

## Messung der Feldstärke in einem Plattenkondensator in Abhängigkeit vom Dielektrikum

### Versuchsziele

- Bestimmung der elektrischen Feldstärke  $E$  für verschiedene Dielektrika bei konstanter Spannung  $U$
- Bestimmung der elektrischen Feldstärke  $E$  verschiedene Dielektrika bei konstanter Ladung  $Q$

### Grundlagen

Die einfachste Bauform eines Kondensators ist der Plattenkondensator. Ist der Plattenabstand wesentlich kleiner als die Abmessungen der Platten, so kann die elektrische Feldstärke  $E$  zwischen den Platten als homogen betrachtet werden. Sie wird durch die Ladungen  $+Q$  und  $-Q$  bewirkt, die durch das Anlegen einer Spannung  $U$  auf den Platten vorliegen (siehe Abb. 1). Die elektrische Feldstärke ist um so größer, je größer die Flächenladungsdichte  $Q/A$  ist, d.h. je mehr Ladungen auf den Platten vorhanden sind oder je kleiner die Fläche  $A$  der Platten ist. Zudem ist sie abhängig von der Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  des Materials zwischen den beiden Platten:

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} \quad (I)$$

Die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  beschreibt die durch Einbringen des Materials bewirkte Vergrößerung der Kapazität

$$C = Q/U = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

des Plattenkondensators gegenüber dem Vakuumwert.

Alternativ kann die elektrische Feldstärke  $E$  aus der angelegten Spannung  $U$  und dem Plattenabstand  $d$  bestimmt werden:

$$E = \frac{U}{d} \quad (II)$$

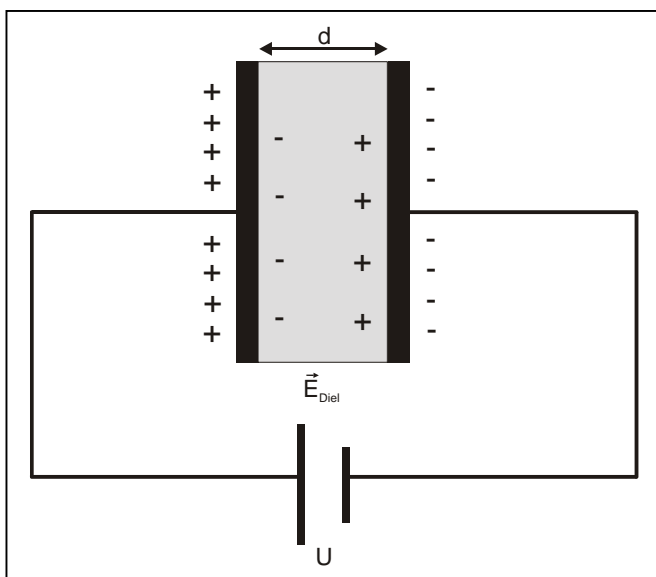


Abb. 1: Plattenkondensator mit Dielektrikum



Abb. 2: Versuchsaufbau

Bei konstanter Ladung  $Q$  (Kondensatorplatten von der Spannungsquelle getrennt) bewirkt das Einbringen eines Dielektrikums mit  $\epsilon_r > 1$  eine Abnahme des elektrischen Feldes  $E$  zwischen den Kondensatorplatten. Das Feld des Kondensators bewirkt im Dielektrikum eine Polarisation und damit ein Gegenfeld, das zu einem kleineren resultierenden Feld führt.

Bei gleichbleibender Spannung  $U$  ändert sich dagegen die elektrische Feldstärke  $E$  nicht, wenn ein Dielektrikum zwischen die Kondensatorplatten gebracht wird. Die notwendige zusätzliche Ladung zur Erhöhung der Kapazität wird von der Spannungsquelle nachgeliefert.

Füllt das Dielektrikum den Raum zwischen den Kondensatorplatten nicht komplett aus, so unterscheiden sich die elektrischen Feldstärken in Bereichen mit und ohne Dielektrikum (siehe Abb. 3). Die Feldstärke  $E_0$  in Bereichen ohne Dielektrikum ergibt sich aus Gleichung (I) für  $\epsilon_r = 1$ , die Feldstärke  $E_r$  in Bereichen mit Dielektrikum ergibt sich aus Gleichung (I) mit der Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  des verwendeten Dielektrikums. Die Ladung  $Q$  auf den Kondensatorplatten ist bei einer angelegten Spannung  $U$  gegeben durch:  $Q = C_{gesamt} \cdot U$  mit der Kapazität  $C_{gesamt}$  des Kondensators mit Dielektrikum.

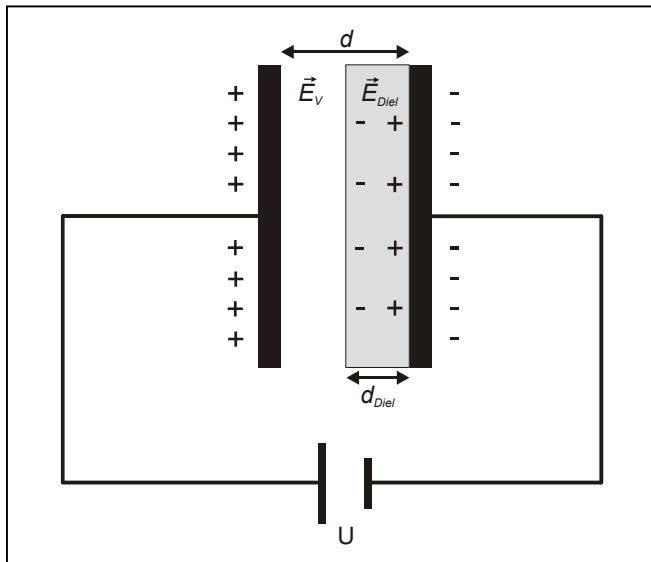


Abb. 3: Elektrisches Feld im Plattenkondensator mit Dielektrikum der Dicke  $d_{Diel} < d$

Zur Berechnung der Kapazität des Kondensators mit Dielektrikum müssen die einzelnen Bereiche getrennt betrachtet werden. Hat das Dielektrikum die gleiche Fläche  $A$  wie der Plattenkondensator, die Dicke  $d_{Diel}$  des Dielektrikums ist jedoch kleiner als der Plattenabstand  $d$  (siehe Abb. 3), so können die Bereiche mit und ohne Dielektrikum als Reihenschaltung zweier Kondensatoren mit den Plattenabständen  $d_{Diel}$  und  $d - d_{Diel}$  aufgefasst werden. Die Kapazität des Kondensators mit Dielektrikum kann berechnet werden aus:

$$\frac{1}{C_{gesamt}} = \frac{1}{C_{Diel}} + \frac{1}{C_{Luft}} = \frac{d_{Diel}}{\epsilon_0 \epsilon_r A} + \frac{d - d_{Diel}}{\epsilon_0 A} \quad (IV)$$

Bei der Messung mit dem Elektrofeldmeter S wird aufgrund des Messprinzips immer die Feldstärke in Luft bestimmt; der Raum zwischen den Platten kann nie ganz mit dem Dielektrikum ausgefüllt werden.

Bei gleichbleibender Spannung  $U$  ändert sich die mittlere elektrische Feldstärke  $E$  nicht, wenn ein Dielektrikum zwischen die Kondensatorplatten gebracht wird. Die dafür notwendige zusätzliche Ladung wird von der Spannungsquelle nachgeliefert. Im Bereich mit Luft bewirkt die zusätzliche Ladung jedoch eine höhere Feldstärke, die mit dem Elektrofeldmeter gemessen wird. Die Zunahme der gemessenen Feldstärke ist daher ein direktes Maß für die Zunahme der Ladung auf den Kondensatorplatten.

Bei gleicher Ladung  $Q$  (Kondensatorplatten von der Spannungsquelle getrennt) bewirkt das Einbringen eines Dielektrikums mit  $\epsilon_r > 1$  eine Abnahme der elektrischen Feldstärke  $E$  im Bereich mit Dielektrikum und damit auch der mittleren Feldstärke zwischen den Kondensatorplatten. Die elektrische Feldstärke in Bereichen mit Luft (d.h. auch am Ort des Elektrofeldmeters) bleibt jedoch unverändert.

Im Experiment wird der Einfluss der Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  auf die Feldstärke bestimmt. Hierzu wird zuerst bei fester Spannung  $U$  ein Dielektrikum (Glas, Plastik) zwischen die Platten eingebracht und die elektrische Feldstärke bestimmt. Anschließend wird der aufgeladene Plattenkondensator zuerst von der Spannungsquelle getrennt, dann das Dielektrikum eingebracht und die elektrische Feldstärke bestimmt. Aus der Änderung der Feldstärke beim Einbringen des Dielektrikums wird die Kapazität des Kondensators mit Dielektrikum und die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  des eingebrachten Materials bestimmt.

## Geräte

|  |         |
|--|---------|
| 1 Elektrofeldmeter S .....               | 524 080 |
| 1 Zubehör zum Elektrofeldmeter S .....   | 540 540 |
| 1 Universelles Messinstrument P .....    | 531 835 |
| 1 Ausschalter .....                      | 504 451 |
| 1 Netzgerät 450 V .....                  | 522 27  |
| 1 Vielfach-Messgerät LD analog 20 .....  | 531 120 |
| 2 Optikreiter mit Muffe 45/35 .....      | 460 312 |
| 1 Optische Bank S1 Profil, 50 cm .....   | 460 317 |
| 3 Experimentierkabel, 50 cm, rot .....   | 500 421 |
| 1 Experimentierkabel, 50 cm, blau .....  | 500 422 |
| 1 Experimentierkabel, 100 cm, blau ..... | 500 442 |

## Hinweis:

Zur Durchführung dieses Experiments können alternativ zum Universellen Messinstrument P eingesetzt werden:

1 Mobile CASSY (524 009)

oder

1 Sensor-CASSY (524 010USB) + CASSY Lab (524 200) / CASSY-Display (524 020)

oder

1 Pocket CASSY (524 009) + CASSY Lab (524 200)

Alternativ zum Netzgerät 450 V (522 27) und dem Vielfach-Messgerät LD analog 20 (531 1200) kann das Hochspannungsnetzgerät 10 kV (521 70) verwendet werden. Bei der Durchführung des Experiments mit dem Hochspannungsnetzgerät 10 kV darf eine maximale Spannung von 300 V **nicht** überschritten werden, da der Ausschalter nicht höher belastbar ist!

## Vorbemerkung

Die als Dielektrika verwendeten Glas- und Kunststoffplatten können sich sehr leicht elektrostatisch aufladen. Daher sollten die Platten vor dem Experiment entladen werden, z.B. indem die Oberflächen unter fließendem Wasser (ggf. mit Spülmittel) abgewaschen werden und an Luft getrocknet werden. Zum Abtrocknen dürfen die Oberflächen nicht abgerieben werden, da dies sofort wieder zu einer elektrostatischen Aufladung führt!

Für den Abstand zwischen Kondensatorplatte und Elektrofeldmeter S, der für die Größe des elektrischen Feldes maßgeblich ist, muss jeweils 1 mm addiert werden. Die Mess Elektroden im Elektrofeldmeter liegen - durch den Aufbau des Messgeräts bedingt - 1 mm hinter der Kondensatorplatte, in die das Elektrofeldmeter eingesetzt wird.

## Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2 gezeigt. Für den Aufbau sind folgende Schritte nötig:

- Eine der Kondensatorplatten mit Stativblock auf der Stativstange aus Kunststoff aufbauen und mit einem Optikreiter mit Muffe auf der Optischen Bank S1 Profil befestigen.
- Die durchbohrte Kondensatorplatte auf das Elektrofeldmeter S schieben. Ebenfalls mit einem Optikreiter mit Muffe auf der Optischen Bank S1 Profil befestigen
- Das Elektrofeldmeter mit dem Universellen Messinstrument P verbinden.
- Den Minuspol des Netzgeräts 450 V mit der Erdungsbuchse auf der Rückseite des Elektrofeldmeters verbinden.

- Den Pluspol des Netzgeräts 450 V an den Ausschalter anschließen.
- Den zweiten Ausgang des Ausschalters mit der freien Kondensatorplatte verbinden. Das Experimentierkabel sollte dabei frei hängend verlaufen, so dass keine Oberflächen (z.B. Tischplatte) berührt werden.
- Das Vielfach-Messgerät LDanalog 20 zur Messung der Spannung an den Ausgang des Netzgerätes 450 V anschließen.
- Plattenabstand  $d = 9$  mm einstellen. Darauf achten, dass die Platten möglichst exakt parallel zueinander ausgerichtet sind.

### Achtung

Es ist unbedingt auf eine korrekte Masseführung bzw. Erdung des Elektroföldmeter S zu achten. Da typischerweise in Verbindung mit Hochspannung gemessen wird, darf das Elektroföldmeter S nie ohne Verbindung der rückseitigen 4 mm Buchse mit der Versuchsmasse betrieben werden.

### Durchführung

#### a) Messung bei konstanter Spannung

- Die Spannung auf den Kondensatorplatten schrittweise auf 300 V erhöhen und den Wert der elektrischen Feldstärke  $E$  ablesen. Anschließend Spannung auf Null zurückdrehen.
- Die Glasplatte vorsichtig ganz zwischen die Kondensatorplatten bringen, ohne den Abstand der Kondensatorplatten zu verändern. Dabei die Kondensatorplatten nicht mit der Glasplatte berühren, da dies zu einer Aufladung der Glasplatte führen kann, die das Messergebnis verfälscht.
- Den Wert des elektrischen Feldes  $E$  bei Spannung  $U = 0$  V ablesen. Ist der Wert des elektrischen Feldes nicht gleich Null, so ist die Platte elektrostatisch aufgeladen und muss entladen werden (siehe Vorbemerkung).
- Die Spannung auf den Kondensatorplatten schrittweise auf 300 V erhöhen und den Wert des elektrischen Feldes  $E$  ablesen. Anschließend Spannung auf Null zurückdrehen.
- Den Versuch für die Kunststoffplatte wiederholen.

#### b) Messung bei konstanter Ladung

- Abstand der Kondensatorplatten auf 19 mm vergrößern.
- Den Kondensator ohne Dielektrikum auf 200 V aufladen und Wert der elektrischen Feldstärke  $E$  ablesen.
- Mit dem Ausschalter den Kondensator von der Spannungsquelle trennen und Wert der elektrischen Feldstärke  $E$  ablesen. Nimmt die Feldstärke kontinuierlich ab, so fließt die Ladung über Leckströme von der Kondensatorplatte ab. Dann ist zu überprüfen, ob das Kabel zwischen Schalter und Kondensatorplatte Kontakt zu anderen Oberflächen (z.B. Tischplatte) hat. Ist dies nicht der Fall, sollte der Stativstab, auf dem die Platte befestigt ist, gereinigt werden (zuletzt mit destilliertem Wasser), da sich auf der Oberfläche eine leitende Schicht gebildet hat.
- Spannung auf Null zurückdrehen und die Glasplatte vorsichtig ganz zwischen die Kondensatorplatten bringen. Der Wert des elektrischen Feldes sollte Null sein (s. o.)
- Spannung auf 200 V erhöhen und Wert der elektrischen Feldstärke  $E_{\text{Glas}}$  ablesen.
- Mit dem Ausschalter den Kondensator von der Spannungsquelle trennen. Wert der elektrischen Feldstärke kontrollieren.

- Die Glasplatte vorsichtig aus dem Kondensator entfernen, ohne den Abstand der Kondensatorplatten zu verändern oder die Kondensatorplatten zu berühren.
- Den Wert der elektrischen Feldstärke  $E_Q$  ablesen.
- Mit dem Ausschalter den Kondensator wieder mit der Spannungsquelle verbinden und die elektrische Feldstärke  $E_U$  ablesen.
- Den Versuch für die Kunststoffplatte wiederholen.

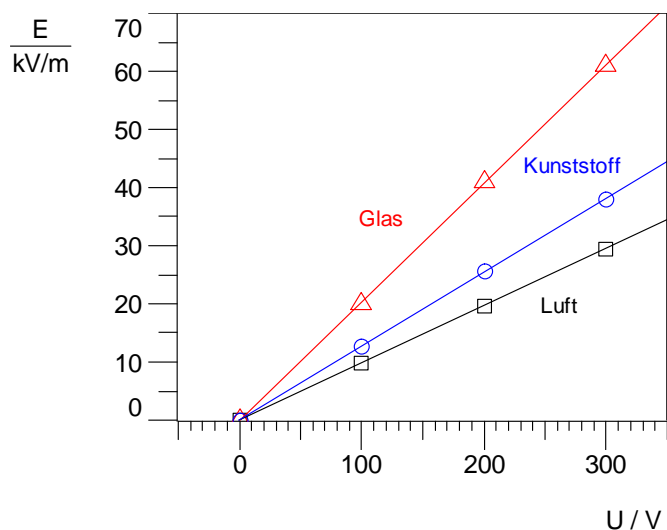
### Messbeispiel und Auswertung

#### a) Messung bei konstanter Spannung

In Tabelle 1 sind die Messergebnisse einer Beispielmessung für die elektrische Feldstärke  $E_{\text{Luft}}$  ohne Dielektrikum,  $E_{\text{Glas}}$  mit Glasscheibe und  $E_{\text{Kunststoff}}$  mit Kunststoffplatte in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  gezeigt und in Abb. 4 graphisch aufgetragen.

Deutlich ist die lineare Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke  $E$  von der angelegten Spannung  $U$  zu beobachten, wobei die elektrische Feldstärke bei Glas am stärksten zunimmt.

| $U / V$ | $E_{\text{Luft}} / \text{kV/m}$ | $E_{\text{Glas}} / \text{kV/m}$ | $E_{\text{Kunststoff}} / \text{kV/m}$ |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 0       | 0                               | 0                               | 0                                     |
| 100     | 9,9                             | 20,0                            | 12,7                                  |
| 200     | 19,7                            | 41,0                            | 25,7                                  |
| 300     | 29,5                            | 61,0                            | 38,0                                  |



Tab. 1: Messergebnisse bei konstanter Spannung  $U$

Abb. 4: Elektrische Feldstärke  $E$  in einem Kondensator in Abhängigkeit von der angelegten Spannung  $U$  ohne und mit Dielektrikum (Glas, Kunststoff)

Wie in der Einleitung beschrieben spiegelt hier die Zunahme der elektrischen Feldstärke durch das Einbringen eines Dielektrikums in den Kondensator gerade die Zunahme der Ladung  $Q$  auf den Kondensatorplatten wieder. Diese kann berechnet werden über  $Q = \epsilon_0 \cdot A \cdot E$  (siehe Gleichung (I)). Die Werte für  $Q$ , die man durch Einsetzen der Messwerte aus Tabelle 1 bei  $U = 300$  V erhält, sind in Tabelle 2 aufgeführt. Mit der Gleichung  $C_{\text{gesamt}} = Q/U$  erhält man daraus die Gesamtkapazität des Kondensators mit Dielektrikum (Tabelle 2).

Durch Auflösen von Gleichung (IV) und Einsetzen der Werte aus Tabelle 2 erhält man die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  der verwendeten Materialien:

$$\epsilon_r = \frac{C_g \cdot d_{Diel}}{\epsilon_0 A - C_g (d - d_{Diel})}$$

Für die Dicke des Dielektrikums wurde für Luft der korrigierte Plattenabstand  $d = 10$  mm eingesetzt (siehe Vorbemerkung). Die Dicke der Glasplatte betrug  $d_{Glas} = 6$  mm und die Dicke der Kunststoffplatte  $d_{Kunststoff} = 4$  mm.

Die Werte für die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  für Luft, Kunststoff und Glas stimmen gut mit den Literaturwerten für Luft  $\epsilon_r = 1,0$ , für Glas  $\epsilon_r = 6 - 8$  und für den verwendeten Kunststoff Polystyrol  $\epsilon_r = 2,5$  überein.

| Material   | $E_{Luft}$ / kV/m | $Q$ / nC | $C_{gesamt}$ / pF | $\epsilon_r$ |
|------------|-------------------|----------|-------------------|--------------|
| Luft       | 29,5              | 20,5     | 68,3              | 0,98         |
| Kunststoff | 38,0              | 26,4     | 87,9              | 2,1          |
| Glas       | 61,0              | 42,3     | 141               | 6,5          |

Tab. 2 Ergebnisse für die Ladung  $Q$ , die Gesamtkapazität  $C_{gesamt}$  und die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  für verschiedene Dielektrika

### b) Messung bei konstanter Ladung

In der Beispielmessung wurde der Kondensator ohne Dielektrikum auf 200 V aufgeladen und dann von der Spannungsversorgung getrennt. Über mehrere Minuten hinweg war kein Spannungsabfall zu beobachten.

Anschließend wurden für die Glas- und Kunststoffplatte Messungen bei konstanter Ladung durchgeführt. Die Messwerte sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die Feldstärken  $E'$  wurden mit Dielektrikum gemessen, die Feldstärken  $E_Q$  nach Entfernen des Dielektrikums bei noch getrennter Spannungsquelle und die Feldstärken  $E_U$  bei wieder verbundener Spannungsquelle.

Die Feldstärken  $E'$  unterscheiden sich für Kunststoff und Glas auf Grund der Dielektrizitätszahlen, was in Abschnitt a genauer untersucht wurde. Aufgrund des größeren Plattenabstand sind die Messwerte kleiner als in Abschnitt a.

Da die Feldstärke im verwendeten Versuchsaufbau sowohl mit als auch ohne Dielektrikum immer in Luft gemessen wird, unterscheiden sich die Messwerte nicht, wenn die Ladung auf den Platten konstant bleibt. Die kleine Änderung bei Kunststoff deutet darauf hin, dass die Kunststoffplatte leicht aufgeladen war, was das Messergebnis verfälscht.

Wird der Kondensator dann wieder mit der Spannungsquelle verbunden, fließt Ladung von den Kondensatorplatten ab und das gemessene Feld wird kleiner. Die Werte sind unabhängig davon, welches Material sich zu Beginn im Kondensator befunden hat, da die elektrische Feldstärke nur noch von angelegter Spannung und Plattenabstand abhängt.

| Material   | $E'$ / kV/m | $E_Q$ / kV/m | $E_U$ / kV/m |
|------------|-------------|--------------|--------------|
| Kunststoff | 9,3         | 10           | 8,7          |
| Glas       | 12          | 12           | 8,8          |

Tab. 3: Messwerte bei konstanter Ladung