

Die Kraft zwischen zwei punktförmigen elektrischen Ladungen nimmt quadratisch mit wachsendem Abstand r ab, sie ist proportional zu $1/r^2$. Dieses nach *Charles Augustin Coulomb* benannte Gesetz ist eine der experimentellen Grundlagen der Elektrizitätslehre. In der Schulphysik ist die Demonstration von $1/r^2$ eine Pflichtübung für den Lehrer – ein Experiment, das auch hart gesottene Physiklehrer zur Verzweiflung treiben kann. Warum?

Zunächst ist festzustellen: Die indirekte Bestätigung von $1/r^2$, das heißt die Feldfreiheit im Innern einer geladenen Hohlkugel¹, ist didaktisch aufwändig und vielleicht auch wenig überzeugend. Man kommt also nicht umhin, die Entfernungsabhängigkeit der Kraft direkt zu messen.

Gemessen wird in der Regel die Kraft zwischen zwei geladenen Metallkugeln – nicht zwischen Punktladungen, wie es im Idealfall richtig wäre. Die Kraft ist klein (von der Größenordnung mN), deshalb misst man sie mit einer empfindlichen (Torsions-)Drehwaage². Aus dem gleichen Grund bemüht man sich, möglichst viel Ladung auf den Kugeln aufzubringen. Kugeln mit großem Radius wären daher angebracht. Die aber erfordern Korrekturen wegen der Ladungsverschiebungen infolge der abstoßenden Kraft zwischen gleichnamigen Ladungen: Ein Bruchteil der Ladung einer Kugel wird auf die von der jeweils anderen Kugel abgewandten Seite zurückgedrängt. Der Kompromiss besteht darin, eine große und eine kleine Kugel (mit Radien $R_1 = 6$ cm bzw. $R_2 = 2$ cm) zu benutzen. In diesem Fall ist jedoch die Abschätzung des Korrekturfaktors aufwändig³. Mit Blick auf die Praxis ist diese Variante trotzdem sinnvoll. Denn nach meiner Erfahrung sind die durch Messanordnung und -verfahren bedingten Fehler mindestens so groß wie die erwähnten Korrekturen. Zum Beispiel bleiben die Ladungen auf den Kugeln nur bei trockener Luft über längere Zeit erhalten – ein klarer, kalter Wintertag ist da von Vorteil. Trotzdem geht, auch bei zügiger Messung, Ladung im Verlauf einer Messreihe verloren. Außerdem ist die Justierung der Drehwaage kritisch. In der Hektik des Unterrichts ist es nicht leicht, die genaue Nullposition des Torsionsarms zu bestimmen. Die Schwingungsamplitude des Torsionspendels klingt erst nach einigen Sekunden auf Werte ab, aus denen man erkennen kann, ob die Maximalausschläge nach links und rechts gleich groß sind. Da die Nulllage während einer Messreihe dauernd überprüft werden muss, zieht sich diese in die Länge. Damit wächst die Gefahr von Ladungsverlusten.

Die Korrekturen wegen der ausgedehnten Ladungsverteilung auf den Kugeloberflächen gehen in erster Näherung mit der dritten Potenz des Quotienten aus Kugelradius R und Abstand r der Kugeln². Deshalb sollte man bei möglichst großen Abständen messen. Dort aber ist die Kraft nicht mehr ablesbar. Grob abgeschätzt, streuen die Werte innerhalb eines Intervalls von $\pm 0,1$ mN. Auch hier muss ein Kompromiss gefunden werden: In den vorliegenden Experimenten war der Abstand r mindestens 13 cm. Für die große Kugel ($R = 6$ cm) bedeutete das $(R/r)^3 < 0,1$. Andererseits war die Kraft selbst in günstigen Fällen nur bis zu Abständen von etwa 32 cm größer als 0,2 mN. Der Bereich sinnvoller Werte von r ist daher eingeschränkt.

Um $1/r^2$ zu demonstrieren, trägt man die gemessenen Werte der Kraft F als Funktion von eben dieser Größe auf und zeigt, dass die Messpunkte auf einer Geraden durch den Nullpunkt liegen. Abbildung 1 ist ein Beispiel dafür, dass dies auch gelingen kann. Die nach der Methode der kleinsten Quadrate angepasste Gerade gibt den Verlauf der Punkte gut wieder. Das ist nicht immer der Fall: Zwar liegen die Messpunkte auf einer Geraden, diese geht aber nicht durch den Nullpunkt. Angesichts der genannten Fehlerquellen ist das nicht überraschend.

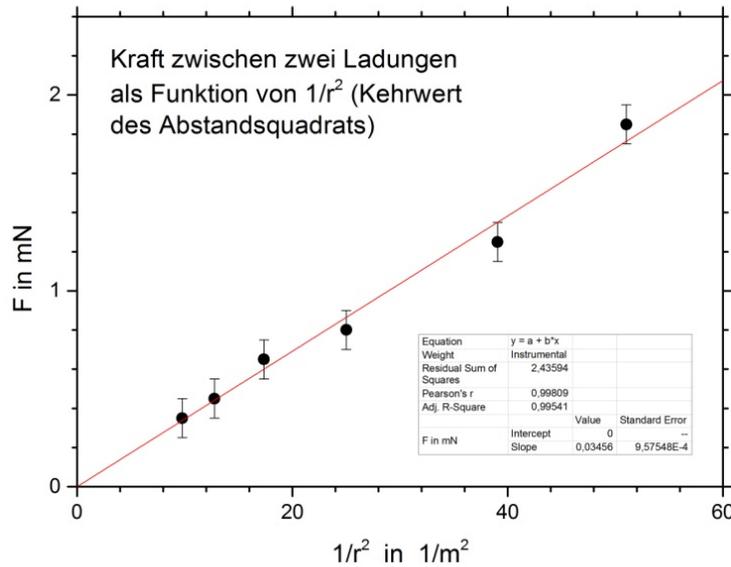


Abbildung 1 Coulombsches Gesetz. Elektrische Kraft zwischen zwei geladenen Kugeln als Funktion von $1/r^2$. Die Punkte liegen auf einer Geraden durch den Nullpunkt und bestätigen damit den $1/r^2$ -Verlauf der Coulombkraft.

Um sicher zu gehen, dass die Punkte in Abbildung 1 auch wirklich $1/r^2$ bestätigen, wurde an sie eine Funktion der Form $F = A r^n$ (mit A und n als Parameter) angepasst – nur der Parameter n ist hier von Interesse. Die Anpassung ergab $n = -2,06 \pm 0,15$, in guter Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert -2 . Abbildung 2 zeigt das Ergebnis dieser Anpassung – beachte, dass die Messpunkte doppelt-logarithmisch aufgetragen wurden.

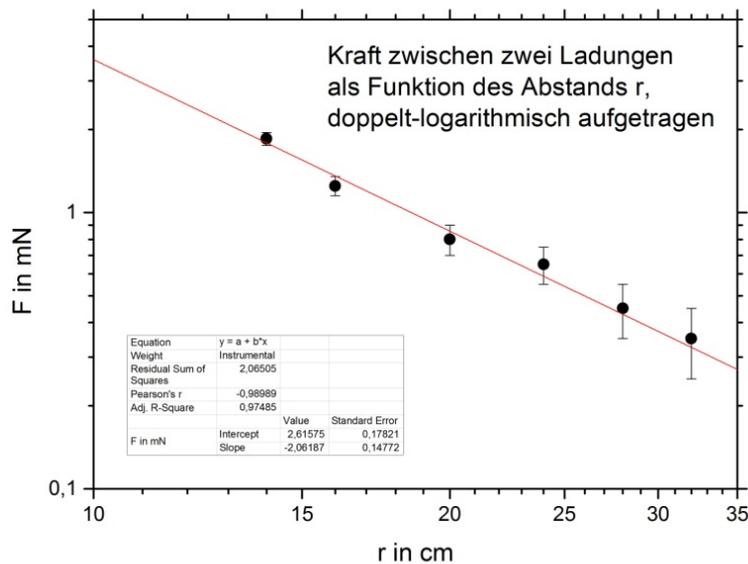


Abbildung 2 Coulombsches Gesetz. An die Messpunkte aus Abbildung 1 wurde eine Funktion $F = A \cdot r^n$ mit A und n als Parameter angepasst. Nur der Parameter n ist hier von Interesse. Die beste Anpassung ergibt $n = -2,06 \pm 0,15$. Beachte, dass die Punkte doppelt-logarithmisch aufgetragen sind.

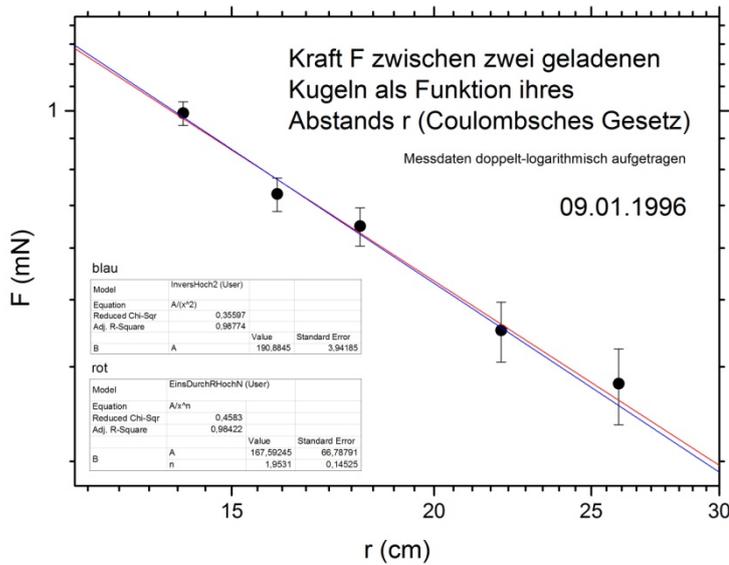


Abbildung 3 Coulombsches Gesetz: Kraft F zwischen zwei geladenen Kugeln als Funktion des Abstands r , doppelt-logarithmisch aufgetragen. Blau: Anpassung der Funktion $F = A/r^2$, rot: Anpassung eines Potenzgesetzes $F = A/r^n$, sie ergibt als Exponent $n = 1,95 \pm 0,15$.

Nicht immer kommt die Natur dem Physiklehrer so entgegen wie in dem gerade beschriebenen Experiment. Abbildungen 3 bis 5 liefern einen Einblick in das Alltagsgeschäft des Unterrichts. Aufgetragen ist, in doppelt-logarithmischem Maßstab wie in Abbildung 2, die Kraft F als Funktion von r , dazu jeweils zwei Geraden. Die rote Gerade entspricht der besten Anpassung eines Potenzgesetzes r^n mit n als Parameter, die blaue Gerade der eines $1/r^2$ -Gesetzes. Die deprimierende Erkenntnis ist, dass an Stelle von $n = -2$ Exponenten zwischen $-1,7$ und $-2,3$ gemessen werden.

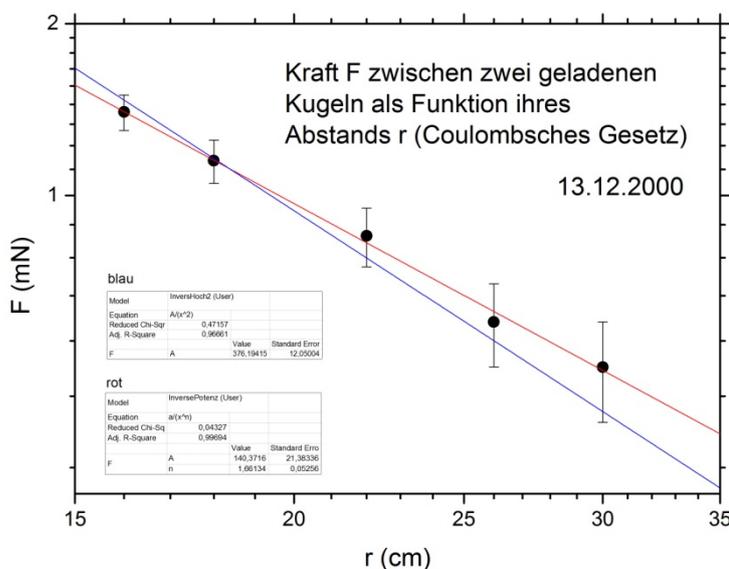


Abbildung 4 Coulombsches Gesetz: Kraft F zwischen zwei geladenen Kugeln als Funktion des Abstands r , doppelt-logarithmisch aufgetragen. Blau: Anpassung der Funktion $F = A/r^2$, rot: Anpassung eines Potenzgesetzes $F = A/r^n$, sie ergibt als Exponent $n = 1,7 \pm 0,1$.

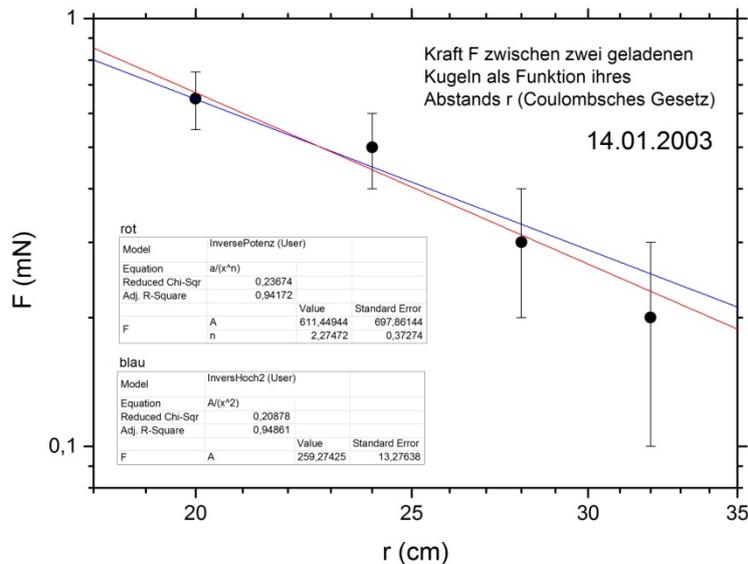


Abbildung 5 Coulombsches Gesetz: Kraft F zwischen zwei geladenen Kugeln als Funktion des Abstands r , doppelt-logarithmisch aufgetragen. Blau: Anpassung der Funktion $F = A/r^2$, rot: Anpassung eines Potenzgesetzes $F = A/r^n$, sie ergibt als Exponent $n = 2,3 \pm 0,4$.

Fazit: Es gibt in der Schulphysik Experimente, die in der Hektik des Unterrichts nicht funktionieren wollen. Sie zeigen genau das nicht, was vorgeführt werden soll – physikalische Messungen sind halt mit Fehlern behaftet. Damit muss der Lehrer leben. Eine Alternative wäre es, Schüler und Schülerinnen selber experimentieren lassen – und zwar an einer real existierenden Apparatur, nicht im virtuellen Labor am Bildschirm. Dann würden sie nicht nur den Exponenten von r messen, sondern auch lernen, dass physikalisches Experimentieren⁴ schwierig ist.

Zum Schluss der Hinweis, dass die Lehrmittelindustrie heutzutage Apparaturen⁵ zur Verfügung stellt, die vermutlich präzisere Messungen von $1/r^2$ erlauben.

Literatur und Anmerkungen

¹ Richard P. Feynman, Robert B. Leighton and Matthew Sands: *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Band II, Abschnitt 5–8. Reading MS, USA, 1963

² z. B. Phywe Torsionskraftmesser 0,01 N, Art. Nr. 02416-00

³ Josip Slisko und R. A. Brito-Orta: On approximate formulas for the electrostatic force between conducting spheres; *Am. J. Phys.* **66** (4), (1998), S. 352

⁴ Schülerexperimente konnte man früher mühelos in den Unterricht integrieren: Im Leistungskurs der Oberstufe standen sechs Wochenstunden zur Verfügung, es gab keine Hetze durch den Stoff – weil kein Zentralabitur. Eine Doppelstunde (2 der 6 Leistungskurs-Wochenstunden) war in meinem Unterricht für Schülerversuche reserviert. Die Schüler und Schülerinnen experimentierten in Zweiergruppen und lieferten mir die Versuchsprotokolle als Hausaufgabe ab. Dafür mussten Abstriche im Lehrstoff gemacht werden: Kein Problem, denn der Stoffplan ließ dem Lehrer bei der Unterrichtsgestaltung damals mehr Freiheit als heute.

⁵ z. B. Phywe, Artikel-Nr. P2420401 und P2420500; Leybold: *Bestätigung des Coulombschen Gesetzes - Aufzeichnung und Auswertung mit CASSY* (Versuch Nr. P3.1.2.3).