, die heute als elektrischer Widerstand bezeichnet wird, nennt von Ohm stets "reducirte Länge". Ohm geht bei der Behandlung der geschlossenen galvanischen Kette von drei Voraussetzungen aus - er nennt sie Grundgesetze oder Fundamentalsätze -, die entweder auf Beobachtung (Erfahrung) beruhen oder, wenn keine Beobachtung vorliegt, als Hypothesen angenommen werden.

1. Grundgesetz:

Zwischen zwei ungleich stark elektrischen Körpern findet ein Ausgleich statt, und die Änderung der "elektrischen Differenz" in einem äußerst kleinen "Zeitteilchen" ist dem Unterschied der "elektroskopischen Kraft" und der Größe des Zeitteilchens proportional. Dies entspräche in heutiger Schreibweise: $\Delta Q \sim U dt$.

Dabei setzt Ohm voraus, daß bei diesem Übergang "die Mitteilung der Elektrizität von einem Körperelement nur zu dem ihm zunächst liegenden auf unmittelbare Weise erfolge, so daß von jedem Element zu jedem anderen entfernter liegenden kein unmittelbarer Übergang stattfindet." Er weist dabei wieder auf den Wärmeübergang zwischen zwei Körperelementen hin, welcher dem Temperaturunterschied proportional gesetzt wird. Er sagt, daß dieser Ansatz "zwar eine Unterstellung der Rechnung" ist, aber "die natürlichste, weil die einfachste" sei.

2. Grundgesetz:

Ohms zweites Gesetz berücksichtigt den Ladungsübergang vom geladenen Körper in die Luft, der von Coulomb bereits formuliert worden war: (Verlust an Elektrizität in einem Zeitteilchen) ist proportional (Stärke der Elektrizität mal einem von der Natur der Luft abhängigen Koeffizien-

ten). In heutiger Schreibweise besagt dieses Gesetz: $\Delta Q / \Delta t \sim b_{\text{Luft}} \cdot U$.

3. Grundgesetz:

"Wenn verschiedenartige Körper sich einander berühren, so behaupten sie fortwährend an der Stelle der Berührung einen und denselben Unterschied ihrer elektroskopischen Kräfte".

Ohm war also ein Vertreter der sogenannten "Metallkontakttheorie", die besagte, daß die Verbindung eines Metalls mit einem zweiten das einfachste galvanische Element darstellt und nicht die Verbindung Metall 1 - Elektrolyt - Metall 2.

Da die galvanische Kette ein im wesentlichen eindimensionales Gebilde ist, beschränkt sich Ohm auf die eindimensionale Behandlung. Die Elektrizitätsleitung in Elektrolyten schließt er zunächst ebenfalls aus, handelt sie aber im Anhang seiner Schrift ausführlich und umfassend ab.

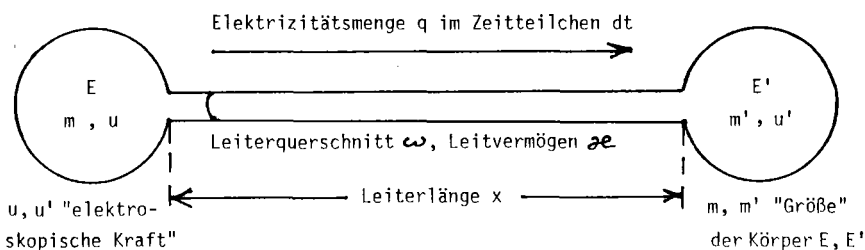


Abb. 4: Zur Definition der in Ohms Ableitung verwendeten Größen

Ohm betrachtet nun zunächst zwei unterschiedlich geladene Körper E und E', die durch einen Draht mit dem Querschnitt ω und der Länge x miteinander verbunden sind. Aufgrund des elektrischen Unterschieds u und u' der beiden Körper fließt im Zeitintervall dt die Elektrizitätsmenge q von E nach E' (Abb. 4). Er definiert das Leitungsvermögen durch die Forderung, daß im Zeiteilchen dt die Gleichung $\rho = q \cdot x$ gilt. Ohm geht nun von dieser Definitionsgleichung für das Leitungsvermögen aus. Er beweist, daß seine Überlegungen auch gelten, wenn die Körper E und E' zwei sich berührende Scheiben darstellen, wenn also die Figur in Abb. 4 unter Aufrechterhaltung des Unterschiedes u und u' zum Stromkreis gebogen wird. Durch konsequente Anwendung seiner drei Fundamentalsätze gelangt er letztendlich zu den folgenden Gleichungen:

1. Differenzialgleichung für den Spannungsverlauf im Stromkreis:

$$\gamma \frac{du}{dt} = \rho \frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{b \cdot c}{\omega} u \quad (1)$$

wobei γ , b und c Konstanten darstellen.

2. Differenzialgleichung für den elektrischen Strom S:

$$S = \alpha \cdot \omega \frac{du}{dx} \quad (2)$$

Ausgehend vom einfachsten Fall des stationären Stromes ($du / dt = 0$) und ohne Luftverluste ($\omega / \omega = 0$) löst Ohm diese Differenzialgleichungen für sukzessive schwierigere Fälle bis hin zum allgemeinsten zeitabhängigen Fall.

Stationärer Fall

Für den stationären Fall ohne Luftverluste gilt $d^2u / dx^2 = 0$.

Als Lösung erhält Ohm den linearen Spannungsabfall $u = (a / l) \cdot (x - c)$, wobei a die Gesamtspannung, l die Leiterlänge und c eine Erdungstelle bedeuten.

Dazu schreibt Ohm: " Die elektroskopische Kraft einer einfachen Kette ändert sich der ganzen Länge des Leiters nach stetig und auf gleiche Strecken stets um gleichviel; nur da, wo seine beiden Enden sich berühren, ändert sie sich plötzlich, und zwar von einem Ende zum anderen um die ganze Spannung.

Wenn irgend eine Stelle der Kette durch welche Ursachen immer veranlaßt wird, ihren elektrischen Zustand zu ändern, so ändern zu gleicher Zeit alle übrigen Stellen der Kette den ihrigen, und zwar um dieselbe Größe."

Diese letztere Erkenntnis gibt eine einfache Deutung der rätselhaften Erscheinung, daß der Stromkreis an einer beliebigen Stelle geerdet werden kann, ohne daß sich dabei der Strom oder der Spannungsabfall in der geschlossenen Kette ändert.

Aus der 2. Differenzialgleichung für den elektrischen Strom S erhält Ohm für eine aus mehreren verschiedenen Leitern und mehreren Spannungsquellen zusammengesetzten Leiterkreis das Ergebnis:

$$S = \frac{A}{L} ,$$

mit $A = \sum a_i =$ Summe aller Spannungen und $L = \sum (\alpha_i \ell_i / \omega_i) =$ Summe aller "reducirter Längen".

Ohm drückt sein Gesetz folgendermaßen aus:

"I. Der elektrische Strom ist an allen Stellen einer galvanischen Kette durchaus von gleicher Größe und unabhängig von der Konstanten c.

II. Die Größe des Stromes einer galvanischen Kette ... bleibt ungeändert, wenn die Summe aller ihrer Spannungen und ihre reducirte Länge ... nach einerlei Verhältnis abgeändert werden; sie steigt aber bei gleicher reducirter Länge in dem Maße, als die Summe der Spannungen

zunimmt, und bei gleicher Summe der Spannungen in dem Maße, als die reducirte Länge der Kette abnimmt."

Ohm behandelt im weiteren zunehmend komplexere Fälle des Stromkreises bis hin zur zeitabhängigen Lösung und zeigt, daß alle bis dahin unverstandenen Erscheinungen des Stromkreises mit Hilfe seiner Gleichungen verstanden werden können. Sämtliche Gesetzmäßigkeiten, die wir heute als "Kirchoffsche Regeln" bezeichnen, hat Ohm bereits sehr ausführlich mit Hilfe seiner Differenzialgleichungen abgehandelt und formuliert.

3. Das weitere Schicksal des Ohmschen Gesetzes und Ohms internationale Anerkennung

Das Echo der Ohmschen Arbeiten in der wissenschaftlichen Welt war zunächst mehr als dürftig. Das hatte mehrere Gründe. Zunächst hatte Ohm sein vorläufiges Ergebnis, nämlich die logarithmische Abhängigkeit zwischen Strom und Leiterlänge, sowohl in Poggendorffs Annalen als auch in Schweiggers Journal veröffentlicht. Die eigentliche Arbeit, in der Ohm den richtigen Zusammenhang darstellte, erschien nicht mehr in den bekannteren Annalen Poggendorffs, sondern nur noch in Schweiggers international völlig unbekanntem Journal. Damit war diese wichtige empirische Arbeit der physikalischen Öffentlichkeit weitgehend entzogen, und sie geriet so sehr in Vergessenheit, daß viele Lehrbuchautoren jahrzehntelang Ohm als reinen Theoretiker hinstellten. Ohne das experimentelle, empirische Fundament hing Ohms theoretische Abhandlung "Die galvanische Kette - mathematisch bearbeitet" in der Luft und wurde von vielen seiner Zeitgenossen nur als eine weitere Spekulation auf diesem Gebiet angesehen.

Zum anderen geriet Ohm in den Streit zwischen den sogenannten Atomisten und den Dynamisten. Die Atomisten sahen die Materie als die letztendliche, primäre Naturgegebenheit an, während die Dynamisten die "Kräfte" als das Primäre in der Natur betrachteten. Der Begriff Kraft bedeutete damals allerdings eher das was wir heute als Energie bezeichnen. Der Energieerhaltungssatz war damals noch nicht formuliert. Ohm stand auf dem Boden des atomistischen Systems. Er faßte die Elektrizität als ein im Kreislauf befindliches Fluidum auf. Die Dynamisten hingegen versuchten die drei Klassen von Erscheinungen: Chemismus, Elektrizität und Magnetismus als verschiedene Formen ein- und derselben "Naturtätigkeit" darzustellen.

Der Streit zwischen diesen beiden Lagern wurde heftig und in unfairer Weise ausgetragen. Man ließ keine Gelegenheit aus, den Gegner lächerlich zu machen und seine wissenschaftlichen Leistungen zu schmälern und zu schmähen. Der Dynamist Pohl, der Ohms "Galvanische Kette - mathematisch bearbeitet" in den Jahrbüchern für wissenschaftliche Kritik rezensierte [10], ließ sich die Chance nicht nehmen, wieder einmal die atomistische Weltanschauung zu geißeln: Er verriß Ohms Arbeit völlig und warf ihm vor, der Elektrizität den "naturwidrigen Stempel einer unbegreiflichen Substantialität" aufgedrückt zu haben. Ohms Beitrag lieferte in seinen Augen keinerlei tieferes Verständnis der physikalischen Natur der Elektrizität, sondern blieb an der

Oberfläche der Erscheinungen haften. Ohms freimütiges Bekenntnis, daß ihm die Fouriersche Theorie der Wärmelehre bei der mathematischen Bearbeitung der "galvanischen Kette" als Vorbild diente, verhöhnt Pohl mit den Worten: "Wir können ... den Wert der bloßen Nachbildung einer mathematischen Theorie der Elektrizität, auf völlig gleicher Grundlage, aber in einem höchst verkleinerten Maßstabe, wobei gewissermaßen die Wörter "Wärme" und "Elektrizität" nur die Plätze gewechselt haben, um so weniger besonders hoch anschlagen."

Der Verriß des Dynamikers Pohl weckte die Solidaritätsgefühle der atomistischen Physiker, und so versuchte der aus diesem Lager stammende Erlanger Physiker und Mathematiker Johann Wilhelm Pfaff zu retten, was zu retten war, indem er eine Gegendarstellung schrieb. Seine Rezension fiel außerordentlich lobend aus. Er schreibt unter anderem [11]: "Wir wünschen Deutschland Glück zu der Erscheinung dieser Schrift. Ein wohlbegabter, unternehmender und der Mathematik neue Regionen erobernder Physiker tritt, der erste in Deutschland und der einzige bis jetzt, auf dem Felde auf, das die Franzosen allein in Besitz hatten." Doch der Schaden war bereits getan. Die damalige geisteswissenschaftlich geprägte Bildungsschicht in Deutschland neigte mehr der Auffassung der qualitativ argumentierenden Dynamisten zu; so auch der damalige Referent des Preußischen Kultusministeriums, und das war nicht gut für Ohm, der eine Universitätsstelle in Preußen anstrebte. Erst als Fechner durch eine Reihe sehr genauer Experimente Ohms Theorie aufs glänzendste verifizierte, wurden Ohms Arbeiten etwas bekannter. Dennoch, die eigentliche Bedeutung der Ohmschen Abhandlungen wurde auch durch Fechners Veröffentlichungen in Deutschland, das damals eine wissenschaftliche Provinz darstellte, nicht voll erkannt.

Die uneingeschränkte Anerkennung Ohms kam langsam, und zwar erst, als 1837 Claude Servais Matthias Pouillet in den Comptes Rendus der Akademie der Wissenschaften in Paris die Gesetze der Stromstärke nochmals entwickelte und veröffentlichte. Dadurch wurde ein Prioritätenstreit ausgelöst. Durch diesen wurden Ohm und seine Abhandlungen nun auch in England bekannt, wo die Physik auf sehr hohem Niveau stand, und wo man zwar die französische Literatur aufmerksam verfolgte, kaum aber die deutsche. Ohm erhielt 1841 als Auszeichnung für seine Arbeiten auf dem Gebiet der galvanischen Kette die Copley-Medaille der Royal Society of London. Dies hat ihm dann - wie gesagt - auch in Deutschland Anerkennung und Ansehen sowie die erwähnten Ehrungen gebracht.

Trotz dieser öffentlichen Ehrungen war Ohm und sein Gesetz vor allem international immer noch nicht sehr bekannt. In Gehlers physikalischem Wörterbuch von 1836 steht zu lesen [12]: "Ohm und Fechner haben genau bestimmte Gesetze festgestellt, so daß man sie im eigentlichen Sinne die Schöpfer der galvanischen Meßkunst nennen kann. Es ist wahrhaft zu bedauern, daß diese höchst verdienstvollen Arbeiten im Auslande so wenig bekannt sind. Wie manche Versuche ... hätte sich namentlich Faraday ersparen können ..." und noch in der 6. Auflage des Physiklehrbuchs Müller - Pouillet von 1864 steht: "Das Ohmsche Gesetz war schon im Jahre 1827 publi-

ziert worden. Es fand jedoch erst viel später die allgemeine Würdigung, die es verdient. Im Ausland wurde es erst spät bekannt, und noch hat man namentliche in England nicht allgemein seine hohe Bedeutung anerkannt. Das Ohmsche Gesetz bietet uns fast überall den einzig sicheren Anhaltspunkt zur Lösung der schwierigsten galvanischen Fragen, und die Mißachtung desselben, die wir noch bei manchen über Elektrizität schreibenden Autoren Englands finden, rächt sich in ihren Schriften durch eine grenzenlose Verwirrung in Dingen, welche durch das Ohmsche Gesetz schon längst die befriedigende Lösung erfahren haben."

In der Lehrbuchliteratur taucht das Ohmsche Gesetz erstmals 1844 in Eisenlohrs "Lehrbuch der Physik" 4. Auflage, als "Ohmsches Fundamentalgesetz" auf, und wenige Jahrzehnte später gehört es zum unabdingbaren Pensum eines jeden Physikstudenten. Doch bei der Übernahme in die Lehrbuchliteratur hat sich ein Wandel in der Auffassung des Ohmschen Gesetzes vollzogen. Bei Ohm kann von einer Definition des elektrischen Widerstandes gesprochen werden. Für ihn ist es die Abkürzung für den Quotienten aus Drahtlänge und Drahtquerschnitt multipliziert mit einer Materialkonstanten. Für Ohm war der Widerstand somit per definitionem unabhängig von Strom und Spannung, und sein Gesetz sprach aus, wie diese drei voneinander unabhängigen Größen miteinander zusammenhängen.

In den Lehrbüchern ging dieser Gesichtspunkt bald verloren. Man machte den Begriff "Widerstand" in den weitaus überwiegenden Fällen zunächst nur qualitativ plausibel als eine "Eigenschaft des Leiters, die den Stromfluß mehr oder weniger hemmt" und formulierte dann mit diesem qualitativen Begriff, der a priori als spannungs- und stromunabhängig aufgefaßt wurde, das Gesetz meist in der Form: "Der Strom ist der Spannung direkt und dem Widerstand umgekehrt proportional." Die Abhängigkeit des Widerstandes von den geometrischen Abmessungen eines Drahtes wird dann erst im Anschluß an die Formulierung des Gesetzes behandelt. Im Vergleich zu Ohm ist also die Reihenfolge vertauscht, und zwar aufgrund der unzulässigen Annahme, daß der Widerstand eine von Strom und Spannung unabhängige Größe ist. Diese Auffassung hielt sich in der Lehrbuchliteratur über 100 Jahre lang. Manche Autoren setzen sogar einen Proportionalitätsfaktor an. Wiedemann etwa schreibt: $I = a E/W$ und fährt dann fort: " Bei passender Wahl der Einheiten für I , E , W wird $a = 1$, also $I = E/W$ " [13].

Erst Ende des letzten Jahrhunderts taucht allmählich die Einsicht auf, daß $R = U / I$ eigentlich kein Gesetz sondern eher eine Definition des elektrischen Widerstandes darstelle, und daß man für die einmal definierte Größe R in gewissen Fällen die Gesetzmäßigkeit $R = \text{const.}$ aussprechen kann [14]. Hinweise für diesen Standpunktwechsel findet man beispielsweise im " Lehrbuch der Physik und Meteorologie " von Müller-Pouillet, Ausgabe 1909 [15]. Dort heißt es : " Das Gesetz lautet in Worten: Die Stromstärke I in einem Leiter ist der Potentialdifferenz Q seiner Enden direkt, seinem Widerstand W umgekehrt proportional : $I = Q/W$. Man sieht aus dem Vorhergegangenen, daß bloß die Proportionalität mit der Potentialdifferenz eine Beobach-

tungssache ist, daß dagegen die festgesetzte Proportionalität mit dem reziproken Widerstand einfach eine Definition des Begriffes Widerstand bedeutet." Die Erkenntnis, daß streng zwischen der Definition des elektrischen Widerstands und einer für ihn geltenden Gesetzmäßigkeit unterschieden werden muß, ist nicht zuletzt auch stark durch die zunehmende Bedeutung des Wechselstromkreises mit Induktivitäten und Kapazitäten gefördert worden. Im Wörterbuch der Physik von Berliner und Scheel, 1. Auflage 1924 [16], findet sich unter elektrischem Widerstand: "... Der Widerstand wird oft auch als Verhältnis von Spannung zu Strom direkt definiert, vor allem ist dies bei Wechselstromkreisen der Fall. Ist dieses Verhältnis unabhängig von der Spannung, so gilt das Ohmsche Gesetz."

Weite Verbreitung und Eingang in die Physikausbildung fand diese Einsicht aber erst durch das von R. W. Pohl 1927 herausgebrachte Lehrbuch der Experimentalphysik. Dort steht klar und deutlich zu lesen: "Man definiert für jeden Leiter als Widerstand den Quotienten

$$\frac{\text{Spannung } P \text{ zwischen den Enden des Leiters}}{\text{Strom } i \text{ im Leiter}}$$

Der als Widerstand definierte Quotient P / i hängt i. a. in komplizierter Weise von der Stromstärke i und zahlreichen anderen Versuchsbedingungen ab. In Sonderfällen aber findet man den Quotienten $P / i = \text{const.}$ In diesem Sonderfall gilt das Ohmsche Gesetz: $P = i \cdot R$."

Es dauerte aber trotz solch klarer Aussagen noch mehr als eine Generation bis sich diese neue Sicht des Ohmschen Gesetzes in allen fachwissenschaftlichen Lehrbüchern durchgesetzt hatte. In die Schulbuchliteratur für Gymnasien, höhere Bürger- und Realschulen fand das Ohmsche Gesetz um 1850 herum Eingang. Seit etwa 1875 gehört es zum eisernen Bestand der Lerninhalte des Physikunterrichts dieser Schularten. In den Naturlehrbüchern für Volksschulen taucht es um 1900 herum zum ersten Mal auf; es wird dort aber bis heute häufig nicht in seiner quantitativen Form gelehrt. Die Unterscheidung zwischen der Definition des Widerstands und dem Ohmschen Gesetz hat in der Schulbuchliteratur wesentlich später eingesetzt als bei den fachwissenschaftlichen Lehrbüchern und ist bis heute noch nicht ganz abgeschlossen. In der Mehrzahl der Physiklehrbüchern für Gymnasien allerdings wird es seit den 70-iger Jahren korrekt formuliert [13].

Literatur:

- [1] Urschrift des Zeugnisses in: Urkunden- und Handschriftensammlung des Deutschen Museums in München (Ohm, Nr. 612)
- [2] G. S. Ohm, Grundlinien einer zweckmäßigen Behandlung der Geometrie als höherem Bildungsmittel an vorbereitenden Lehranstalten, Erlangen, 1817
- [3] G. S. Ohm, Vorläufige Anzeige des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contact-Elektrizität leiten, Schweiggers Journal für Chemie und Physik, Bd.44 (1825) p.110-118 und Pogg. Ann., Bd.4 (1825), p.79-88
- [4] G. S. Ohm, Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Contactelektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Voltaschen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikator, Schweiggers Journal für Chemie u. Physik, Bd. 46 (1826), p. 137-166
- [5] G. S. Ohm, Die galvanische Kette - mathematisch bearbeitet, Neudruck mit einem Vorwort von Dr. James Moser, Toeplitz & Deuticke, Leipzig und Wien, 1887
- [6] G. S. Ohm, Grundzüge der Physik, Joh. Leonh. Schrag, Nürnberg, 1854
- [7] G. S. Ohm, Beschreibung einiger einfacher und leicht zu behandelnder Vorrichtungen zur Anstellung der Licht-Interferenz-Versuche, Pogg. Ann. Bd. 49 (1840), p. 98-109
- [8] G. S. Ohm, Erklärung aller in einachsigen Kristallplatten zwischen geradlinig polarisiertem Licht wahrnehmbaren Interferenzerscheinungen in mathematischer Form mitgeteilt, Abhandlungen der königlich-bayerischen Akademie der Wissenschaften 7, Teil I (1852), p. 43-149; Teil II (1853), p. 267-369
- [9] G. S. Ohm, Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen, Pogg. Ann. Bd. 59 (1843), p. 513-565
- [10] G. F. Pohl, Jahrbücher für wissenschaftliche Kritik, Berlin (1828) Bd. 1, Nr. 11/12 bis 13/14
- [11] F. Mann, Georg Simon Ohm, Beiträge zum Charakterbild des großen Physikers, Erlangen u. Leipzig 1890, p. 36
- [12] Gehlers Physikalisches Wörterbuch, Bd. VIII, 1 (1836) p. 23 u. 41
- [13] E. Wiedemann, H. Ebert, Physikalisches Praktikum, Braunschweig, 1897, p. 348
- [14] W. Klinger, Mißglückte und geglückte Formulierungen des Ohmschen Gesetzes in den Schulbüchern des 20. Jahrhunderts, Vorträge Physikertagung 1990, Hrsg. W. Kuhn
- [15] Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik und Meterologie, Braunschwei, 1909, p. 290
- [16] A. Berliner, K. Scheel, Physikalisches Handwörterbuch 1. Auflage, Springer Berlin, 1924