

Kraft und Arbeit im elektrischen Feld ein Versuch zum Coulombgesetz

Ilja Rückmann

Universität Bremen

Bad Honnef 2010



Gliederung

- 1 Einordnung und klassischer Versuch
- 2 Idee eines neuen und komplexen Versuches
- 3 Die Waage
- 4 Kraft und Energie im elektrischen Feld
- 5 Gesamtaufbau und Messergebnisse
- 6 Aufgabenstellung und Lernziele

Gliederung

- 1 Einordnung und klassischer Versuch
- 2 Idee eines neuen und komplexen Versuches
- 3 Die Waage
- 4 Kraft und Energie im elektrischen Feld
- 5 Gesamtaufbau und Messergebnisse
- 6 Aufgabenstellung und Lernziele

Versuche zur E-Dynamik (Physiker)

• 3. Semester:

- 1 Spannungsquelle/Spannungsteiler
- 2 Elektrolytischer Trog
- 3 Coulombsches Gesetz
- 4 Kondensatorentladung (PC)
- 5 Temperaturabhängigkeit von Widerständen/Wheatstone-Brücke
- 6 Wirbelstrombremse (PC)
- 7 Lorentzkraft/Halleffekt
- 8 Durchflutungsgesetz
- 9 Induktionsgesetz und Bestimmung des Magnetischen Moments (PC)
- 10 Wechselspannungsgenerator
- 11 Serienschwingkreis (PC)
- 12 RC-Glied

• 1.Semester:

- Elektrische Messtechnik (Multimeter und Oszilloskop)

• 4. Semester

- Transistor
- Operationsverstärker (PC)

Klassischer Versuch zum Coulombgesetz

- Kraft zwischen geladenen Kugeln
- Messung mit Torsionsdrehwaage und Lichtzeiger
- Probleme:
 - Anstoßen der Kugel beim Aufladen/Erden
 - Influenzierte Ladungen
- schneller Ladungsverlust durch Luftfeuchtigkeit
- i. A. schlechte Ergebnisse



Gliederung

- 1 Einordnung und klassischer Versuch
- 2 Idee eines neuen und komplexen Versuches
- 3 Die Waage
- 4 Kraft und Energie im elektrischen Feld
- 5 Gesamtaufbau und Messergebnisse
- 6 Aufgabenstellung und Lernziele

Idee:

- Messung der Kraftwirkung zwischen Kondensatorplatten
- Anlegen einer Spannung (anstelle des Aufbringens von Ladungen)
- Kombination mit elektrischer Wägetechnik (DMS)
- Anwendung bereits erworbener Kenntnisse (Brückenschaltung, Parallelschaltung zur Feinregelung)
- Erlernen des Umgangs mit sehr kleinen Spannungen (Abschirmung) und dem Mikrovoltmeter

Komplexer Versuch

- fast kompletter Aufbau der Apparatur durch Studierende (Entwicklung handwerklicher und experimenteller Fähigkeiten)
- Einbeziehung weiterer physikalischer Gesetzmäßigkeiten und deren technischer Anwendungen zur Lösung der eigentlichen Messaufgabe (Anwendung bereits erworbenen Wissens)

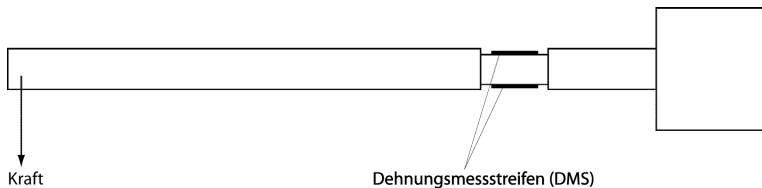
Als Beispiel siehe auch Taupunktversuch (Vortrag 2009):

Strahlengang, elektrische Beschaltung Detektor und Peltierelement, Taupunktmessung mit CASSY-Aufzeichnung

Gliederung

- 1 Einordnung und klassischer Versuch
- 2 Idee eines neuen und komplexen Versuches
- 3 Die Waage
- 4 Kraft und Energie im elektrischen Feld
- 5 Gesamtaufbau und Messergebnisse
- 6 Aufgabenstellung und Lernziele

Die Waage

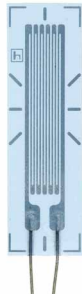


Biegebalken:

- Ausnutzen von Dehnung und Stauchung
- Brückenschaltung zum Nachweis geringer Widerstandsänderungen

Dehnungsmessstreifen

- Grundlage moderner Wägetechnik
- Prinzip: Lord Kelvin (1856)
- Patente: Simmons (1942), Ruge (1944)
- Widerstandsänderung durch Dehnung/Stauchung
- typischer Widerstandswert: 120Ω



k-Faktor eines DMS

$$l + \Delta l = l(1 + \varepsilon) \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$$V = lA = (l + \Delta l)(A - \Delta A)$$

$$A - \Delta A = \frac{A}{1 + \varepsilon}$$

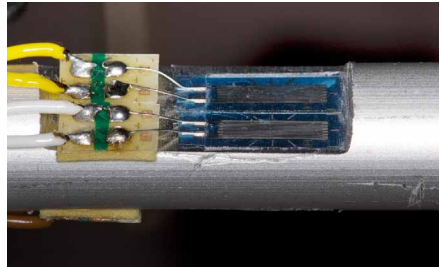
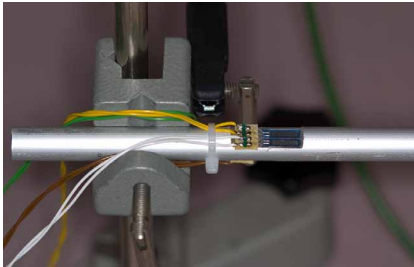
$$R + \Delta R = \rho(1 + \varepsilon)^2 \frac{l}{A}$$

$$\Delta R \approx 2\varepsilon R$$

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 2 \frac{\Delta l}{l} \quad k \approx 2$$

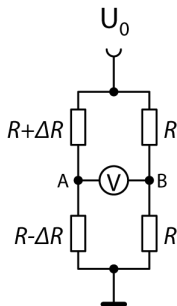
Dehnung bzw. Stauchung führt zur Längen- und Querschnittsänderung

Biegebalken und DMS



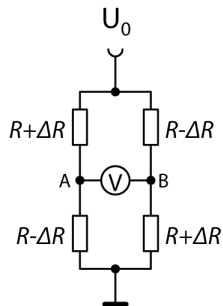
Brückenschaltung

Halbrücke



$$U_{AB} = I\Delta R$$

Vollbrücke

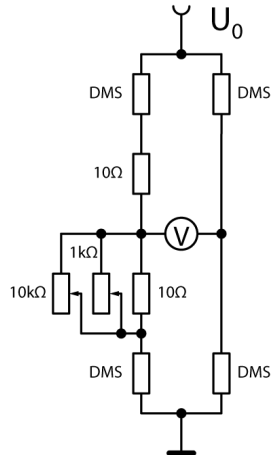


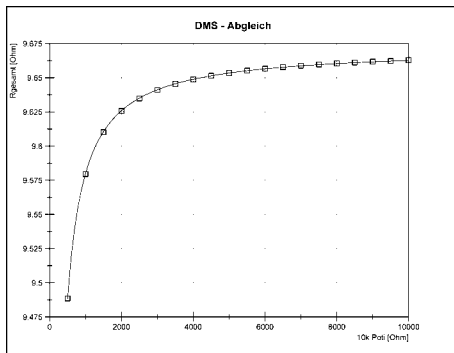
$$U_{AB} = 2I\Delta R$$

- in beiden Brückenzweigen fließt jeweils der gleiche Strom I
- Vollbrücke hat die doppelte Empfindlichkeit

Offset-Korrektur der Brücke

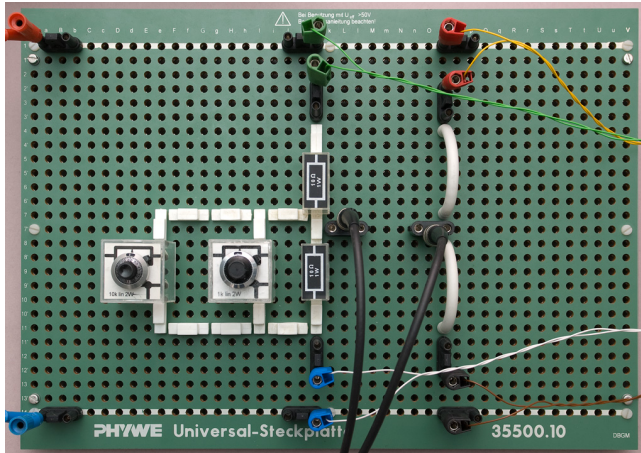
- Eigengewichte von Biegebalken, Kondensatorplatte, Kabel
- Feinregelung im $\text{m}\Omega$ -Bereich notwendig
- Grobregelung: $1\text{ k}\Omega$ -Poti
- Feinregelung: $10\text{ k}\Omega$ -Poti



Feinabgleich mit 10 k Ω -Poti

Theoretische Kurve:
 R_{gesamt} über R vom 10 k Ω -Poti

Aufbau der Brückenschaltung mit Offsetkompensation



Empfindlichkeit der Waage

- Masse 1 g bzw. Kraft 10 mN liefern $U_{AB} = 10 \mu\text{V}$ ($U_0 = 5 \text{ V}$)
- Einsatz eines Mikrovoltmeters (4,5-Stellen)
- Einsatz abgeschirmter Kabel notwendig
- Unterscheidung Masse und Erde
- Waage wird mit Wägesatz kalibriert

Gliederung

- 1 Einordnung und klassischer Versuch
- 2 Idee eines neuen und komplexen Versuches
- 3 Die Waage
- 4 Kraft und Energie im elektrischen Feld**
- 5 Gesamtaufbau und Messergebnisse
- 6 Aufgabenstellung und Lernziele

Kraft und Energie im elektrischen Feld

Gespeicherte Energie des geladenen Kondensators:

$$W = \int_0^Q U dQ = \frac{1}{C} \int_0^Q Q dQ = \frac{1}{C} \frac{Q^2}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}$$

Anziehung der Kondensatorplatten \implies Abstandsänderung \implies
 Kapazitätsänderung \implies Ladungsänderung bei $U = \text{const.}$

$$dW = \frac{1}{2} U dQ$$

$$dW = F dh + U dQ$$

Energieänderung = mechanische Arbeit + Zufuhr von Ladung

Kraft zwischen Kondensatorplatten

$$Fdh = -\frac{1}{2}UdQ = -\frac{U^2}{2}dC = \frac{U^2}{2} \frac{\varepsilon_0 A}{h^2} dh$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{h}$$

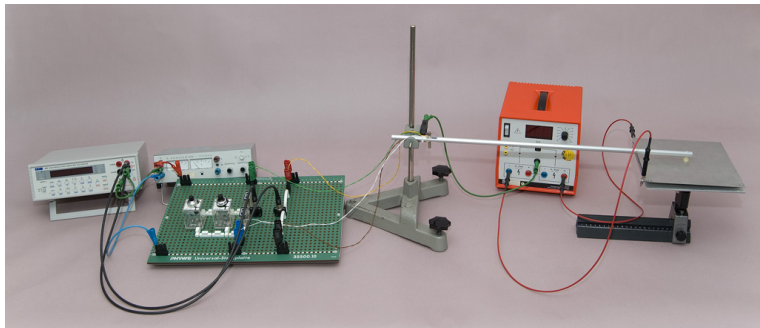
$$dC = -\frac{\varepsilon_0 A}{h^2} dh$$

$$F = \frac{\varepsilon_0 A U^2}{2 h^2}$$

Gliederung

- 1 Einordnung und klassischer Versuch
- 2 Idee eines neuen und komplexen Versuches
- 3 Die Waage
- 4 Kraft und Energie im elektrischen Feld
- 5 Gesamtaufbau und Messergebnisse**
- 6 Aufgabenstellung und Lernziele

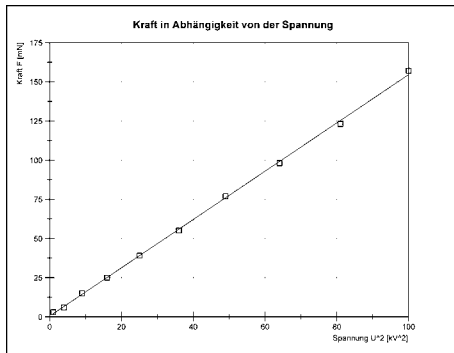
Gesamtaufbau und Messergebnisse



- Testaufbau: Plattengröße 20 cm x 20 cm; später runde Platten 20 cm Durchmesser
- obere Platte geerdet
- untere Platte höhenverstellbar

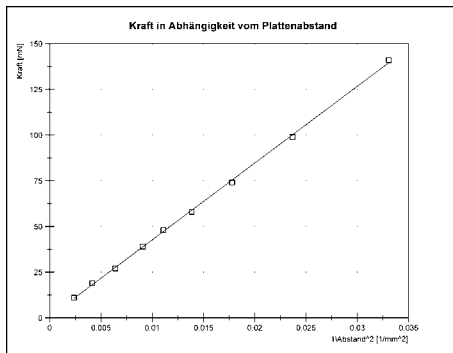
Kraft in Abhängigkeit von der Spannung

Abstand $d = 10$ mm, linearisierte Darstellung

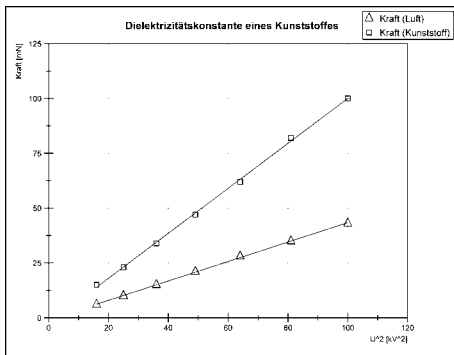


Kraft in Abhängigkeit vom Plattenabstand

$U = 5\text{ kV}$, linearisierte Darstellung



Bestimmung der Dielektrizitätskonstante eines Kunststoffes



Kraft in Abhängigkeit von der Spannung

- Luftkondensator, Plattenabstand 15 mm
- mit eingelegter Kunststoff-Platte (Stärke 10 mm)

Gliederung

- 1 Einordnung und klassischer Versuch
- 2 Idee eines neuen und komplexen Versuches
- 3 Die Waage
- 4 Kraft und Energie im elektrischen Feld
- 5 Gesamtaufbau und Messergebnisse
- 6 Aufgabenstellung und Lernziele

Aufgabenstellungen

- 1 Selbständiger Aufbau einer Brückenschaltung (Schaltung für Offset-Kompensation in Anleitung angegeben)
- 2 Kalibrierung der Waage mit Wägesatz
- 3 Abschätzung der Durchbiegung bei 20 g Belastung
- 4 Kraftmessung zwischen Kondensatorplatten
 - Variation der Spannung bei festem Abstand
 - Variation des Abstands bei fester Spannung
- 5 Kraftmessung bei eingelegtem Dielektrikum (feste Spannung, fester Abstand), Berechnung ϵ_r (Reihenschaltung von Kondensatoren)

Lerninhalte

- DMS als Sensoren
- elektronische Wägetechnik
- Anwendung Brückenschaltung
- Parallelschaltung von Widerständen
- Umgang mit sehr kleinen Spannungen (Abschirmung)
- Mikrovoltmeter (LSB-Fehler und prozentualer Fehler)
- Kraft und Energie im elektrischen Feld
- Polarisierbarkeit eines Dielektrikums

Versuch für Nichtphysikstudierende

- Reduzierung auf einen Versuch zur elektrischen Wägetechnik
- Ersatz der Kondensatorplatte durch Wägeschale
- Aufbau Brückenschaltung mit Offset-Korrektur
- Kalibrierung mit Wägesatz

Danksagung

An das Praktikumsteam:

Waltraud Hoffmann, Silke Glüge, Peter Kruse, Christoph Windzio

Und an die mechanische Werkstatt



Fotos, Grafiken und Präsentationslayout (\LaTeX -Beamerklasse): Christoph Windzio

