

# PROTOKOLL

## Werkstoffe

### Übung 2: Dielektrika

Name: Lachnit David

Matr.Nr: 11771274

Name: Willert Christoph

Matr.Nr: 11778297

Name: \_\_\_\_\_

Matr.Nr: \_\_\_\_\_

Datum: 11.04.2019

Gruppe: 12

Betreuer: Geiginger Lisa-Marie

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                       |          |
|----------|-------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Durchschlagsfestigkeit</b>                         | <b>3</b> |
| 1.1      | Grundlagen . . . . .                                  | 3        |
| 1.2      | Durchschlagsfestigkeit von Luft . . . . .             | 4        |
| 1.2.1    | Aufgabenstellung . . . . .                            | 4        |
| 1.2.2    | Messaufbau . . . . .                                  | 4        |
| 1.2.3    | Messergebnisse . . . . .                              | 5        |
| 1.3      | Durchschlagsfestigkeit von Papier . . . . .           | 6        |
| 1.3.1    | Aufgabenstellung . . . . .                            | 6        |
| 1.3.2    | Messaufbau . . . . .                                  | 6        |
| 1.3.3    | Messergebnisse . . . . .                              | 6        |
| 1.4      | 1-Minuten Stehspannung . . . . .                      | 7        |
| 1.4.1    | Aufgabenstellung . . . . .                            | 7        |
| 1.4.2    | Messaufbau . . . . .                                  | 7        |
| 1.4.3    | Messergebnisse . . . . .                              | 8        |
| <b>2</b> | <b>Dielektrizitätszahl</b>                            | <b>9</b> |
| 2.1      | Grundlagen . . . . .                                  | 9        |
| 2.2      | Kapazität eines Luftkondensators . . . . .            | 11       |
| 2.2.1    | Aufgabenstellung . . . . .                            | 11       |
| 2.2.2    | Messaufbau . . . . .                                  | 11       |
| 2.2.3    | Messergebnisse . . . . .                              | 11       |
| 2.3      | Bestimmen der relativen Dielektrizitätszahl . . . . . | 12       |
| 2.3.1    | Aufgabenstellung . . . . .                            | 12       |

|          |                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.2    | Messaufbau . . . . .                                  | 12        |
| 2.3.3    | Messergebnisse . . . . .                              | 13        |
| 2.4      | Frequenzabhängigkeit von Kondensatoren . . . . .      | 14        |
| 2.4.1    | Aufgabenstellung . . . . .                            | 14        |
| 2.4.2    | Messaufbau . . . . .                                  | 14        |
| 2.4.3    | Messergebnisse . . . . .                              | 14        |
| <b>3</b> | <b>Durchgangswiderstand und Oberflächenwiderstand</b> | <b>16</b> |
| 3.1      | Grundlagen . . . . .                                  | 16        |
| 3.2      | Aufgabenstellung . . . . .                            | 17        |
| 3.3      | Durchgangswiderstand . . . . .                        | 17        |
| 3.3.1    | Messaufbau . . . . .                                  | 18        |
| 3.3.2    | Messergebnisse . . . . .                              | 18        |
| 3.4      | Oberflächenwiderstand . . . . .                       | 19        |
| 3.4.1    | Messaufbau . . . . .                                  | 19        |
| 3.4.2    | Messergebnisse . . . . .                              | 20        |

# 1 Durchschlagfestigkeit

## 1.1 Grundlagen

Die Durchschlagfestigkeit gibt die elektrische Feldstärke an, bei der in einem Isolierwerkstoff ein elektrischer Durchschlag erfolgt. Grundsätzlich kann zwischen 4 Arten von Durchschlägen unterschieden werden:

### **Lawinendurchschlag**

Durch existierende freie Elektronen im Dielektrikum, wegen einwirkung von Fremdatomen oder durch thermische Anregung, können diese durch ein ausreichend großes Feld beschleunigt werden. Wenn dann ein einzelnes Elektron mit genügend kinetischer Energie durch Kollision ein Elektronen-Loch-Paar bildet, durch den Beschleunigungsvorgang kann es zu einem lawinenartigen Anwachsen der Ladungsträger führen.

### **Thermischer Durchschlag**

Hier wird durch eine lokale Überhitzung und die dadurch initiierte Freisetzung von Ladungsträgern, ein Überschlag ausgelöst.

### **Elektrolytischer Durchschlag**

Bei sehr kleinen Leckströmen können sich Metallionen baumartig an den Elektroden anlagern (Dendriten) und so Stromleitpfade bilden. Folge ist eine geringere Durchschlagfestigkeit.

## **Gasentladungsdurchschlag**

Zu der Art von Durchschlag kann es kommen, wenn sich Gaseinschlüsse im Dielektrikum befinden. Einschlüsse stellen eine Isolationsschwachstelle dar. Das ist zurückzuführen auf die niedrigere Durchschlagsfeldstärke von Gasen, und die dadurch verbundene höhere Feldstärke im Einschluss.

## **1.2 Durchschlagsfestigkeit von Luft**

### **1.2.1 Aufgabenstellung**

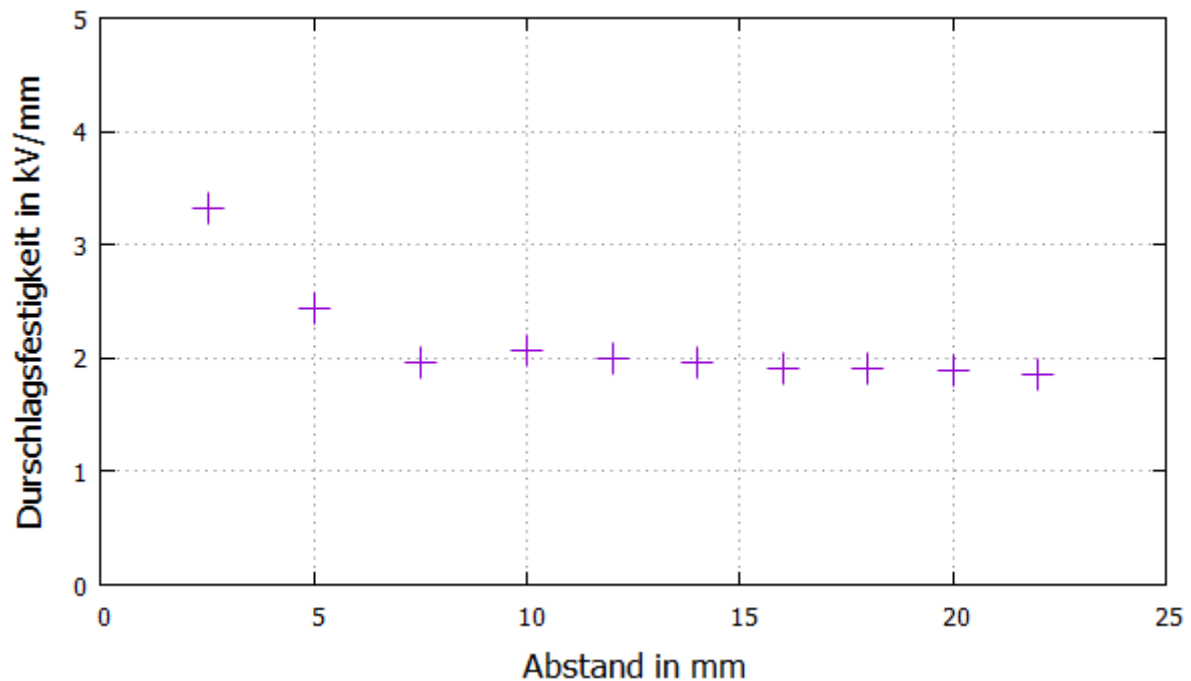
Die Durchschlagsfestigkeit von Luft in abhängigkeit des Elektrodenabstands zu messen. Dabei sollen 10 verschiedene Elektrodenabstände gewählt werden, bei denen die Spannungsfestigkeit gemessen werden soll. Die Spannungsänderungsrate wird dabei auf 0,5 kV/s eingestellt.

### **1.2.2 Messaufbau**

Zur Messung der Durchschlagsfestigkeit wird das Hochspannungsprüfgerät PGO-S3 von BAUR verwendet. Dieses Gerät führt alle Grundfunktionen, die zur Durchschlagmessung nötig sind, automatisch aus.

Zum Gerät: Die Elektroden weisen ein Rogowski-Profil auf, um einen möglichst gleichmäßigen Verlauf der elektrischen Feldstärke zu ermöglichen. Um ein annähernd homogenes Feld zu gewährleisten, müssen die Elektroden möglichst parallel zueinander ausgerichtet sein. Die Prüfung erfolgt mit einer sukzessiv steigender sinusförmiger Wechselspannung.

### 1.2.3 Messergebnisse



**Abb. 1.1:** Abhängigkeit der Durchschlagsspannung gegenüber der Luftspaltlänge von Luft

Die Abbildung 1.1 zeigt den Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten der Durchschlagsspannung und dem Abstand. Durch Auswertung der Messdaten konnte eine Durchschlagsspannung von 3,3 kV/mm bei geringen Abständen und 1,8 kV/mm bei größeren Abständen ermittelt werden. Die Ursache der Abnahme der Durchschlag ist vermutlich auf die hohe Spannung zurück zu führen. Durch die hohe Spannung entsteht ein erhöhtes elektrisches Feld an den Elektroden, welches die Ionisation erleichtert, weshalb der Durchschlag früher erfolgt.

## 1.3 Durchschlagsfestigkeit von Papier

### 1.3.1 Aufgabenstellung

Die Durchschlagsfestigkeit von Papier bei unterschiedlicher Papierdicke zu messen. Die Dicke wird von 2 bis 5mm im Millimeterschritten gesteigert. Die Spannungsänderungsrate wird dabei auf 0,5 kV/s eingestellt.

### 1.3.2 Messaufbau

Zur Messung wird wie bei der Messung der Durchschlagsfestigkeit von Luft das PGO-S3 verwendet. Nun wird zwischen die Elektroden das Papier der jeweiligen Dicke (2 bis 5mm) eingespannt, und dann die jeweilige Durchschlagsspannung gemessen.

### 1.3.3 Messergebnisse

| Abstand in mm | Durchschlagfestigkeit in kV/mm |
|---------------|--------------------------------|
| 2             | 6,2                            |
| 3             | 5,3                            |
| 4             | 4,2                            |
| 5             | 4                              |

**Tab. 1.1:** Durchschlagsspannung abhängig von der Papierdicke

Durch Auswertung von Tab. 1.1 erhält man eine Durchschlagfestigkeit von Papiers von 6,2 kV/mm bei großen Papierdicken bis hin zu 4 kV/mm bei geringen Papierdicken. Hier findet ebenfalls eine Abnahme der Durchschlagssfestigkeit mit zunehmenden Abstand der Elektroden wie in Abschnitt 1.2 statt. Um zu bestätigen, dass wirklich ein Durchschlag erfolgt ist, wurde dieser Test an der selben Probe erneut durchgeführt und der Durchschlag erfolgte bei einer deutlich niedrigeren Spannung.

## 1.4 1-Minuten Stehspannung

### 1.4.1 Aufgabenstellung

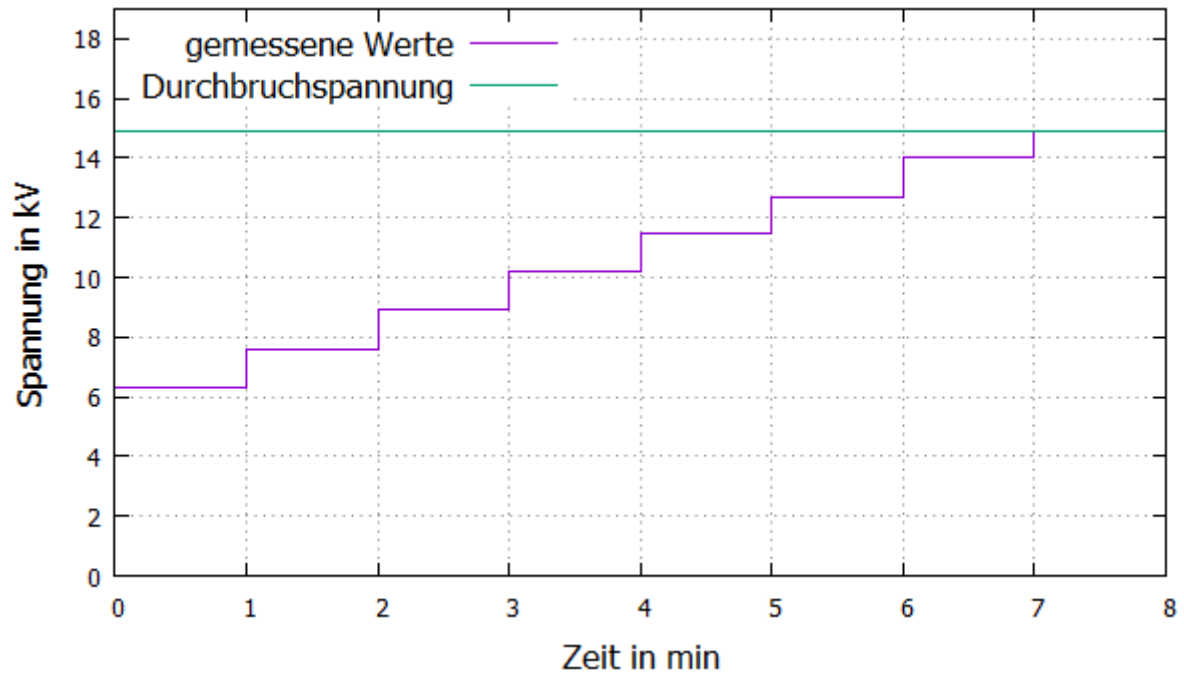
Die Spannung wird auf 40% der bekannten Durchschlagsspannung von der dabei verwendeten Papierdicke eingestellt. Nach jeder Minute wird die Spannung dann um 8% gesteigert, bis ein Durchschlag erfolgt. Die Spannung kurz vor dem Durchschlag nennt man die 1-Minuten Stehspannung.

### 1.4.2 Messaufbau

Es wird wieder das Hochspannungsmessgerät PGO-S3 für die Messung verwendet. Zwischen die Elektroden wird 3mm dickes Papier eingeklemmt. Begonnen wird bei 6,4 kV, also bei 40% von 15,9 kV. Danach wird jede Minute die angelegte Spannung um 8% erhöht, bis ein Durchschlag erfolgt.



### 1.4.3 Messergebnisse



**Abb. 1.2:** Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Zeit

Die ursprünglichen 15,9 kV wurden nicht erreicht, da der Durchschlag schon bei 14,5 kV erfolgte. Dies ist darauf zurück zu führen, dass der Isolator längere Zeit hinweg mit einer Spannung belastet wurde, weshalb auch der Überschlag früher erfolgte.

## 2 Dielektrizitätszahl

### 2.1 Grundlagen

Das makroskopische Verhalten von Dielektrika wird durch die Gleichung

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$$

beschrieben.

$\vec{D}$  elektrische Flussdichte  $[D] = \text{As/m}^2$

$\vec{E}$  elektrische Feldstärke  $[E] = \text{V/m}$

$\epsilon_0$  Permittivität Vakuum  $[\epsilon_0] = 8,854 * 10^{-12} \text{ As/Vm}$

$\epsilon_r$  reaktive Permittivität  $[\epsilon_r] = 1$

Die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  ist der Faktor um die sich die Flussdichte vergrößert, wenn man statt den leeren Raum ein polarisierendes Material verwendet. Polarisation entsteht grundsätzlich durch das elektrische Feld und der daraus resultierenden Krafteinwirkung zu Zustandsänderungen, der atomaren und molekularen Dipole. In einem Dielektriker können sich die Dipole nur so weit aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht werden, bis die Rücktreibende Kraft gleich jener ist wie jene, durch das Elektrische Feld erzeugte. Da negativ und positiv geladene Teilchen sich entgegengesetzt verschieben, wird jedes Volumelement zum elektrischen Dipol. Das wird auch elektrische Polarisation, durch das elektrische Feld genannt. Auf der gegenüberliegenden Seite, zur Polarisationsrichtung senkrechten Oberfläche, entsteht elektrische Ladung, jene Ladung nennt man scheinbare Ladung, da sie sich nicht durch einen Leiter abführen lässt.

Man unterscheidet zwischen 3 verschiedenen Polarisationsarten:

### **Elektronenpolarisation**

Bei der Elektronenpolarisation verschieben sich die negativ geladenen Elektronen in den Atomschalen gegen die positiven Atomkerne, wodurch sich Dipolmomente ergeben. Auf Grund der geringen Masse der Elektronen dauert der Vorgang nur  $10^{-14}$  bis  $10^{-15}$  s

### **Atompolarisation**

Tritt bei Molekülen mit reiner oder überwiegender Ionenbindung in Ionenkristallen auf. Durch die unterschiedlichen Ladungen der Ionen kommt es zu unterschiedlichen Verrückungen der Ionen im Kristallgitter aus ihren Gleichgewichtslagen, wo durch Dipolmomente entstehen. Durch die größere Masse der Ionen ist die Einstellzeit bei der Ionenpolarisation größer als bei der Elektronenpolarisation. Die Einstelldauer beträgt ca.  $10^{-12}$  bis  $10^{-13}$  s

### **Orientierungspolarisation**

Diese Polarisationsart tritt bei Molekülen auf, die bereits permanente Dipole sind. Auf Grund der Wärmebewegung ist die Orientierung so verteilt, dass im allgemeinen die Wirkung der Dipolmomente verschwindet. Im Wirkungsbereich des elektrischen Feldes richten sich die Dipole jedoch aus, und es kommt zu einer Gleichgewichtslage zwischen thermischer Unordnung und der durch das Feld angestrebte Ausrichtung. Die Einstellzeit der Orientierungspolarisation liegt bei etwa  $10^{-9}$  bis  $10^{-11}$  s

## 2.2 Kapazität eines Luftkondensators

### 2.2.1 Aufgabenstellung

Es soll die Kapazität eines leeren Stoffmesskondensators (Luft als Dielektrikum) von 1mm bis 10mm Plattenabstand bestimmt werden. Mit jenen Werten wird die Dielektrizitätszahl ermittelt und diese dann mit dem Datenblatt verglichen.

### 2.2.2 Messaufbau

Die Messung erfolgt mit einem QuadTEch 7600 LCR-Meter, an dem ein Stoffmesskondensator, Plattendurchmesse 100 mm, angeschlossen ist. Nach Kalibrierung des Gerätes wird ein anfänglicher Luftspalt von 1mm eingestellt. Der Luftspalt wird in 1 mm Schritten bis zu einem Maximum von 10 mm erhöht. Die Erhöhung geschieht nach jeder Messung.

### 2.2.3 Messergebnisse

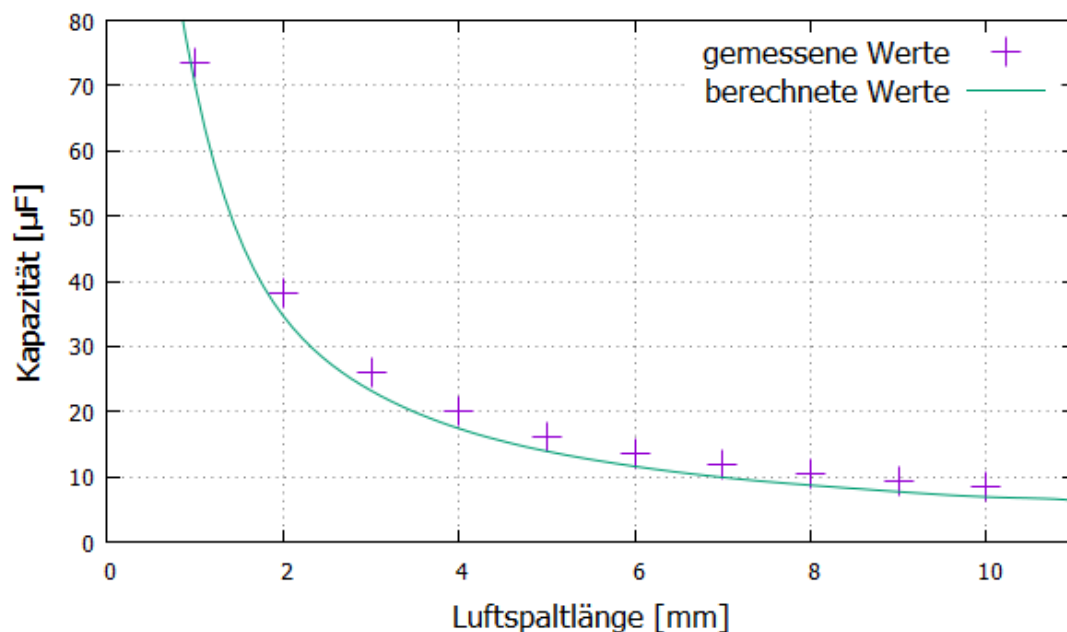


Abb. 2.1: Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Zeit

Die Abweichung der Messwerte im Vergleich zu den berechneten lässt sich dadurch erklären, dass bei den Berechnungen von einem homogenen Feld ausgegangen wird. Bei dieser Messung werden jedoch Störungen im Randbereich mit einbezogen, weshalb es zu einer leicht abweichenden Werten kommt.

## **2.3 Bestimmen der relativen Dielektrizitätszahl**

### **2.3.1 Aufgabenstellung**

Es sollen zwei verschiedene Dielektrika-Proben mit unterschiedlicher Dicke ausgewählt werden und deren Kapazität gemessen werden. Dann soll die scheinbare Dielektrizitätszahl, korrigierte Dielektrizitätszahl und die Luftspaltdicke berechnet werden.

### **2.3.2 Messaufbau**

Für den Messaufbau wird wieder der Stoffmesskondensator mit 100 mm Plattendurchmesser, verbunden mit dem QuadTech 7600 LCR-Meter, verwendet werden. Die ausgewählten Dielektrika-Proben werden in den Stoffmesskondensator eingespannt um die Kapazität zu messen.

### 2.3.3 Messergebnisse

Die Tabelle zeigt die gemessenen Kapazitäten und die damit berechneten scheinbaren Dielektrizitätszahlen für die unterschiedlichen Materialien und Dicken:

| Probe        | Dicke in mm | Kapazität [C] = pF | scheinbare Dielektrizitätszahl |
|--------------|-------------|--------------------|--------------------------------|
| PVC          | 10,2        | 25,19              | 3,69                           |
| PVC          | 5           | 46,11              | 3,32                           |
| Teflon(PTFE) | 3,3         | 44,29              | 2,1                            |
| Teflon(PTFE) | 1           | 73,19              | 1,92                           |

**Tab. 2.1:** Messung der Kapazität, sowie die errechnete scheinbare Dielektrizitätszahl

Die folgende Tabelle zeigt die berechneten Luftspaltwerte, sowie die um die Luftspaltdicke korrigierte Dielektrizitätszahl gegenübergestellt mit der Dielektrizitätszahl aus der Tabelle in der Aufgabenstellung.

| Probe        | Dicke in $\mu m$ | $\epsilon_r$ errechnet | $\epsilon_r$ Tabelle |
|--------------|------------------|------------------------|----------------------|
| PVC          | 454              | 4,2                    | 3,4                  |
| Teflon(PTFE) | 288              | 2,2                    | 2,1                  |

**Tab. 2.2:** Messung der Kapazität, sowie die errechnete scheinbare Dielektrizitätszahl

Die gemessene Dielektrizitätszahl von Teflon weicht um 4 Prozent von dem Wert der Tabelle ab, die Dielektrizitätszahl von PVC nur um 23,5 Prozent.

## 2.4 Frequenzabhängigkeit von Kondensatoren

### 2.4.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabe besteht darin, dass man die Frequenzabhängigkeit der Kapazität verschiedener Kondensatoren misst.

### 2.4.2 Messaufbau

Für die Messung wird das QuadTech 7600 LCR-Meter verwendet. Der Frequenzbereich in dem die Kapazitäten gemessen werden sollen, ist von 10 Hz bis 2 MHz. Dabei muss besonderes Augenmerk auf die Begrenzung des Messgerätes gelegt werden. Der Messstrom des verwendeten LCR-Meters kann in einem Bereich von 250  $\mu\text{A}$  und 100 mA eingestellt werden. Die Messspannung kann von 20 mV bis 5 V variiert werden. Ob die Messgrößen auch tatsächlich in dem angegebenen Bereich liegen und die Bedingungen der Messbrücke eingehalten werden können, hängt von der eingestellten Messfrequenz und von der angeschlossenen Messlast ab.

### 2.4.3 Messergebnisse

In den beiden nachfolgenden Diagrammen sieht man die Abhängigkeit der effektiven Kapazität von der Frequenz. Die Messwerte der Messkurve des 330  $\mu\text{F}$  sind ab 400 kHz zu vernachlässigen, da so ein extremer Sprung der Kapazität nicht der Realität entsprechen kann. Anhand der Abbildung 2.2 ist ein sehr starker Abfall der Kapazitäten ab einer Frequenz von 1 kHz, beziehungsweise 100 kHz beim 4,7  $\mu\text{F}$  Kondensator zu erkennen, was charakteristisch für einen Folienkondensator ist. Der 300  $\mu\text{F}$  und der 330  $\mu\text{F}$  Elektrolytkondensator weisen ebenso von der Kurvencharakteristik ähnliche Kurvenformen auf. Lediglich der 1 nF Kondensator behält seine Kapazität bei steigender Frequenz bei.

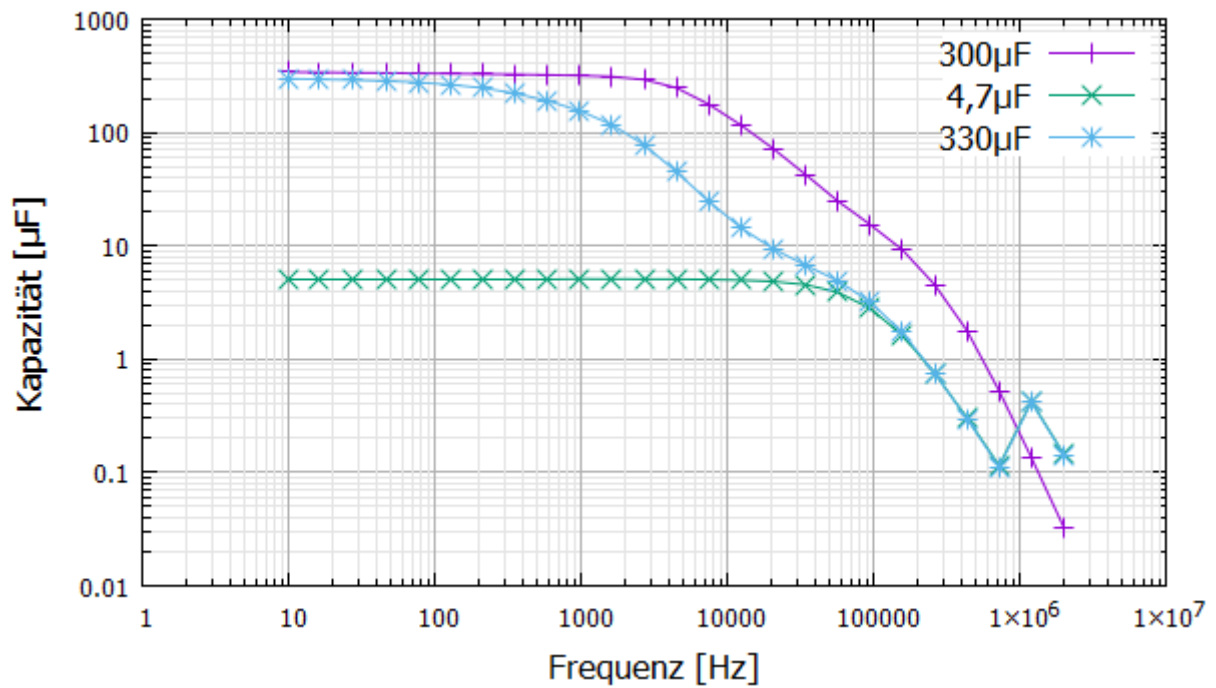


Abb. 2.2: Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Zeit

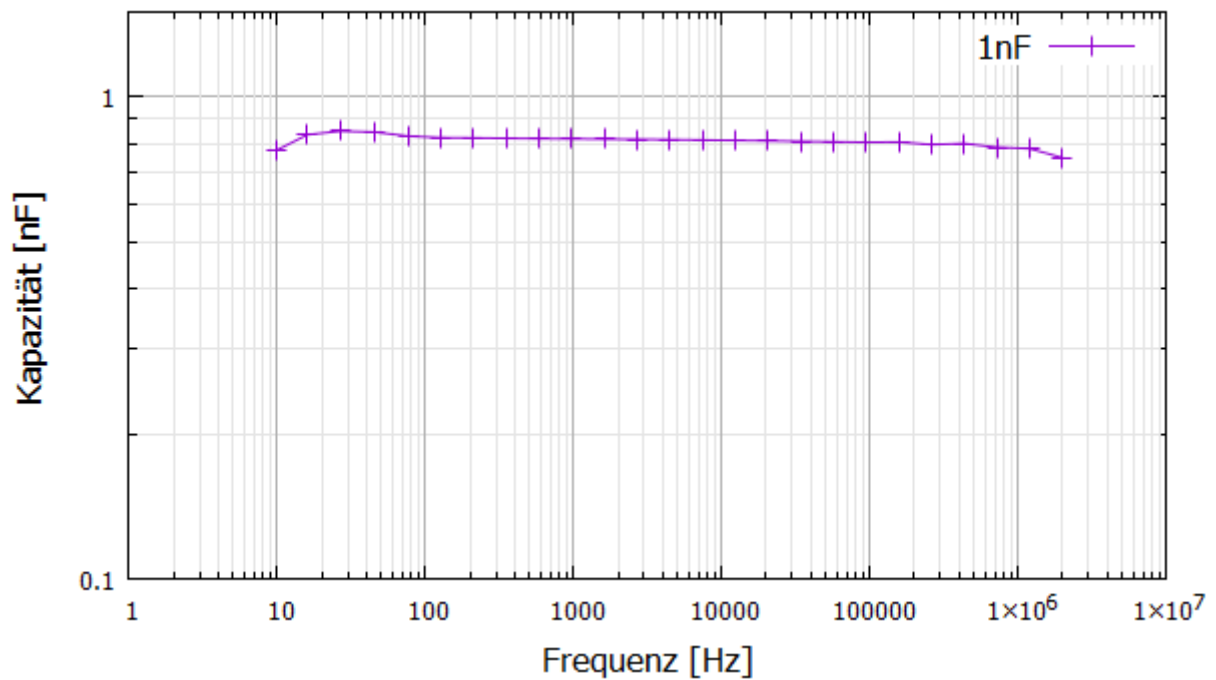


Abb. 2.3: Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Zeit



## 3 Durchgangswiderstand und Oberflächenwiderstand

### 3.1 Grundlagen

Der Durchgangswiderstand gibt das Isolationsverhalten eines Dielektrikums an, die Kenngröße wird in  $\Omega\text{m}$  gemessen. Der Oberflächenwiderstandes entsteht durch einen, dünnen äußeren, Film an der Oberfläche eines Materials. Der Widerstand wird in  $\Omega$  angegeben. Mann unterscheidet zwei Gruppen von Isolatoren:

#### **Elektronenleiter**

Elektronen Leiter werden auch als Leiter 1. Klasse bezeichnet. Zu ihnen gehören Metalle und ihre verschiedene Legierungen sowie die Halbleiter.

#### **Ionenleiter**

Ionenleiter werden auch Leiter 2. Klasse bezeichnet. Bei Ionenleitern spielt die elektrolytische Leitfähigkeit eine wesentliche Rolle. Beispiele für Ionenleiter sind Wasser und Salze.

Durch die angelegte Spannung von 500 V werden die Ionen in Richtung der entgegengesetzten Ladungsoberfläche gezogen, was einen dauerhaften Anstieg des Widerstands führt. Da durch die Dipolbindung die Ladungsträger weniger werden, somit der Stromfluss auch geringer wird. Um die

Proben vergleichen zu können, soll man daher die Proben jeweils gleichlange Messen.

### 3.2 Aufgabenstellung

Es sollen 5 verschiedene Dielektriker gemessen werden, davon jeweils der Durchgangswiderstand und der Oberflächenwiderstand. Darauf ist zu achten, das bei jeder Messung zeitlich, 30 s, gleichlang gemessen wird. Die Proben sind: Plexiglas, PVC, Teflon, Phenolharz, Polypropylen

### 3.3 Durchgangswiderstand

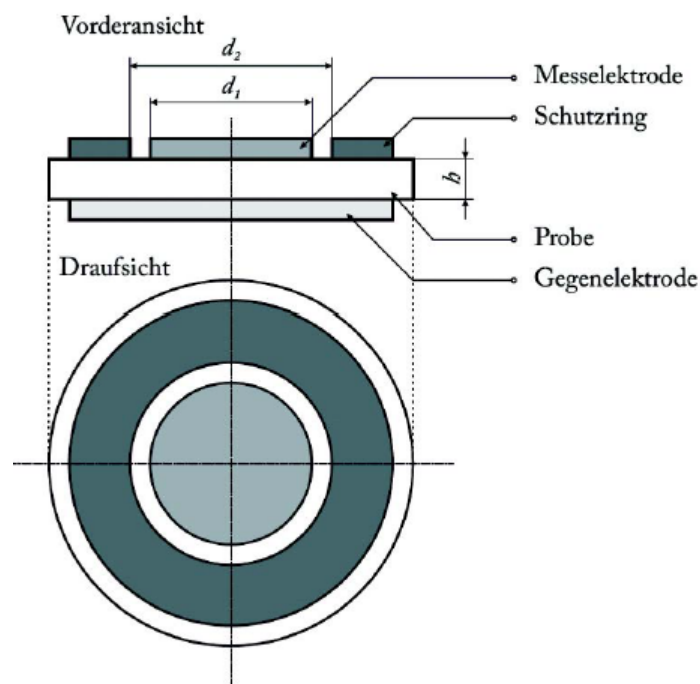


Abb. 3.1: Elektrodenanordnung der Messzelle

### 3.3.1 Messaufbau

Für die Messung wird das Ohmmeter MILLI-TO 2 Dr.Thiedig verwendet. Dieses Messgerät hat eine 500 V Gleichspannungsquelle und ein integriertes Amperemeter. Der Messbereich für Widerstände reicht bis 200 TOhm. Für die Messung wird eine Elektrodenanordnung verwendet, wie in Abb. 3.1 zu sehen. Der Schutzring dient hierbei als eliminator parasitärer Oberflächenströme. Die Schaltung zum Messen des Durchgangswiderstandes sieht man in Abb. 3.2

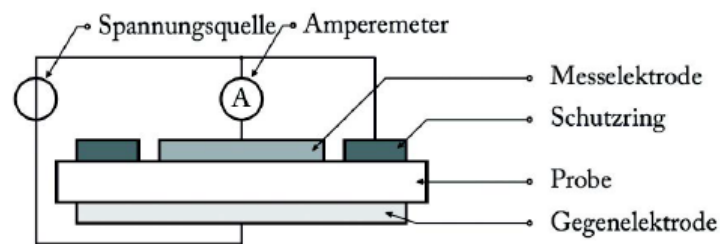


Abb. 3.2: Schaltung zum bestimmen des Durchgangswiderstandes

### 3.3.2 Messergebnisse

Die Widerstände von PTFE und Polypobylen befanden sich außerhalb des Messbereiches des Messgerätes.

| Probe (Dicke)         | $R_D$ in $\Omega$ | $\rho_D$ in $\Omega\text{m}$ |
|-----------------------|-------------------|------------------------------|
| PMMA (3 mm)           | $171,5 * 10^{12}$ | $2,22 * 10^{15}$             |
| PVC (5 mm)            | $14 * 10^{13}$    | $1,09 * 10^{15}$             |
| PTFE(5,3 mm)          | —                 | —                            |
| Phenolharz (3 mm)     | $21,5 * 10^9$     | $2,78 * 10^{11}$             |
| Polypropylen (6,9 mm) | —                 | —                            |

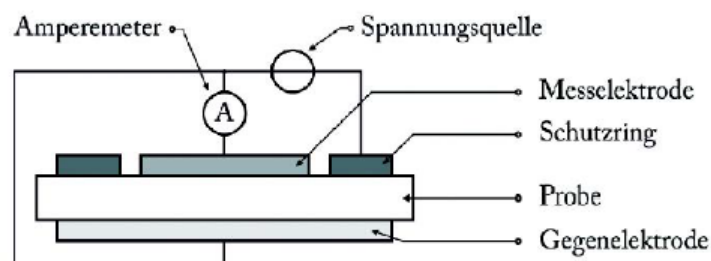
Tab. 3.1: gemessener und spezifischer Durchgangswiderstände

Ein besonderes Augenmerk, muss man auf die Anordnung und Verlegung der Messleitungen legen, da es zu bemerkbaren Veränderungen des Widerstandes kommen kann, wenn sich eine Leitung in direkten Kontakt mit einer Oberfläche anderen Potentials befinden. Die berechneten spezifischen Widerstände aus Tab. 3.1 sind in der Größenordnung denen aus Tabelle 2.4 des Laborskriptums [1] ähnlich, dass heißt, die Zehnerpotenzen stimmen überein.

## 3.4 Oberflächenwiderstand

### 3.4.1 Messaufbau

Für die Messung wird wieder das Ohmmeter MILLI-TO 2 Dr.Thiedig verwendet. Die Elektrodenanordnung bleibt die selbe wie beim Messaufbau des Durchgangswiderstandes. Nur diesmal hat der Schutzring die Funktion einer Messelektrode. Die Schaltung, zum Messen des Durchgangswiderstandes, sieht man in Abb 3.3



**Abb. 3.3:** Schaltung zum bestimmen des Oberflächenwiderstandes

### 3.4.2 Messergebnisse

| Probe (Dicke)        | $R_S$ in $\Omega$ | $\rho_S$ in $\Omega\text{m}$ |
|----------------------|-------------------|------------------------------|
| PMMA (3mm)           | $3,48 * 10^{12}$  | $6.87 * 10^{14}$             |
| PVC (5mm)            | $2,57 * 10^{12}$  | $5.08 * 10^{14}$             |
| PTFE(5,3mm)          | $5,34 * 10^{12}$  | $1.05 * 10^{15}$             |
| Phenolharz (3mm)     | $168 * 10^9$      | $3.32 * 10^{13}$             |
| Polypropylen (6,9mm) | $28,6 * 10^9$     | $5.65 * 10^{12}$             |

**Tab. 3.2:** gemessener und spezifischer Oberflächenwiderstände

Wie auch beim Messen des Durchgangswiderstandes, liegt hier ein Augenmerk auf der Verlegung der Messleitungen, diese sollten wie zuvor keinen direkten Kontakt mit einer Oberfläche anderen Potentials aufnehmen. Die Messwerte zeigen eine Abweichung von einer Zehnerpotenz, im Vergleich zu Tabelle 2.4 des Laborskriptums [1].

# Abbildungsverzeichnis

|     |                                                                                       |    |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Abhängigkeit der Durchschlagsspannung gegenüber der Luftspaltlänge von Luft . . . . . | 5  |
| 1.2 | Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Zeit . . .                              | 8  |
| 2.1 | Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Zeit . . .                              | 11 |
| 2.2 | Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Zeit . . .                              | 15 |
| 2.3 | Abhängigkeit der angelegten Spannung über die Zeit . . .                              | 15 |
| 3.1 | Elektrodenanordnung der Messzelle . . . . .                                           | 17 |
| 3.2 | Schaltung zum bestimmen des Durchgangswiderstandes . .                                | 18 |
| 3.3 | Schaltung zum bestimmen des Oberflächenwiderstandes . .                               | 19 |