

Der richtige Dreh: Die Coulombschen Experimente zur Untersuchung des Torsionsverhaltens von Metallfäden – und was daraus über Physik erfahren werden kann

Peter Heering

Arbeitsgruppe Didaktik und Geschichte, Institut für Physik,
Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Carl-von-Ossietzky Universität, 26111 Oldenburg
peter.heering@uni-oldenburg.de

(Eingegangen: 15.06.2005; Angenommen: 04.10.2006)

Kurzfassung

Historischen Experimenten können verschiedene Funktionen im Rahmen der Ausbildung zugeschrieben werden. In diesem Beitrag wird ein Experiment vorgestellt, mit dem insbesondere erkenntnistheoretische Aspekte experimenteller Praxis im Unterricht thematisiert werden können. Charles Augustin Coulomb ist vor allem durch seine ab 1785 veröffentlichten Arbeiten zur Elektrostatik bekannt, in denen die Drehwaage eine wesentliche Rolle spielt. Die Basis dieses Geräts liegt in einer Abhandlung, die ein Jahr früher erschien und in der er die Torsion von Metallfäden untersuchte; das von ihm hierbei formulierte Torsionsgesetz besitzt auch heute noch Gültigkeit. Daneben untersuchte Coulomb in dieser Arbeit das Dämpfungsverhalten von Torsionsschwingungen. Eine genauere Analyse dieser Arbeit zeigt, dass die Formulierung seiner Ergebnisse zwei mathematische Interpretationen zulassen: Eine entspricht der auch heute in Lehrbüchern zu findenden Beschreibung, die andere führt zu absurden Konsequenzen. Bemerkenswerterweise stützen seine veröffentlichten Messwerte aber die zweite Interpretation. Im Rahmen des Beitrags werde ich aufzeigen, welche Ambivalenz die von Coulomb gewählte Messmethode besitzt und wie sich die skizzierte Problematik erklären lässt. Anhand der Diskussion dieses Beispiels lassen sich wissenschaftstheoretisch relevante Aspekte wie die Bedeutung der Messmethode und die Relevanz der Erwartungshaltung für das Produzieren eines experimentellen Ergebnisses aufzeigen. Bedingt durch das technisch unproblematisch zu realisierende Funktionsprinzip bietet sich dieses Experiment auch für die Behandlung im Rahmen des schulischen Physikunterrichts der Sekundarstufe II an.

1. Einleitung

Im Zusammenhang mit historischen Unterrichtsansätzen ist auch die Verwendung entsprechender Experimente bereits verschiedentlich vorgeschlagen worden [1, 2, 3, 4, 5]. Dabei wird in der Begründung für den Einsatz dieser Experimente einerseits darauf verwiesen, dass die Apparate besser zu verstehen sein sollen und somit die SchülerInnen nicht mit Apparaturen experimentieren, die für sie als ‚black-boxes‘ erscheinen und prinzipiell unverständlich sind. Hierauf zielt etwa die Argumentation, dass „(i)n modernen Laborgeräten ... die nachzuentdeckenden Zusammenhänge in der Regel schon eingebaut (sind). Mit ihrer Verwendung werden dem Lernenden nicht selten logische Zirkelschlüsse anstelle von Problemlösungen angeboten. Im Gegensatz dazu geben historische Instrumente die Möglichkeit einer redlichen genetischen Argumentation“ [5], vgl. auch [3]. Allerdings wird in diesem Zusammenhang betont, dass diese Experimente auch in ihrem historischen Kontext eingesetzt werden sollen, es geht also nicht ausschließlich darum, ein besseres, weil verstehbareres Experimentieren zu ermöglichen. Insofern kommen bei diesen Ansätzen auch andere Aspekte zum Tragen, so sollen etwa histori-

sche Experimente dazu dienen, Physik als kulturelle, zeitgebundene Tätigkeit erfahrbar zu machen. Dies gelingt beispielsweise, wenn die in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts entstandenen elektrischen Unterhaltungsexperimente eingesetzt und in ihrem historischen Kontext thematisiert werden [7, 8]. Vergleichbares lässt sich auch auf einer anderen Ebene ansprechen, so beobachtete etwa Barth bei der Durchführung historisch-genetisch konzipierter Einheiten „eine lernfördernde *emotionale* Komponente: Häufig wird es einfach als ‚angenehm‘ empfunden, etwas über die *Herkunft* von Wissen zu erfahren bzw. einen Forscher als *Person* wahrzunehmen“ [9].

Und schließlich lassen sich mit derartigen Experimenten wissenschaftspropädeutische Ziele verfolgen, dies ist sicherlich einer der durch FachdidaktikerInnen zentral diskutierten Aspekte. So verweist etwa Lind darauf: „Unter Fachdidaktikern scheint ein weitgehender Konsens darüber zu bestehen, daß der wichtigste Anwendungsbereich der Physikgeschichte im Unterricht in der wissenschaftstheoretischen Vertiefung der Physik liegt“ [6]. Diese Zielrichtung liegt auch dem von mir hier diskutierten Unterrichtsvorschlag zugrunde.

2. Der historische Rahmen der Fallstudie

Der französische Militäringenieur Charles Augustin Coulomb (1736-1806) ist heute vor allem durch seine Arbeiten zur Elektrostatik bekannt, die er ab 1785 in der Pariser Akademie der Wissenschaften vorstellte. Die Funktion des zentralen Instruments in diesen Untersuchungen – die Torsionswaage – basiert auf der Bestimmung kleiner mechanischer Kräfte durch den Winkel der Verdrillung eines dünnen Metallfadens. Die Torsion nutzte Coulomb erstmals bei einem von ihm entwickelten Kompass, dessen Magnetnadel an einem Seidenfaden aufgehängt war und mit dem er 1779 eine Preisaufgabe der Pariser Akademie der Wissenschaften gewann. 1782 begann er, den Leiter des Pariser Observatoriums Jean Dominique Cassini (1748-1845) bei dessen Experimenten zur Untersuchung der täglichen Veränderung des Erdmagnetfeldes zu unterstützen. Cassini verwendete einen Kompass nach Coulombs Entwurf, das Gerät erwies sich in der Praxis aber als sehr störanfällig. Schließlich ersetzte Coulomb den Seiden- durch einen Metallfaden. Für diesen hatte er aber bisher nicht die Torsionskraft näher untersucht. Die entsprechende Untersuchung legte er 1784 in der öffentlichen Sitzung der Akademie vor, am Ende der publizierten Version verwies er dann auch bereits auf die elektrische Drehwaage [10].

In seiner Abhandlung zur Torsion von Metallfäden [11] setzte Coulomb voraus, dass – innerhalb gewisser Grenzen – die Torsionskraft proportional dem Winkel der Torsion sei. Unter dieser Annahme demonstrierte er, dass die Torsionskraft umgekehrt proportional zur Länge sowie proportional zur vierten Potenz des Durchmessers ist¹. Außerdem zeigte er, dass die Torsionskraft vom Material des Metallfadens abhängt. In einem zweiten Teil der Abhandlung beschrieb er eine erste Anwendung – die Untersuchung der Reibung eines Zylinders in Wasser – und in einem dritten die Dämpfung der Torsionsschwingung. Insbesondere auf diesen letzten Teil seiner Untersuchungen werde ich mich im Folgenden konzentrieren. Zuvor seien aber kurz das von Coulomb beschriebene Gerät und die damit ausgeführten Messungen der ersten beiden Teile seiner Abhandlung skizziert.

3. Coulombs Arbeiten

Das Konzept von Coulombs Messungen besteht in der Analyse von Torsionsschwingungen. Dabei zeigte er zunächst aus theoretischen Überlegungen, wie die Torsionskraft vom Winkel der Torsion, der Drahtlänge, des Drahtdurchmessers sowie der angehängten Masse abhängen sollte. Anschließend versuchte er, diese Gesetzmäßigkeiten experimentell zu

¹ In einer früheren Arbeit war Coulomb noch zu dem Ergebnis gekommen, dass die Torsionskraft von Haaren proportional zur dritten Potenz des Durchmessers sei, dies korrigierte er in dieser Abhandlung.

demonstrieren. Für diese Experimente beschrieb Coulomb nachfolgende Apparatur (vgl. Abb. 1):

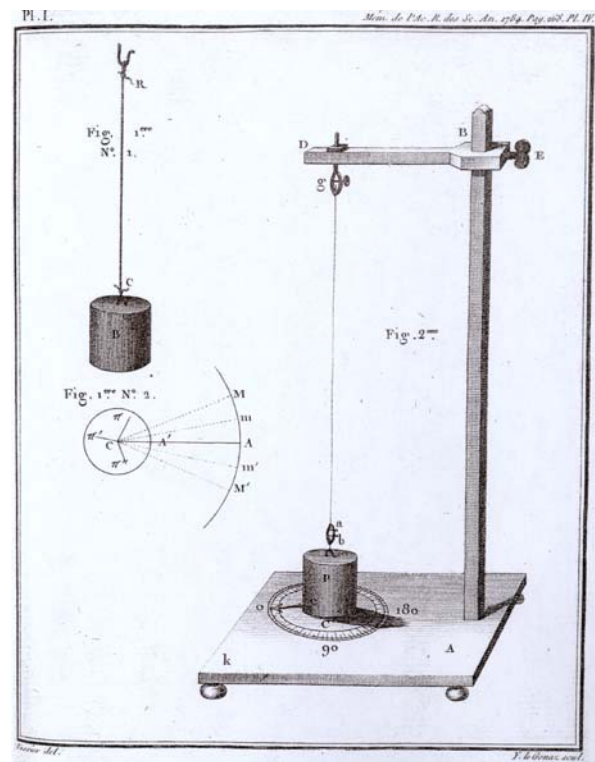


Abb. 1: Coulombs Aufbau zur Untersuchung des Torsionsverhaltens von Metallfäden. Aus: [11], mit freundlicher Genehmigung der Landesbibliothek Oldenburg

Der zu untersuchende Faden wird mit seinem oberen Ende in einer Metallklammer eingeklemmt. Diese hängt an einer Traverse, die höhenverstellbar an einem festen Holzstab befestigt ist. Das untere Ende des Fadens wird ebenfalls mit einer Klammer an einem Bleizylinder befestigt; die hierfür erforderliche Klammer ist fest in der Drehachse des Zylinders eingesetzt. An der Unterseite des Bleizylinders ist ein sehr leichter Messingzeiger angeklebt. Auf einem Holzbrett unterhalb des Zylinders ist eine Skala so platziert, dass ihr Mittelpunkt in der Verlängerung der Drehachse liegt. Coulomb verwendete zwei verschiedene Bleizylinder, deren Massen umgerechnet 245g bzw. 979g betragen. In seiner Abhandlung gab er Messwerte für Fäden an, die aus Eisen sowie aus Messing bestanden. Diese Fäden charakterisierte er sowohl durch die Masse einer bestimmten Länge wie auch durch die Masse, die die Fäden vor dem Zerreißen tragen konnten. Bei diesen Fäden hat es sich wohl um Saiten eines Musikinstruments (vermutlich eines Cembalos, vgl. [12]) gehandelt. Coulombs Messungen mit dieser Apparatur sehen folgendermaßen aus: Zu Beginn des Experiments wird der Zylinder um seine Drehachse ausgelenkt und dann losgelassen. Anschließend bestimmte Coulomb die Zeit für eine definierte Anzahl von Schwingungen (zwanzig). Für die Auswertung ver-

glich er dann Messungen, bei denen ein Parameter verändert worden war. So ergab sich beispielsweise, dass aus einer Vervielfachung der angehängten Masse annähernd eine Verdoppelung der Periode resultierte. Daneben war die Schwingungsperiode proportional zur Wurzel der Länge des Fadens sowie umgekehrt proportional zum Quadrat des Durchmessers des Fadens.

4. Nachbau des Geräts und Nachvollzug der Experimente

Im Rahmen einer Hausarbeit [13] wurde das von Coulomb beschriebene Gerät nachgebaut und ausgewählte der von ihm dargestellten Experimente nachvollzogen.

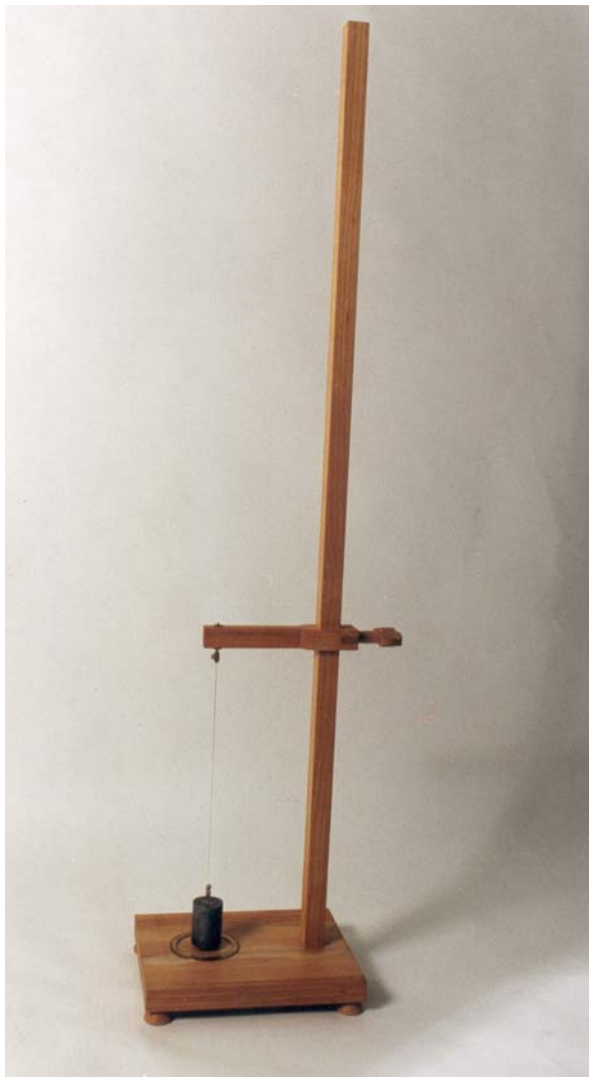


Abb. 2: Nachbau von Coulombs Aufbau zur Untersuchung des Torsionsverhaltens von Metallfäden. Foto W. Golletz

Dabei zeigt sich, dass insbesondere die Befestigung des Fadens mittels der Klammern problematisch war. Ursächlich hierfür war u.a., dass der Faden sehr leicht in ihnen rutschte; dies ließ sich durch eine Veränderung der Ruhelage des Zeigers am Ende des

Experiments feststellen. Trotz einer Reihe von konstruktiven Veränderungen der Klammern blieb dieses Problem bis zuletzt eine der potentiellen Fehlerquellen. Hiervon abgesehen ist der Nachbau eher unproblematisch, mit den Experimenten sieht dies etwas anders aus:

Hier zeigte sich zunächst einmal, dass bestimmte Fähigkeiten zu entwickeln sind: So wird der Zylinder mit den Fingern verdreht und dann losgelassen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Drehachse keine seitliche Auslenkung erfährt. Allerdings, und dies relativiert diese Aussage, sind die Torsions- und die Pendelschwingung zumindest bei kleinen Amplituden voneinander unabhängig. Dennoch ist es wesentlich für den experimentellen Erfolg, dass eine entsprechende Auslenkung mit dem erworbenen – hier im Wortsinn – Fingerspitzengefühl bewerkstelligt wird. Daneben ist es erforderlich, sich vorsichtig im Raum zu bewegen und möglichst flach zu atmen, da bereits ein Luftzug zu einer Störung führen könnte. Als weitere wesentliche Fehlerquelle hat sich die Positionierung des Skalenringes unterhalb des Zylinders herausgestellt. Da dieser in dem beschriebenen Aufbau nur auf die Grundplatte aufgelegt wird, kann sein Mittelpunkt leicht ein wenig von der Drehachse abweichen, was aber bereits zu einem nicht zu vernachlässigenden Fehler führen würde.

5. Didaktische motivierte Umsetzung der Experimente

Derartige Experimente lassen sich grundsätzlich auch im Rahmen des Unterrichts der Sekundarstufe II durchführen. Schwingungen sind hier eines der zentralen Themen, Torsionsschwingungen kommen aber in den mir bekannten Unterrichtskonzeptionen nicht vor. Stattdessen werden harmonische mechanische Schwingungen – in der Regel am Faden sowie am Federpendel – diskutiert; teilweise erfolgt noch ein Transfer zu schwingenden Wassersäulen in einem U-Rohr (vgl. [14], [15], [16])². Insofern bietet die Behandlung der Torsionsschwingung hier eine weitere Möglichkeit zur Diskussion harmonischer mechanischer Schwingungen. Dies kann selbstverständlich – auch mit der hier beschriebenen Apparatur – rein fachsystematisch und damit völlig ahistorisch geschehen. Dabei könnte sich die Diskussion der Torsionsschwingung insbesondere als Erweiterung der Federschwingung anbieten, da die Analogie zwischen elastischer Verformung nach dem Hooke'schen Gesetz und der elastischen Torsion offensichtlich ist (vgl. [18]).

Ein historischer Ansatz erscheint im Hinblick auf den Einsatz dieses Experiments allerdings reizvoller, da hiermit weitere Aspekte thematisiert werden

² Lediglich in [17] wird im Rahmen des Einschubs 'Physik und Umwelt' auf Drehschwingungen im Zusammenhang mit dem Zittern von Espenlaub verwiesen.

können. Allerdings stellt sich die Frage, in welcher Form dies geschehen kann: Denkbar erscheint natürlich, dass die SchülerInnen gerade im Umgang mit der Apparatur die Schwierigkeiten der experimentellen Demonstration einer vermeintlich einfachen Gesetzmäßigkeit, die sich aus Analogieüberlegungen als plausibel erweist, erfahren. Dies kann beispielsweise geschehen, indem als Einstieg eine Zusammenfassung der Abhandlung Coulombs gewählt wird und dann die Apparatur funktional nachgebaut werden soll. Selbst wenn nicht – wie in dem diesem Beitrag zugrunde liegenden Forschungsvorhaben – die Quellentreue als wesentliches Kriterium des Nachbaues verwendet wird, erscheinen Schwierigkeiten und Rückschläge nahezu unvermeidlich.

Es stellt sich aber die Frage, ob ein derartig ausführliches und exemplarisches Vorgehen die einzige Möglichkeit zu einem historischen Einsatz dieses Experiments bildet. Bedenkenswert erscheint mir hierbei insbesondere die Frage, welchen Stellenwert das Stabilisieren der Apparatur (das sich mit dem Schlagwort ‚debugging‘ beschreiben lässt) für den Kompetenzerwerb der SchülerInnen einnehmen soll. Als ein Vorteil erscheint in dieser Hinsicht allerdings, dass für die Fehlersuche und das Stabilisieren keine Fähigkeiten erforderlich sind, die nicht bei SchülerInnen der Sekundarstufe II zu erwarten wären. Mehr noch – das Gerät selber ist in gewisser Hinsicht ‚transparent‘, d.h. es können von den SchülerInnen verschiedene Möglichkeiten entwickelt werden, wie aufgetretene Fehler vermieden werden können.

Allerdings muss das Interesse bei einem Einsatz dieses Experiments in seinem historischen Kontext nicht darin bestehen, alle die hier angedeuteten experimentellen Schwierigkeiten für die SchülerInnen erfahrbar zu machen. Hier kann ein eher pragmatisches Vorgehen hilfreich sein: So würde es sich beispielsweise anbieten, die Fäden nicht zu klammern, sondern zu löten und hierdurch die Gefahr des Durchrutschens auszuschließen. Daneben lässt sich auch die Skala – die beispielsweise ausgedruckt sein kann – fest mit dem Aufbau verbinden und wäre hierdurch bereits im Vorfeld justiert. Mit derartigen Vorsichtsmaßnahmen können entsprechende Experimente ohne größere technische Probleme durch die SchülerInnen in der Sekundarstufe II durchgeführt werden.

Wenn diese Experimente einerseits so pragmatisch durchgeführt, gleichzeitig aber historisch eingebettet werden sollen, dann stellt sich selbstverständlich die Frage, welcher Erkenntnisgewinn oder Kompetenzerwerb von diesem Experiment ausgehen würde. Hierzu sollen im folgenden einige Anregungen erfolgen, dabei ist aber zunächst eine etwas detailliertere Diskussion der Analyse der Experimente Coulombs zur Dämpfung der Schwingung erforderlich.

6. Die Experimente zur Dämpfung

Während die Experimente zur Bestimmung des Torsionsgesetzes und zur Beschreibung der Torsionsschwingung eher eine Erweiterung der Inhalte des üblichen Physikunterrichts bilden können, erscheint die Beschäftigung mit Coulombs Experimenten zur Untersuchung der Dämpfung der Torsionsschwingung sehr viel interessanter für einen wissenschaftspropädeutisch orientierten Unterricht. Hier bestimmte Coulomb jeweils die Anzahl der Schwingungen, die für eine Abnahme der Amplitude um 10° erforderlich waren. Da die Periode der Schwingung unabhängig von der Amplitude ist, bildet die Anzahl der Schwingungen auch ein Maß für die hierfür erforderliche Zeit. In seiner Abhandlung veröffentlichte Coulomb u.a. folgende Ergebnisse (die angegebenen Nummern dienen zur Identifizierung der Drähte):

Draht	Ursprüngliche Amplitude in $^\circ$	Zeit für die Dämpfung der Amplitude um 10° in Schwingungen
Eisen No.1	90	3,5
	45	10,5
	22,5	23
	11,25	46
Eisen No. 7	180	3,5
	90	12
	45	27
	22,5	54
Eisen No. 12	360	1
	180	2
	90	5
	45	11
	22,5	25

Aus diesen Ergebnissen zog Coulomb die Schlussfolgerung, dass die (zeitliche) Abnahme der Amplitude proportional zur Amplitude sei. Dies gelte insbesondere für kleine Amplituden (vgl. [11], S. 257). In ersten Experimenten, die im Rahmen der Analyse von Coulombs Arbeit entsprechend seiner Beschreibung durchgeführt worden waren, gelang es nicht, sinnvolle Ergebnisse zu produzieren. Die Ergebnisse waren vielmehr so, dass sich keine einfache Gesetzmäßigkeit zu ergeben schien. Dies war insbesondere deshalb verwunderlich, da zuvor im Nachvollzug der ersten Experimente Ergebnisse erhalten

werden konnten, die den von Coulomb publizierten entsprachen und die auch nach der heutigen Theorie zu erwarten waren. Daher konnte davon ausgegangen werden, dass die Apparatur fehlerfrei funktioniert und somit auch Werte erhalten werden sollten, die theoriekonsistent wären und damit auch Coulombs Ergebnissen entsprechen würden.

Im Rahmen der Analyse des Experiments wurde zur Überprüfung der Apparatur das experimentelle Vorgehen dahingehend geändert, dass nicht mehr die Anzahl der Schwingungen bestimmt wurde, die zu einem Reduzieren der Amplitude um 10° erforderlich war. Stattdessen wurde jede Amplitude (eigentlich jede zweite, da nur die Auslenkung zu einer Seite abgelesen werden konnte) bestimmt. Aus diesen Werten ergab sich sehr eindeutig, dass die Amplitude der jeweiligen Schwingung exponentiell abnahm (vgl. die grafische Auftragung der Messwerte in Abb. 3). Damit genügt die Dämpfung der Schwingung folgender, auch aus heutiger Sicht zu erwartender Gleichung:

$$A(t) = A_0 e^{-kt} \quad (1).$$

Die anfängliche Schwierigkeit, eine sinnvolle physikalische Beschreibung der Dämpfung der Schwingung experimentell zu ermitteln, hatte ihren Ur-

sprung also nicht etwa in der verwendeten Apparatur, sondern in der Form der Durchführung des Experiments. Bei einer näheren Analyse der Messung wurde auch deutlich, warum es mit der von Coulomb angegebenen Methode nicht gelang, ein korrektes Ergebnis zu erhalten: So gab es bei einer Messreihe zunächst drei Messwerte mit einer Amplitude von 30° . Nach 25 Schwingungen wurde fünfmal eine Amplitude von 20° abgelesen. Damit liegt die Anzahl von Schwingungen, die für eine Amplitudenabnahme von 10° erforderlich ist, zwischen 26 und 32. Innerhalb dieses Bereichs ist es auf Grund der Messwerte nicht möglich zu entscheiden, welcher der tatsächlich zu verwendende Wert ist.

An dieser Stelle soll die weitergehende Analyse der Coulombschen Arbeit nur im Hinblick auf die mathematischen Aspekte kurz skizziert werden. Coulombs Formulierung seines Ergebnisses steht zwar in Übereinstimmung mit der heutigen Lehrbuchdarstellung, also der mathematischen Beschreibung der Dämpfung durch eine Exponentialfunktion. Diese von ihm gewählte Formulierung ist jedoch mehrdeutig, er gab an, dass die Amplitudenabnahme von der Amplitude selbst abhängt.

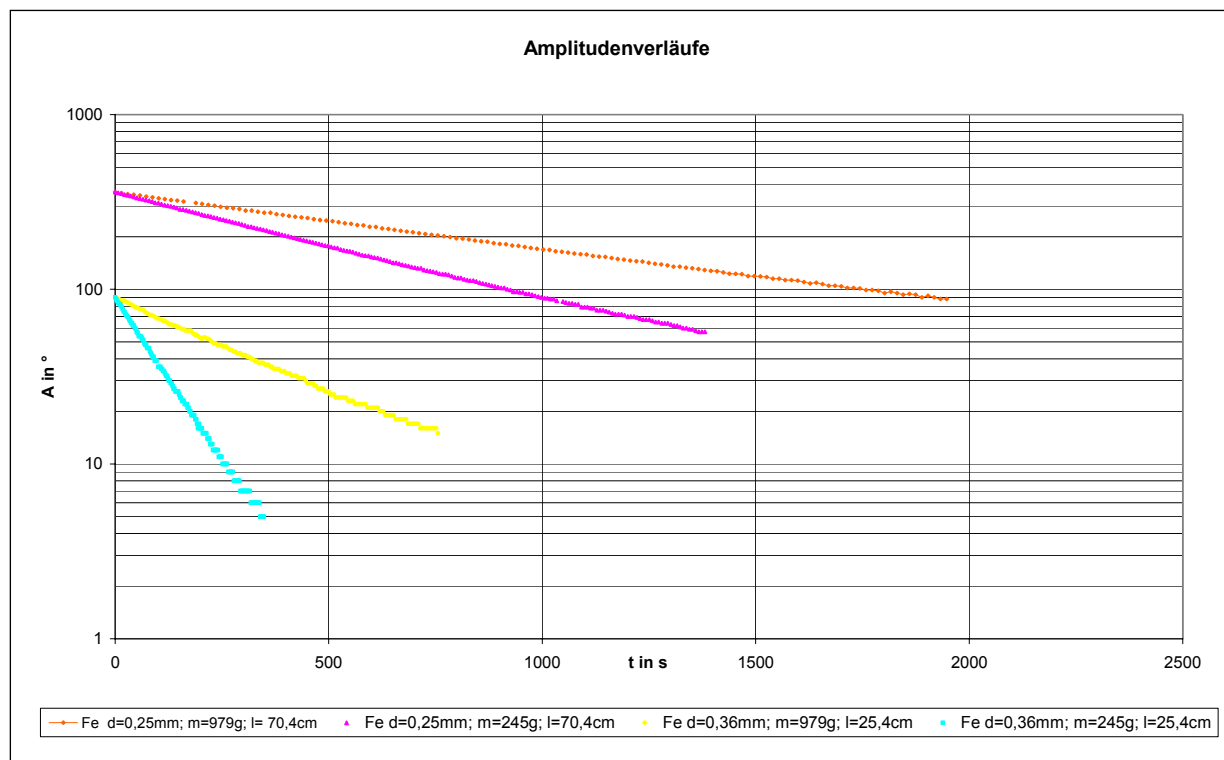


Abb. 3: Diagramm mit Messwerten zur Bestimmung der Dämpfung bei verschiedenen Drähten und angehängten Massen

Als Relation lässt sich seine Aussage wie folgt formulieren

$$\frac{\Delta A}{N} \sim \frac{\Delta A}{t} \sim A_0 \quad (2),$$

wobei ΔA die Amplitudenänderung nach N Schwingungen bzw. der Zeit t ist und A_0 die Anfangsamplitude.

Durch Einführung einer Konstanten k lässt sich dies zu einer Gleichung formulieren, die die Amplitudenänderung um 10° beschreibt:

$$\frac{\Delta A}{t} = kA_0 \quad (3).$$

Unter Verwendung der Amplitude $A(t)$ lässt sich diese Gleichung auch schreiben als

$$\frac{A_0 - A(t)}{t} = kA_0 \quad (4).$$

Durch Umformen ergibt sich hieraus als Beschreibung der gedämpften Schwingung:

$$A(t) = A_0(1 - kt) \quad (5).$$

Da nach dieser Gleichung die Schwingung unabhängig von der Amplitude nach der Zeit $t_k = 1/k$ beendet wäre, ist diese Beschreibung natürlich physikalisch unsinnig. Das Problem ist, dass Gleichung (3) darauf basiert, dass die Änderung der Amplitude um einen konstanten Wert erfolgt (10° , was bei Coulombs Experimenten auch der Fall ist). Wenn eine kontinuierliche Änderung der Amplitude beschrieben werden soll, dann muss dies durch eine Differentialgleichung erfolgen:

$$\frac{1}{A} dA = -k dt \quad (6).$$

Hieraus ergibt sich als Lösung die bereits oben angeführte Gleichung (1)

$$A(t) = A_0 e^{-kt},$$

also gerade die Gleichung, die auch das experimentelle Verhalten der Schwingung beschreibt.

Die hier skizzierte Diskussion wäre wohl bestenfalls relevant, wenn deren Zielsetzung darin bestehen würde, die Bedeutung mathematisch eindeutiger Aussagen zu illustrieren. Es gibt allerdings ein Detail, das diese Diskussion nicht nur relevant, sondern sogar notwendig macht: Coulomb gab in seiner Abhandlung an, dass insbesondere die Werte aus dem Experiment mit dem Eisendraht No. 1 sehr gut mit der von ihm bestimmten Gesetzmäßigkeit übereinstimmen. Diese Werte bestätigen aber gerade die durch (5) beschriebene Gesetzmäßigkeit, während sie mit (1) nicht vereinbar sind.

An dieser Stelle soll keine weitergehende historische Diskussion geführt werden (für eine detaillierte Analyse dieser Fallstudie siehe [19]). Allerdings sei die Anmerkung gemacht, dass gerade die von Cou-

lomb verwendete Messmethode – und hierbei das Beschränken auf Einzelmessungen – ambivalente Messungen ermöglicht. Damit ist gemeint, dass durch die Messmethode Werte erzeugt werden können, die letztlich durch die theoretischen Erwartungen bestimmt waren. Um experimentell die Dämpfung einer Schwingung korrekt zu bestimmen muss also bei der vorgegebenen Versuchsdurchführung die Dämpfung bereits aus theoretischen Überlegungen bekannt sein und wird lediglich experimentell überprüft. Wenn aus theoretischen Überlegungen eine bestimmte Anzahl von Schwingungen für eine Amplitudenreduktion um 10° abgeleitet werden kann, dann ist es durch die Anzahl identischer Messwerte, die dieses Kriterium erfüllen, möglich, unterschiedliche Theorien (vermeintlich) empirisch zu bestätigen. Insofern kann dieser Aspekt der Fallstudie als Illustration eines Fehlers dienen, der durch Allchin als „observer perceptual bias“ [20] klassifiziert worden ist.

7. Didaktisches Potential der Experimente zur Dämpfung

Ebenso wie die bereits diskutierten Experimente zur Analyse der Torsionsschwingung lassen sich auch die Experimente zur Analyse der Dämpfung apparativ unproblematisch realisieren. Auch sie können grundsätzlich ohne größere Probleme durchgeführt werden, allerdings scheint mir eine andere Motivation den Einsatz dieses Experiments zu legitimieren: Dabei geht es weniger darum, dass die SchülerInnen physikalisches Wissen erwerben. Vielmehr bietet die Diskussion – gerade durch den Einbezug der historischen Aspekte – die Möglichkeit, dass die SchülerInnen Wissen über die Physik und ihre Arbeitsweisen erwerben können. Insofern lässt sich gerade das Experiment zur Untersuchung der Dämpfung der Torsionsschwingungen in einem wissenschaftspropädeutisch angelegten Unterricht einsetzen. Wesentlich hierfür ist zunächst einmal, dass der Erfolg des Experiments nicht ausschließlich durch ein sachgerechtes Bedienen der Messapparatur erzielt werden kann, sondern dass ein entsprechendes Konzept von ‚Messung‘ erforderlich ist. Hier ist das in der historischen Situation von Coulomb vertretene Konzept problematisch: Bei Coulomb war es gerade die sorgfältig ausgeführte Einzelmessung – idealerweise mit einer sehr empfindlichen Apparatur – die den ‚wahren Wert‘ produzierte³. Das modernere Konzept, nach dem jede Messung prinzipiell fehlerbehaftet ist, entwickelte sich erst im 19. Jahrhundert. Insofern lässt sich gerade durch den Einbezug der Diskussion der Arbeiten Coulombs an diesem Bei-

³ Coulombs experimentelle Vorgehensweise kann dabei aus historischer Sicht durchaus als adäquat bezeichnet werden, da er sich entsprechend den Standards der Pariser Akademie der Wissenschaften verhielt, vgl. [21].

spiel aufzeigen, dass die Kriterien der naturwissenschaftlichen Wissensproduktion nicht unveränderlich sind, sondern sich historisch entwickelt haben und damit auch keineswegs statisch sind. Eine derartige Diskussion erscheint aber auch gerade deshalb wünschenswert, da quantitative Schulversuche sich in der Regel auf die Bestimmung weniger Werte beschränken, aus denen dann die Gesetzmäßigkeit abgeleitet wird. Insofern können die SchülerInnen an diesem Experiment erfahren, dass dieses Verfahren durchaus fragwürdig ist und auch zu fehlerhaften Aussagen führen kann.

Daneben wird aber an diesem Beispiel deutlich, dass eine Messung und deren Ergebnis gerade auch durch theoretische Vorstellungen beeinflusst werden kann und insofern keineswegs theoriefrei sind. Das ‚naive Bild‘ der naturwissenschaftlichen Wissenschaftsproduktion, die rein empirisch geschieht, wird hier also gleich in zweierlei Weise gebrochen: Einerseits wird deutlich, dass Coulomb ein theoretisches physikalisches Konzept besaß und dieses lediglich empirisch bestätigte. Andererseits wird aber ebenfalls deutlich, dass auch das Experimentieren selbst eine Form der Auseinandersetzung mit der Natur ist, die selbst wiederum theoretisch fundiert ist. Insofern wird auch deutlich, dass der ‚naive Empirismus‘ in doppelter Hinsicht fragwürdig ist: es ist weder eine adäquate Art der Beschreibung wissenschaftlicher Tätigkeit noch ist das in dieser Darstellung vermittelte Bild eines Experiments realistisch. Damit kann die Auseinandersetzung mit den Coulombschen Experimenten – gerade vor dem Hintergrund eigener experimenteller Erfahrungen der SchülerInnen – dazu beitragen, ein differenzierteres Bild der Physik zu entwickeln. Die Bedeutung derartiger Aspekte für einen zeitgemäßen Physikunterricht ist gerade in jüngeren Arbeiten hervorgehoben worden (siehe insbesondere [22] sowie [23]).

Ich bin Harald Bock für sein unabhängiges Experimentieren zu großem Dank verpflichtet; daneben gilt mein Dank zwei anonymen GutachterInnen, die mir eine Reihe von Verbesserungsmöglichkeiten an der ersten Version dieses Beitrags aufgezeigt haben.

8. Literatur

- [1] Rieß, F.: Teaching Science and the History of Science by Redoing Historical Experiments. In: Finley, F.; Allchin, D.; Rhees, D.; Fifield, S. (Hrsg.): Proceedings of the Third International History, Philosophy, and Science Teaching Conference, Minneapolis: University of Minnesota, 1995, Band 2, 958-966.
- [2] Achilles, M.: Historische Versuche der Physik: Funktionsfähig nachgebaut. 2. Aufl., Frankfurt/Main: Wötzel, 1996.
- [3] Wilke, H.-J.: Historische physikalische Versuche. Köln: Aulis Verlag Deubner, 1987.
- [4] Teichmann, J.: Das historische Experiment im Physikunterricht - wissenschaftstheoretische Betrachtungen und praktische Bedeutung. In: Ewers, M. (Hrsg.): Wissenschaftsgeschichte und naturwissenschaftlicher Unterricht. Bad Salzdetfurth: Barbara Franzbecker, 1978, S. 185 – 212.
- [5] Habben, D.; Mehrle, U.: Vom Bernstein zur Volta-Säule : Geschichte der Elektrizität im Unterricht. Marburg: Redaktions-Gemeinschaft Soznat, 1994.
- [6] Lind, G.: Physik im Lehrbuch 1700 - 1850: Zur Geschichte der Physik und ihrer Didaktik in Deutschland. Berlin u.a.: Springer, 1992.
- [7] Heering, P.: Getting Shocks: Teaching Secondary School Physics through History. In: Science and Education 9 (2000) S. 363-373.
- [8] Olberding, I.: Elektrostatistische Unterhaltungsexperimente im 18. Jahrhundert. Experimentelle Analyse und didaktische Betrachtung. Schriftliche Hausarbeit, Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg, 2006.
- [9] Barth, M.: Brechungsgesetz/Lichtmodell: Ein historischer Zugang. In: PdN-Ph 8/41 (1992) S. 18-34.
- [10] Gillmor, C.S.: Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in Eighteenth-Century France. Princeton University Press: Princeton, New Jersey, 1971.
- [11] Coulomb, C.A.: Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion, et sur l'élasticité des fils de métal. In: Memoires de l'Academie Royale des Sciences pour l'année 1784, Paris 1787, 229 - 269.
- [12] Goodway, M.; Savage, W.R.: Coulomb's Data on Harpsichord Wire. In: MRS Bulletin, Januar 1992, 24-27.
- [13] Bock, H.: Coulombs Untersuchung des Torsionsverhaltens von Metallfäden: Experimentelle Replikation und physikalische Interpretation. Schriftliche Hausarbeit, Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg, 2000.
- [14] Bayer, R.; Bredthauer, W.; Bruns, K.G.; Klar, G.; Lichtfeldt, M.; Schmidt, M.; Wessels, P.: Impulse Physik 2, Klasse 12-13, 1. Aufl. Stuttgart, Klett 1997.
- [15] Grehn, J. (Hrsg.): Metzler Physik. 2. Aufl. Stuttgart, Metzlersche Verlagsbuchhandlung, 1995.
- [16] Wilke, H.-J. (Hrsg.): Physikalische Schulexperimente. Band 1 & 3, Berlin, Volk und Wissen: 1997 & 2002.
- [17] Boysen, G.; Heise, H.; Lichtenberger, J.; Schepers, H.; Schlichting, H.-J.: Physik Oberstufe Gesamtband. Berlin: Cornelsen, 1999.

[18] Götz, R.; Dahncke, H.; Langensiepen, F.: Handbuch des Physikunterrichts Sekundarbereich I. Band 1 (Mechanik 1), Köln: Aulis Verlag Deubner, 1990.

[19] Heering, P.: Regular twists: Redoing Coulomb's experiments on the torsion of metal wires. In: Physics in Perspective 8 (2006), 52 - 63.

[20] Allchin, Douglas: Error Types. In: Perspectives on Science 9,1 (2001), 38-58.

[21] Heering, Peter: Das Grundgesetz der Elektrostatik: Experimentelle Replikation, wissenschaftshistorische Analyse und didaktische Konsequenzen. Oldenburg: Dissertation, 1995.

[22] Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen: Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen. Berlin: Logos, 2001.

[23] Labudde, Peter: Fächer übergreifender Unterricht in und mit Physik: eine zu wenig genutzte Chance. In: PhyDid 1/2 (2003) S. 48-66.