

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

## **BEITRAG AUS DER REIHE:**

Werner B. Schneider (Hrsg.)

# Wege in der Physikdidaktik

Band 1

Sammlung aktueller Beiträge aus der  
physikdidaktischen Forschung

ISBN 3 - 7896 - 0090 - 3

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1989

### 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](http://www.solstice.de)

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Manfred Achilles

## **Die Elektrodynamik von Oersted bis Ohm**

In der Ausdrucksweise von T.S.Kuhn kann man sagen, daß im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts physikalische *Paradigmenwechsel* stattfanden. Mitten in die noch nicht abgeschlossene Auseinandersetzung über die richtige Lichttheorie - traditionelle Newtonschen Lichttheorie im Streit mit der Wellenlehre, wiederbelebt durch Thomas Young und Augustin-Jean Fresnel - platzte die Entdeckung des Elektromagnetismus durch Hans Christian Oersted und löste einen weiteren Paradigmenwechsel aus. Den Beginn dieses neuen Gebietes, das der *Elektrodynamik*, soll in seinen experimentellen Voraussetzungen zusammenfassend dargestellt werden. Es begann mit einem vierseitigen, lateinisch geschriebenen Rundbrief Oersteds, datiert vom 21.7.1820, den er an wissenschaftliche Freunde und interessierte Institute schrieb (*Versuche über die Wirkung des elektrischen Conflicts auf die Magnethadel* [1]) Dieser Brief löste wissenschaftliche Hektik aus: Die Elektrodynamik - der Ausdruck stammt von A.M.Ampère - wurde, neben der Optik, das zweite Zentralthema der Forschung im 19. Jahrhundert.

### **1. Hans Christian Oersted (1777-1851)**

Oersted war gelernter Apotheker mit großen naturphilosophischen (physikalischen) und auch philologischen Interessen [2]. Durch Reisen durch Europa in jungen Jahren verschaffte er sich die notwendige naturwissenschaftliche Bildung. Besonders beeindruckte ihn der Kreis der Wissenschaftler und Künstler in Jena; dort traf er die Brüder Schlegel und Tieck, J.W.Ritter, und vor allem den Philosophen F.W.J.Schelling. Man trieb dort romantische Naturphilosophie, die damals auf viele Wissenschaften großen Einfluß ausübte. Sätze wie folgende charakterisieren die Postulate der Naturphilosophen: "Der Philosophierende muß alles gleichsam aus dem Blickwinkel Gottes betrachten". Oder: "Die Lebendigkeit der Natur wird in den *Polaritäten* sichtbar, etwa in dem Widerspiel von Magnetismus und Elektrizität". Aus diesem polaren Denken wurden vermeintlich neue Erkenntnisse geschöpft wie etwa diese: Wenn die Erde Nord- und Südpol habe, dann müsse sie auch einen elektrisch positiven und einen negativen Pol haben (Ritter). Oersted u.a. suchten nach dem *Konflikt der Polaritäten* "Magnetismus-Elektrizität" viele Jahre. Wie er auf die Lösung im Winter 1819/20 gekommen ist, ist unklar. Es wird tradiert, daß ihm während einer Vorlesung der Versuch heureka gelungen sei. Vermutlich ist der Effekt, daß ein stromdurchflossener Leiter eine magnetische Wirkung ausübt, vorher übersehen worden,

weil die damals üblichen Voltasäulen nur recht bescheidene Ströme zuließen. Oersted benutzte, entgegen der Darstellung eines Künstlers (Abb. 1), große Kupfertröge, in die er Zinkplatten einhängte. Diese ließen weit größere Ströme als die üblichen Voltasäulen zu. Heute ist die Stromversorgung kein Problem



Oersted demonstriert die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom  
Nach einer Zeichnung von K. Storch

Abb.1 Nicht korrekte Zeichnung des Künstlers K.Storch

mehr, dadurch erscheinen im Nachhinein die Versuche von Oersted fälschlicherweise trivial.

**1. Versuch:** "Die Versuche zeigen, daß sich eine Nadel aus der Ruhe bringen läßt bei *geschlossenem Stromkreis*". Die Wirkung um den Leiter nennt Oersted den "*elektrischen Conflict*". Mit Hilfe eines Gleichstromnetzgerätes wird ein Strom von 5A durch einen geschlossener Stromkreis, bestehend aus einem langen Draht, geschickt. Ein Stück des Drahtes wird in der Nähe einer Magnetnadel vorbeigeführt, wobei man darauf achte, daß die Stromrückführung weiträumig an der Nadel vorbeigeführt wird. Fließt der Strom oberhalb der Nadel, ist die Drehung in anderer Richtung, als wenn der stromdurchflossene Leiter unterhalb der Na-

del liegt (siehe Abb.1). Dieser und die Versuche 1 bis 6 sind in [3] geschildert.

**2.Versuch:** Liegt der Draht *oberhalb* der Magnetnadel, weicht sie vom negativen Ende gesehen nach Westen aus. - Oersted gibt hiermit die erste richtige Regel über die Abweichung von Magnetnadeln im Felde stromdurchflossener Leiter an! Diese Regel ist zwar richtig, aber nicht geschickt, weil er eine Himmelsrichtung und *nicht die Polarität der Nadel* benutzt.

**3.Versuch:** "Es handelt sich *nicht um eine Anziehung oder Abstoßung*", was sich leicht zeigen läßt, wenn man den Draht seitlich ein wenig verschiebt, dann zeigt einmal der Nordpol, einmal der Südpol der Nadel zum Draht hin. Hier ist er im Widerspruch zur späteren Newtonschen Auffassung, der nur Zentralkräfte zulassen will, obwohl in diesem Falle auf die Magnetnadel Drehmomente wirken.

**4.Versuch:** Die magnetische Wirkung *dringt durch alle Stoffe* hindurch. Bringt man zwischen Nadel und Draht etwa Pappe, Aluminiumblech, Wasser und anderes, ändert sich der Ausschlag der Nadel nicht. Es bleibt das Problem, wie sich ein eisernes Blech verhält.

**5.Versuch:** "Nur die magnetischen Körper (Eisen) scheinen dem magnetischen Konflikt zu widerstehen, *da sie durch den Stoß der kämpfenden Kräfte in Bewegung gesetzt werden können*". - Bringt man zwischen Draht und Nadel ein Stück Dynamoblech, vermindert das tatsächlich den Ausschlag der Magnetnadel. Eisen scheint der Durchlässigkeit des Magnetismus zu widerstehen. Man hüte sich aber vor zu schneller Beurteilung der Sache!

**6.Versuch:** Oersted ist sich seiner Meinung nicht sicher, ob Eisen für die magnetischen Kräfte durchlässig ist. Die magnetische Wirkung dringt zu unserer Verwunderung nämlich *auch durch Eisen* hindurch: Ein allseitig geschlossenes Eisenrohr läßt die Wirkung des innerhalb des Rohres gelegenen Drahtes ungehindert auf die Nadel wirken. Die magnetische Abschirmung durch Eisen, die wir kennen, kommt in anderer Weise zustande: Eisen bildet im Magnetfeld durch magnetische Influenz Pole aus, die ein Sekundärfeld erzeugen, das dem ursprünglichen entgegensteht. Man kann auch sagen, daß das Sekundärfeld die Nadel teilweise *entmagnetisiert*. Im "POHL" findet man Ausführliches zur Entmagnetisierung [4].

Oersted folgert zusammenfassend: "*Es läßt sich schließen, daß dieser Konflikt in Kreisen fortgehe*". In diesem Satz ist der Gedanken eines magnetischen Feldes enthalten, den man erst Faraday zuschreibt. Weiterhin ist in dieser Hypothese die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Magnetfeldes enthalten, die eine *Nahewirkungstheorie* nahelegt.

## 2. Elektrodynamik von André Marie Ampère (1775-1836)

F. Arago, Direktor der Pariser Sternwarte, der für die neue Wellenoptik seines Freundes Fresnel eintrat, befand sich gerade wegen dieser Streitangelegenheit mit den Newtonianern (z.B. Prevost) in Genf [5]. Bei diesem Besuch sah er die neuen elektromagnetischen Versuche, die dort A. de la Rive, 10 Tage nach ihrer Veröffentlichung durch Oersted, vorführte. Er fand sie höchst interessant und, nach Paris zurückgekehrt, wiederholte er sie am 11.9.1820 vor der dortigen Akademie. Einer der Zuhörer war A.M. Ampère [6]. Ampère war Mathematiker und in praktischen Dingen nicht sonderlich geschickt, trotzdem hatte er binnen einer Woche ein neues Gerät aus Draht zusammengebogen: Die Ampèresche Stromwaage. Nach dem 18.9.1820 führte er bis in den Spätherbst hinein wöchentlich neue Versuche mit diesem und anderen Geräten der Akademie vor. Nach zwei Jahren hatte er das Wesentliche des "Ampèreschen Gesetzes" hergeleitet, wobei der Mathematiker Laplace bei der Abfassung half. Ampère, wie die meisten Pariser Physiker, war ein Epigon Newtons; er hielt die Behauptung Oersteds, daß die *Wirkung in Kreisen fortgehe*, für rein spekulativ und für einen Rückschritt in die Descartsche Wirbelvorstellung, die seit Newton als überwunden galt. Ob etwas im Raum vorsichgehe, hielt er grundsätzlich für nicht erkennbar; so bestimmte zunächst Ampère den Weg der Elektrodynamik, die eine Fernwirkungstheorie zugrunde legte. Das Ampèresche Gesetz (wegen des fehlenden Maßsystems legte es nur die Proportionalität fest) entnahm er aus den sog. vier *Gleichgewichtslagen*, von denen hier drei gezeigt werden.

Die Ampèresche Stromwaage ist ein U-förmig gebogener Draht, dessen umgekippte Enden wegen des notwendigen, guten Kontaktes in kleine Quecksilbergefäße eintauchen. Dieser Draht ist wie ein Pendel beweglich, der relativ große Rückstellkräfte besitzt (kurze Schwingungszeit), deshalb muß durch ein Gegengewicht der Schwerpunkt so angehoben werden, daß sich große Schwingungszeiten einstellen. Ist alles gut justiert, bedarf die Stromwaage nur kleiner Kräfte, um aus der Ruhelage gebracht zu werden, was aber immer noch Ströme von 25A erfordert. Diesem beweglichem Leiter steht ein fester parallel gegenüber. Fließt jetzt in beiden der gleiche Strom in entgegengesetzter Richtung, spreizt sich das Pendel der Stromwaage ab (Abb.2).

**7. Versuch:** (erste Gleichgewichtslage) Anziehende und abstoßende Kräfte sind bei gleichem Strom **gleich groß**. Ein hin- und rücklaufender fester Draht übt auf die Waage keine Kräfte aus. Zum Gelingen des Versuches ist es erforderlich, daß die Zuführungen zur Stromwaage so gelegt werden, daß *diese* keine Kräfte auf die Waage ausüben können, was man durch großräumige Leitungsführung erreichen kann.

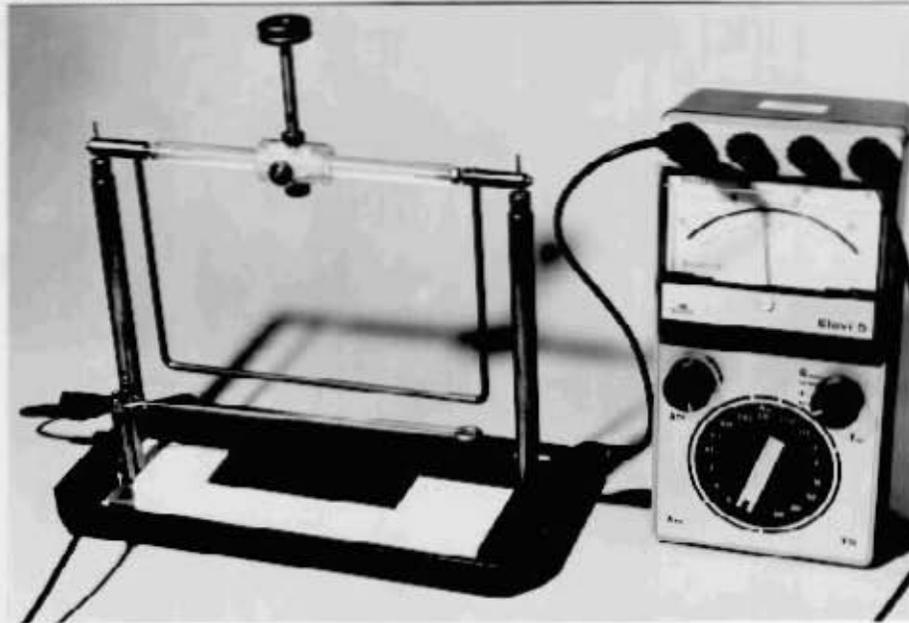


Abb.2 Die Ampèresche Stromwaage in der ersten Gleichgewichtslage

**8. Versuch:** (zweite Gleichgewichtslage) "Ein gerader und ein *beliebig in Windungen* gebogener Draht verursachen auf die Stromwaage gleiche Kräfte". Hängt das Pendel der Stromwaage zwischen zwei Drähten, von denen der eine beliebig gebogen, der andere gerade ist und die in gleicher Stromrichtung durchflossen werden, erfährt es keine Ablenkung, wenn die Stromzuführungen korrekt geführt sind.

**9. Versuch:** (dritte Gleichgewichtslage) "Drähte, die zueinander senkrecht stehen, üben aufeinander keine Kräfte aus", weil eine parallele Komponente fehlt.

Nach gehöriger Überlegung kam er auf folgendes Gesetz:

$$dF = \frac{ids \cdot i'ds'}{r^2} (\cos \epsilon + h \cdot \cos \vartheta \cdot \cos \vartheta')$$

Es bedeuten:

$\vartheta$  und  $\vartheta'$  Winkel zwischen Stromelementen und Verbindungslinie,

$\epsilon$  Winkel der Stromelemente zueinander, Konstante  $h = -3/2$  (1827) [7]

Das neue Gesetz bestimmte die Entwicklung der Elektrizitätslehre. Es ermöglichte später die Aufstellung eines elektrischen Maßsystems durch Gauß, Weber und Thomson (Lord Kelvin). Allerdings schob es die ersten Ansätze einer Nahe-

wirkungstheorie bis zur Zeit Maxwells beiseite.

### 3. Forschungen von Thomas Johann Seebeck (1770-1831)

Seebeck, aus Reval (heute Tallinn) stammend, studierte in Göttingen und war mit Oersted und anderen Naturphilosophen befreundet. Er hatte sich durch seine optischen Forschungen (Drehung der Polarisationssebene des Lichts durch Zuckerrösung, 1817) wissenschaftliche Anerkennung erworben. Daraufhin wurde er ordentliches Mitglied der Berliner Akademie (1818) und zog in die preußische Hauptstadt um, wo er sich der Galvanismusforschung zuwandte. Er hatte aber keinen sonderlichen Erfolg, bis der genannte Rundbrief Oersteds eintraf. Wie de la Rive, Arago und Ampère wiederholte auch er die angegebenen Versuche und konnte sie bestätigen. Da er der romantischen Naturphilosophie nahestand, verstand er den Hinweis, daß der *Magnetismus in Kreisen fortgehe* und konnte der Berliner Akademie einen neuen Versuch im Winter 1820/21 vorführen. Ein stromdurchflossener Draht ordnet darumgelegte Eisenfeilspäne in Kreisform an. In den Akademieberichten [8] findet man eine Zeichnung des entstehenden Feldes (Abb.3).

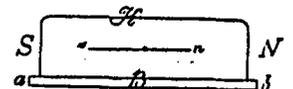
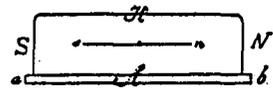
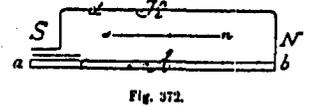
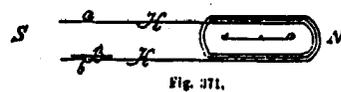
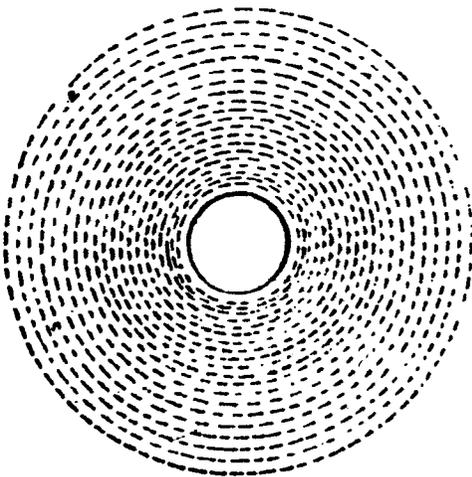


Abb.3 Zirkularfeld von Seebeck

Abb.4 Konstruktionen von Thermoelementen

Bereits ein Jahr später, im Winter 1821/22, hielt er wieder vier Vorträge, über *Die magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperaturdifferenz* [9], die ihn berühmt machen sollten. Bei der Überprüfung der sog. Voltaschen Theorie entdeckte er die Thermoelektrizität. Als geübter Experimentalphysiker vermochte er nach einer langen Versuchsreihe festzustellen, daß die Ablenkung der Oerstednadel *allein durch eine Temperaturdifferenz* zwischen dem von ihm benutzten Daumen und der Umgebungstemperatur zustande kommt. Als be-

sonders thermoempfindliche Metalle erkannte er Wismut und Antimon, die beide einen entgegengesetzten Effekt hervorrufen. Auch andere Metalle ordnete er in eine ausführliche Thermoreihe ein. Kurioserweise bemerkte er, daß auch *preu-Bische Taler* (auch heutige "Silbermünzen" sind geeignet) einen Thermoeffekt hervorrufen. Allerdings glaubte er, daß der Magnetismus unmittelbar durch die Wärme hervorgerufen würde und nannte ihn zunächst *thermomagnetischen Effekt*.

Der Zufall spielte eine Rolle. Die Berliner Akademie, die die Veröffentlichung der Vorträge zu veranlassen hatte, war wohl überlastet. Deshalb wurden Seebecks Forschungsergebnisse über den Thermoeffekt, die nur handschriftlich aufgezeichnet worden waren, erst 1825 in den Akademieberichten veröffentlicht und für Interessierte zugänglich (Abb.4).

### 10. Versuch

In eine Dreiwindungsspule wird eine nach dem magnetischen Meridian ausgerichtete Oestednadel angebracht. Klemmt man jetzt die Enden der Spule über eine Scheibe Wismut oder Antimon zusammen, erfährt die Nadel einen Ausschlag, einmal in die eine, einmal in die andere Richtung. Die Ablenkung von Wismut ist größer, es hat einen höheren thermoelektrischen Effekt als Antimon. Der Versuch erfordert saubere Kontakte, da nur wenige Millivolt den Effekt hervorrufen. Eine ausführlichere Schilderung der Versuche findet man in [10].

### 4. Der erste elektrische Meßversuch von Georg Simon Ohm (1789-1854)

Nach vergeblichen Versuchen, ein neues elektrisches Gesetz zu finden, erfuhr Ohm von Poggendorff, dem Herausgeber von *Poggendorffs Annalen*, wegen der genannten Umstände erst 1825 von den Versuchen Seebecks. Erst danach konnte er das Thermoelement erfolgreich zum Bau seiner Drehwaage einsetzen, weil nur dieses genügend konstante Spannungen erzeugte und außerdem sehr niederohmig war. Mit dieser Drehwaage, die der Coulombschen ähnlich war, konnte er die magnetische Wirkung auf die Nadel mit Hilfe der linearen Verdrillung eines Goldbändchens quantisieren. Obwohl er über kein elektrisches Maßsystem verfügte,

konnte er dennoch Vielfache von willkürlichen Maßeinheiten (Skalenteile für den Strom, Zoll für den Widerstand) messen. Die Veröffentlichung erfolgte 1826 unter dem Titel: *Bestimmung des Gesetzes, nach welchem die Metalle die Contactelektrizität leiten nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Volta-schen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators* [11].

Die Ohmsche Drehwaage ist im Aussehen in der obigen Publikation genau beschrieben, deshalb ist sie oft nachgebaut worden (Abb.5; in [11]). Allerdings

wurde bei der Rekonstruktion weniger Wert auf ein nostalgisches, naturgetreues Aussehen gelegt, sondern mehr auf die Funktionstüchtigkeit des Gerätes. Mir unwichtig erscheinende Details wurden weggelassen; z.B. wurde auf eine Ableselupe und die Zinkbecher verzichtet. Dagegen waren die Quecksilberkontakte, nach anfänglichem Zögern, notwendig.

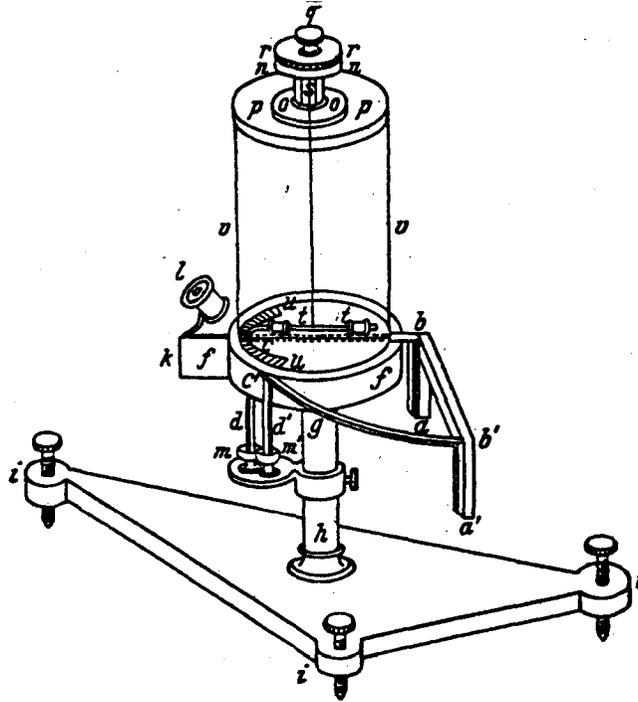


Abb.5 Ohms Drehwaage nach seinen eigenen Angaben [11]

Das Gerät muß zuerst in den Meridian gebracht werden. Eine Dämpfung der Nadel, heute eine Selbstverständlichkeit für ein Meßinstrument, ist sehr klein, deshalb dauert es lange Zeit, bis die Nadel zur Ruhe gekommen ist. Jede unvorsichtige Berührung erfordert erneutes Warten. Die folgenden Versuche sind in [12] ausführlich geschildert.

### 11. Versuch

In den anfangs offenen Stromkreis (Nadel: Nord-Süd) werden nacheinander, beginnend mit dem längsten die beweglichen Leiter in die Quecksilbernäpfchen eingehängt. Die Nadel erfährt eine Drehung, die jeweils mit Hilfe der Rändelschraube, die das Aufhängeband verdrillt, kompensiert wird. Damit beim Leiterwechsel die Nadel nicht ins Schwingen gerät, wird zunächst der neue Leiter eingehängt, ehe man den vorhergehenden entfernt. Man erkennt deutlich, daß kurze Leiter größere Ausschläge zur Folge haben.

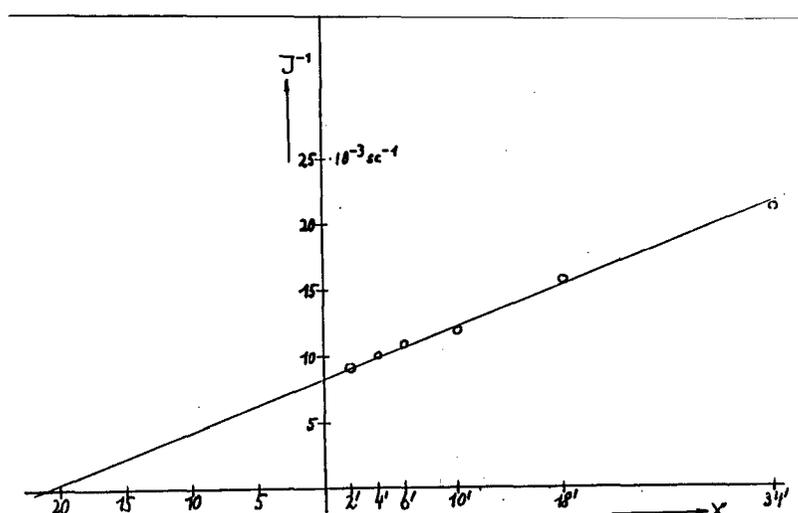


Abb.6 Darstellung der Funktion  $1/I=f(R_a)$

### 12. Versuch

Mit diesem Gerät wurde Ohms Meßreihe wiederholt. Die Punkte liegen auf einer verschobenen Hyperbel. Nimmt man aber für den Strom reziproke Werte, liegen die Meßpunkte auf einer steigenden Geraden. Die Streuung der Meßpunkte wird erkennbar und zeigt die mangelnden Fertigkeiten des Experimentators (Abb.6).

### 13. Versuch

Die Zahlenangaben, die Ohm in seiner Veröffentlichung von 1826 gemacht hat (Abb.7), wurden mit modernen Mitteln (Computer) ausgewertet und in gleicher Weise aufgetragen (Abb.8). Man sieht, daß Ohm bewundernswert sauber gemessen hat (Abb.9)!

Länge	2'	4'	6'	10'	18'	34'	66'	130'
Reihe	1	2	3	4	5	6	7	8
8.1.1826	327	301	278	238	191	134	83	48
11.1.26	311	287	267	230	184	130	80	46
11.1.26	307	284	264	226	181	129	79	44
15.1.26	305	281	259	224	178	125	79	44
15.1.26	305	282	258	223	178	125	78	44

Abb.7 Die originalen Meßdaten von Ohm [11]

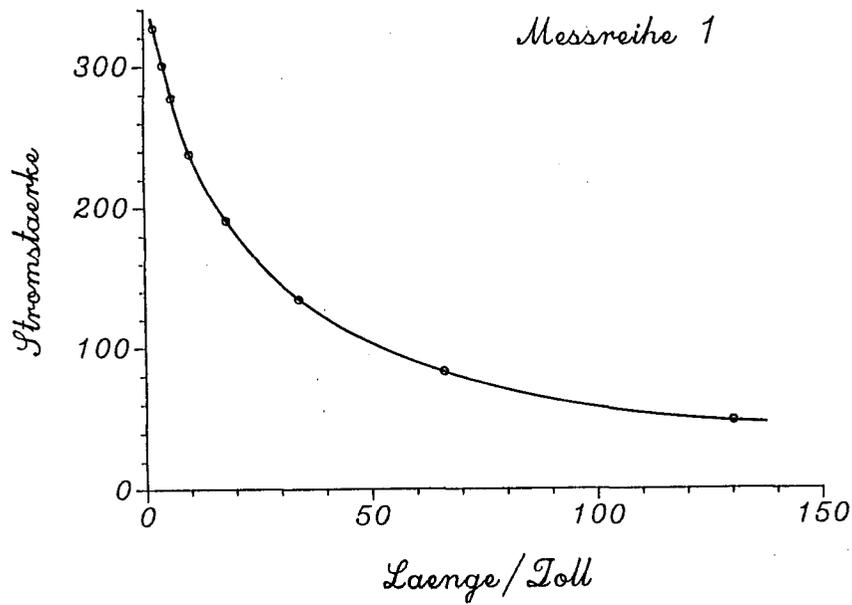


Abb.8 Meßdaten von Ohm liegen auf einer Hyperbel (Computerzeichnung)

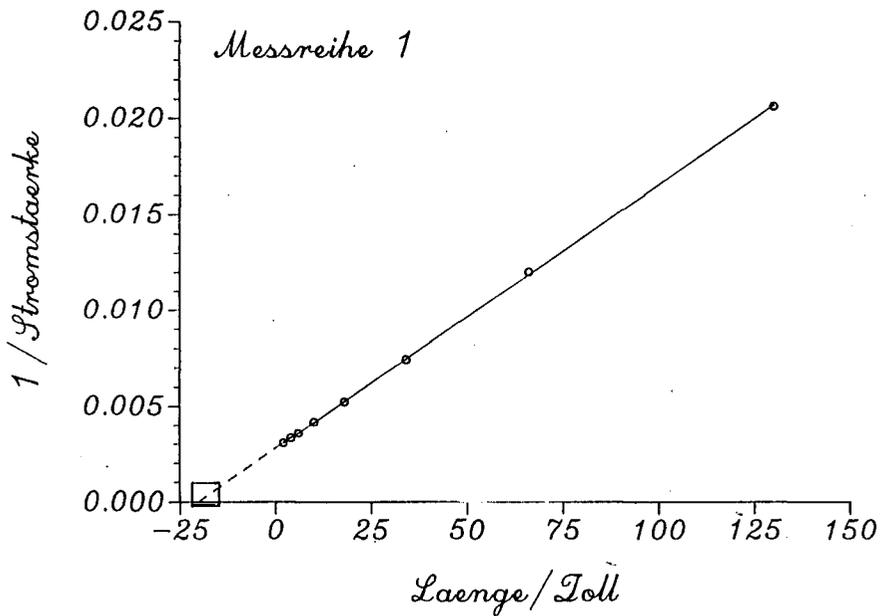


Abb.9 Daten der Abb.8 in reziproker Darstellung (Computerzeichnung)

#### 14. Versuch

Ein kleiner Fehler hat sich bei Ohm eingeschlichen. Bei einer Temperaturdifferenz von nur  $7,5^{\circ}\text{R}$  ( $=9^{\circ}\text{C}$ , damalige Zimmertemperatur!) erhielt er, wie erwartet, eine kleinere Spannung. Zusätzlich behauptete er aber, daß der innere Widerstand *völlig gleich* geblieben wäre. Das stimmt aber nicht, seine Zahlenangaben geben über die Abweichung durchaus Auskunft (Abb.10).

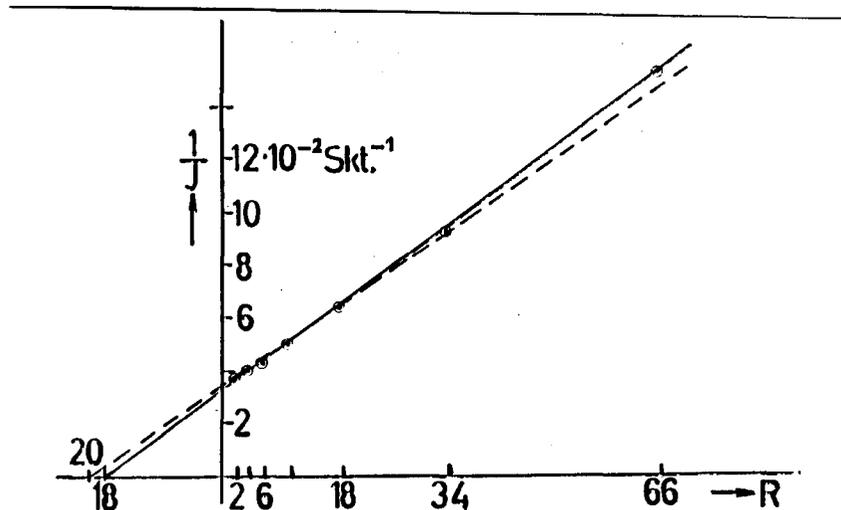


Abb.10 Ohm hat bei einer Temperaturdifferenz von ca.9°C das Kleinerwerden des inneren Widerstandes übersehen

## 5. Anwendungen des Ohmschen Gesetzes auf die "Theorie des Voltaschen Apparates"

### 15. Versuch

Wie müssen galvanische Zellen vernünftigerweise geschaltet werden? In Serie geschaltete galvanische Elemente vergrößern nur dann die Stromstärke, wenn der äußere Widerstand groß gegenüber dem inneren Widerstand ist, ein Fall, der üblicherweise beim Experimentieren gegeben ist. Im Kurzschlußbetrieb - so verwendete man damals häufig Elemente - ist die Stromstärke dagegen trotz Serienschaltung mehrerer Elemente, wie sie in Voltasäulen gebräuchlich war, gleich.

Ohms Begründung in heutigen Symbolen lautet:

$$I = n \cdot U_q / (n \cdot R_i + R_a)$$

$n$ =Zahl der Elemente;  $U_q$ =Quellspannung;  $R_i$ =innerer Widerstand;  $R_a$ =äußerer Widerstand

Wenn  $n \cdot R_i \ll R_a$  (Normalbelastung) dann gilt:  $I = n \cdot U_q / R_a$  ;

wenn  $n \cdot R_i \gg R_a$  (Kurzschlußbelastung) dann gilt:  $I = U_q / R_i = \text{const.}$

Ohms Gesetz enthielt in der Urform zwei Konstanten (Quellspannung und innerer Widerstand) und zwei Variable (Stromstärke und äußerer Widerstand). Dank der Arbeit Ohms von 1827 [13] verallgemeinern wir heute das Gesetz. Wenn man nämlich von der konstanten Quellspannung den Spannungsabfall, der am inneren Widerstand erfolgt, abzieht, bleibt die Spannung am äußeren Widerstand übrig,

die aber jetzt eine Variable geworden ist. Die Form des Gesetzes vereinfacht sich zwar zu  $I=U/R$ , aber der Umgang mit der Formel wird schwieriger, weil sie *drei* Variable enthält und nur bei Konstanthaltung einer der drei eine vernünftige Funktion liefert.

## Referenzen

- [1] H.CHR.OERSTED: Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam (Exemplar der Gött.Uni.Bibl.) Kopenhagen, 21.7.1820 übersetzt von Gilbert unter dem Titel: Versuche über die Wirkung des electricischen Conflicts auf die Magnetnadel. In: Leybold-Welle 1, H.4, S.19-24 (1960)
- [2] (mehrere Autoren) In: Dänische Rundschau, Sonderausgabe zum 14.8.1977, Hrsg.: Dänisches Außenministerium
- [3] M.ACHILLES: Der Oerstedversuch und die Wirkung des Eisens auf Magnetfelder. In: Prax.d.Nat.-Wiss.(Phy) 34, S.31-36 (1985)
- [4] R.W.POHL: Einf.i.d.Elektrizitätslehre S.152f (1975)
- [5] B.WEISS: Die Widerlegung der Theorie der molécules puppiformes. Eine verschollene Abhandlung von Augustin Jean Fresnel. In: Cencaurus 31, S.238 (1989)
- [6] F.ARAGO: W.G.Hankel (Hrsg.): Franz Aragos sämtliche Werke, Bd.II, S.3-94 (Leipzig, 1854)
- [7] K.FASSMANN (Hrsg.): Die Großen der Weltgeschichte, Bd.VII darin: W.Kaiser: André Marie Ampère, S.326-331 (Zürich, 1976)
- [8] TH.J.SEEBECK: Zur Entdeckung des Elektromagnetismus. In: Ostwalds Klassiker der exakten Naturwissenschaften Nr.63 S.19 (Leipzig, 1895)
- [9] TH.J.SEEBECK: Magnetische Polarisierung der Metalle und Erze durch Temperaturdifferenz. In: ibd. Nr.70 S.5
- [10] M.ACHILLES: Das historische Experiment: Der Seebeckeffekt. In: DPG Didaktik der Physik, Tagungsberichte der Tagung München 1985, Gießen 1986 S.294-299
- [11] G.S.OHM: Bestimmung des Gesetzes, nach welchem Metalle die Kontakt-elektrizität leiten, nebst einem Entwurfe zu einer Theorie des Volta-schen Apparates und des Schweiggerschen Multiplikators. In: Schweiggers Journal f.Che.u.Phys. 46, S.137-166 Auch in: Das Grundgesetz des elektrischen Stromes, drei Abhandlungen von G.S.Ohm u.G.Th.Fechner. In: Ostwalds Klassikern.. Bd.244 (Leipzig, 1938)
- [12] M.ACHILLES: Das historische Experiment: Die Experimente Ohms, die 1826 zu seinem Gesetz führten. In: Prax.d.Nat.-Wiss.(Phy) 32, S.78-83 (1983)
- [13] G.S.OHM: Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet. In: E.Lommel (Hrsg.): Georg Simon Ohms wissenschaftliche Leistungen. (München, 1889)

Die Computerzeichnungen fertigte Herr Dipl.-Phys. U.Neukirch, TU Berlin, an. Alle hier beschriebenen historischen Experimente erscheinen neben einer Menge anderer mit vielen Bildern versehen demnächst als Monographie:

M.ACHILLES: Physikalische historische Experimente. Springer, Heidelberg, voraussichtlich Herbst 1989