

## 10 Die Potenzialwaage

Die Potenzialwaage war eine der ersten Vorrichtungen zur Messung der elektrischen Kraftwirkung. Dies wird in diesem Versuch praktisch angewendet.

### 10.1 Stichworte

Kraft und Energie im elektrischen Feld. Wirkungsweise einer Gleichrichterschaltung, Plattenkondensator, Dielektrizitätskonstante.

### 10.2 Literatur

NPP: 25; Gerthsen; BS-2; Walcher; Dem-2; Geschke.

### 10.3 Zubehör

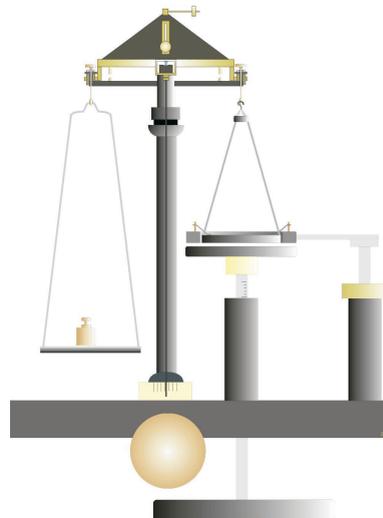


Bild 10.1: Der Versuch »Potenzialwaage« mit Schema.

Bild 10.1 zeigt ein Foto des Versuches mit Zubehör: 1 Balkenwaage mit Schutzringkondensator und Mikrometerschraube, 1 Hochspannungsgerät (s. Zeichnung), 1 Gewichtssatz.

## 10.4 Grundlagen

In Bild 10.1 ist der Versuch schematisch dargestellt. Wenn man an die Platten eines Kondensators eine Spannung anlegt, trennt man Ladungen, so dass sich diese mit verschiedenem Vorzeichen an den gegenüberliegenden Platten sammeln. Je größer die Spannung  $U$ , desto mehr Ladung  $Q$  sammelt sich ( $+Q$  und  $-Q$ ) an den entsprechenden Platten. Diese Fähigkeit eines Kondensators Ladungen zu speichern, nennt man Kapazität  $C$  und sie hängt von der Geometrie des Kondensators und vom Medium (Dielektrikum) zwischen den Platten ab:

$$Q = C \cdot U \quad (10.1)$$

Im Falle eines Plattenkondensators kann man sich leicht vorstellen, dass die elektrische Kapazität größer wird wenn seine Fläche  $A$  vergrößert wird; desweiteren ist auch klar, dass je kleiner der Abstand  $d$  zwischen den Platten ist, desto größer ist der gegenseitige Einfluss (Influenz) und desto mehr Ladungen können gesammelt werden. Die Tatsache, dass sich ein Medium und kein Vakuum zwischen den Platten befindet, führt zur letzten intuitiven Eigenschaft, dass die elektrische Kapazität auch zur Fähigkeit des Mediums selbst polarisiert zu werden ( $\epsilon_r$ ), proportional ist. Die Kapazität eines Kondensators wird durch Einbringen eines Dielektrikums zwischen die Kondensatorplatten gesteigert. Für ein Dielektrikum mit der Permittivität  $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$  ist die Kapazität dann gegeben durch

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (10.2)$$

Die Ausdehnung der Kondensatorplatten soll groß gegen deren Abstand voneinander sein, so dass Randeffekte vernachlässigt werden können. Die Kapazität  $C$  ist proportional zur Plattenfläche  $A$  und nimmt mit zunehmenden Abstand  $d$  ab. Für Luft kann  $\epsilon_r = 1$  angenommen werden. Der Proportionalitätsfaktor ist die Größe, die man in diesem Versuch ermitteln soll, die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_0$ .

Beispiel: Ein Kondensator, dessen Kondensatorplatten Folien der Fläche  $A = 10 \text{ cm}^2$  im Abstand  $d = 0,1 \text{ mm}$  voneinander sind, hat die Kapazität

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \approx 90 \text{ pF}. \quad (10.3)$$

Befindet sich zwischen den Folien Kondensatorpapier mit der Permittivitätszahl  $\epsilon_r = 4$ , so beträgt die Kapazität das Vierfache:

$$C \approx 360 \text{ pF}. \quad (10.4)$$

Anlegen einer zu hohen Spannung an den Kondensator führt zu Durchschlägen und damit zur Zerstörung des Kondensators. Ein aufgeladener Kondensator entlädt sich mit der Zeit selbst, da das Dielektrikum zwischen den Kondensatorplatten und die Isolation nur einen endlichen Widerstand haben.

Durch Anlegen der Spannung  $U$  an die Kondensatorplatten werden Ladungen bewegt und somit Arbeit geleistet. Die Energie die man dafür gebraucht hat, steckt im Kondensator, genauer in seiner Ladungsverteilung, welche wieder Arbeit leisten kann, wie z.B. beim Fließen als Strom

durch einen eventuell zugeschalteten Widerstand. Für jede infinitesimale Ladung  $dq$ , die man beim Potenzial  $U$  zu den schon vorhandenen Ladungen  $Q$  bringt, muss man folgende Arbeit aufwenden:

$$dW = dq \frac{Q}{C} \quad (10.5)$$

Je mehr Ladung sich schon auf den Platten befindet desto schwerer wird es noch weitere Ladung ( $dq$ ) hinzuzufügen. Die Energie des Kondensators im Endzustand ermittelt man, indem man diese infinitesimalen Beträge  $dW$  bis zur entsprechenden gesamten Ladung  $Q$  aufsummiert (integriert). Sie hängt ab vom Abstand der Platten, weil die Kapazität dadurch bestimmt wird. Wenn man diesen Abstand variiert, ändert sich dabei auch die potentielle Energie des Kondensators und man muss Arbeit leisten oder gewinnt Energie. Der Gradient der potentiellen Energie mit dem Abstand ist genau die Kraft, die auf die Platten wirkt.

## 10.5 Fragen

1. Wie wird das elektrische Feld  $E$  eines Plattenkondensators berechnet?
2. Wie lautet der Satz von Gauß?
3. Beschreiben Sie den Aufbau und das Prinzip einer Kirchhoffschen Potenzialwaage. Wie kann mit einer Potenzialwaage  $\epsilon_0$  bestimmt werden?
4. Wie groß ist die Kraft  $F$ , mit der sich die Platten anziehen?
5. Wie wird die Hochspannung erzeugt (5 kV aus der Steckdose)?
6. Wie wird Wechselspannung gleichgerichtet? Was ist pulsierende Gleichspannung und wie wird sie geglättet?

## 10.6 Weiterführendes

1. Was ist eine »Eimerkettenschaltung«?

## 10.7 Durchführung

Die Versuchsanordnung ist fertig geschaltet und justiert. Die Hochspannung (Gleichspannung) lässt sich mit Hilfe des Regeltransformators variieren. Der Plattenabstand  $d$  kann mit der Mikrometerschraube unterhalb des Kastens geändert werden.

Die Gewichte werden nur im arretierten Zustand der Waage aufgelegt oder weggenommen. Die Gewichte bitte nicht mit den Fingern anfassen, sondern die beiliegende Pinzette verwenden.<sup>1</sup> Bitte die Waage immer arretieren und die Hochspannung runterdrehen, bevor man die Tür öffnet!

1. Die Kraft  $F$  wird durch Auflegen von Gewichten ( $m = 3$  und  $4$  g) auf die Waagschale vorgegeben. Ferner wird eine Spannung  $U$  (2, 3, 4, 5 kV) an den Plattenkondensator angelegt, wobei  $U$  so groß sein muss, dass die obere Kondensatorplatte nicht abgehoben wird. Beim

---

<sup>1</sup> Bei den Gewichten handelt es sich um Präzisionsgewichte. Schon kleinste Fettabdrück können große Abweichungen der Gewichte zur Folge haben.

Vergrößern des Plattenabstandes  $d$  wird der Wert  $d$  bestimmt, bei dem die obere Kondensatorplatte abgehoben wird.

- Der Plattenabstand  $d$  wird fest eingestellt ( $d = 2; 2,5; 3; 4$  mm). Durch Gewichte ist die Kraft  $F$  vorgegeben ( $1 \text{ g} \leq m \leq 4 \text{ g}$ ). Durch Vermindern der Spannung wird der Wert  $U$  bestimmt, bei dem die obere Kondensatorplatte abgehoben wird.

## 10.8 Angaben

Die effektive Fläche  $A$  des Kondensators beträgt mit Schlitzkorrektur aufgrund eines kapazitiven Effektes zwischen Platte und Ring<sup>2</sup>:

$$A = \pi(r^2 + r a), \quad (10.6)$$

wobei:  $r = 40$  mm Radius der oberen Platte ohne Schutzring;  $a = 1$  mm Breite des Schlitzes ist.

Die elektrische Durchschlagfestigkeit von Luft beträgt je nach Feuchtigkeitsgehalt etwa 2,4 bis 3,0 kV/mm, die von Plexiglas (PMMA) etwa 30 kV/mm, die von paraffingetränktem Papier etwa 60 kV/mm ( $\epsilon_r = 3$ ).

## 10.9 Auswertung

- Man zeichne  $d = f(U)$ ;  $F = \text{const}$ .
- Man zeichne  $F = f(U^2)$ ;  $d = \text{const}$ .
- Aus der Steigung der Geraden (1.) ist  $\epsilon_0$  zu berechnen. Aus den Ordinatenabschnitten ergibt sich die Nullpunkts-Korrektur  $\Delta$  und der wahre Plattenabstand ist  $d_w = d + \Delta$ .<sup>3</sup>
- Aus der Steigung der Geraden (2.) unter Berücksichtigung des wahren Plattenabstandes  $d_w = d + \Delta$  berechnen Sie bitte ebenfalls  $\epsilon_0$ .
- Vergleichen Sie beide Werte untereinander und mit dem Literaturwert.

## 10.10 Bemerkungen

Die Waage ist justiert. Die Gewichtsstücke dürfen nur im arretierten Zustand der Waage aufgelegt werden. Der Plattenabstand  $d$  ist wegen des toten Gangs der Mikrometerschraube immer von kleineren Werten her einzustellen. Beim Auftreten von Fehlern ist ein Assistent zu benachrichtigen.

Treten elektrische Überschläge auf, bitte sofort die Spannung vermindern. Sollte damit eine Messung beeinträchtigt werden, bitte den Assistenten verständigen, damit dieser die Waage neu justieren kann.

<sup>2</sup> Geladene Körper bewegen sich immer in Richtung ansteigender Feldstärke

<sup>3</sup> Der angezeigte Abstand an der Mikrometerschraube entspricht nicht genau dem wahren Plattenabstand (Offset).