

# ELEKTRONISCHES LABORHEFT

4 - Ø80002

AHMED DJELASSI

INHALTSANGABE AUF SEITE 14

ZWEITES PHYSIKALISCHES GRUNDPRAKTIKUM

GRUPPE C2-5

LMU MÜNCHEN

11.08 - 09.09 2025

|                                       |                |
|---------------------------------------|----------------|
| LMU München<br>Physikalische Praktika |                |
| Versuch:                              | ESIK           |
| Datum:                                | 19.08.2025     |
| Betreuer:                             | Xusk Jon Leong |

|                                       |         |
|---------------------------------------|---------|
| LMU München<br>Physikalische Praktika |         |
| Versuch:                              | OSZ     |
| Datum:                                | 21.8.25 |
| Betreuer:                             |         |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| LMU München<br>Physikalische Praktika |           |
| Versuch:                              | V.D0      |
| Datum:                                | 26.8.     |
| Betreuer:                             | St. Lahme |

|                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| LMU München<br>Physikalische Praktika |          |
| Versuch:                              | MAG      |
| Datum:                                | 28.8.25  |
| Betreuer:                             | F. Reckl |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| LMU München<br>Physikalische Praktika |            |
| Versuch:                              | APW        |
| Datum:                                | 02.09.2025 |
| Betreuer:                             | Heiber     |

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| LMU München<br>Physikalische Praktika |           |
| Versuch:                              | TEP       |
| Datum:                                | 05.09     |
| Betreuer:                             | Zhang Niu |

BITTE NUTZEN SIE DIE SEITENZHÄLLEN ZUR NAVIGATION, und oder öffnen Sie das Dokument in einer Latex oberfläche.

## 0.1 Teilversuchsziele

### 0.1.1 ESK-Elektrische Stromkreise

Edmund-Rumpler-Straße 9

:

Elementare Mess- und Schaltungstechniken an GLEICHSTROMKREISEN.

Zur

anschaung des Ohmschen Gesetzes und der Kirschhoffsschen sätze.

### Erster Teilversuch zur Belastungsabhängigkeit zweier Spannungsquellen

**Ziel:** Die Untersuchen von Eigenschaften von Spannungsquellen anhand ihrer Ausgangsapnnung in abhängigkeit von der Belastungsstromstärke.

**Methode:** Messung der Ausgangsspannung einer galvanischen Zelle und ermittelung des Innenwiderstandes anhand des Ohmischengesetz mitels der Belastungsstromstärke.

### Zweiter Teilversuch zur Bestätigung des Ohmischen Gesetzes

**Ziel:** Nach dem Ohmischen Gesetz ist  $I \propto U$  bestätige durch Multimetermessungen.

**Methode:** Die Steigung der  $\frac{\text{Spannung}}{\text{Belastungsstromstärke}}$  liefert den Innenwiderstand eines Verbrauchers.

### Dritter Teilversuch zum Potentiometer

**Ziel:** Messung des Spezifischen Widerstand eines Drahts und eines Wendelpotentionmeters.

**Methode:** Spannungsmessung bei variirter lange

### Vierter Teilversuch zur Spannungsmessung durch Kopmensation

**Ziel:** Messen unbekannter Spannungen und Nutzung eines Spannung normals.

**Methode:** Die Erzeugung eines Referenzstroms um unbekannte Spannungen vom Spannungnormal und der Galvanischen Zelle zu messen.

### Fünfter Teilversuch zur Bestätigung der Kirschhoffsschen Sätze

**Ziel:** Nachweis des Kirschhoffsschen Knoten- und Maschensatz.

**Methode:** Aufbau einer Testschaltung mit seriell und parallel geschalteten Widerständen.

## **0.1.2 OSZ-Wechselspannungen und aperiodische Vorgänge**

Edmund-Rumpler-Straße 9

Schwerpunkte:

Elementare Mess- und Schaltungstechniken mit dem OSZILLOSKOP.

Zur

anschaulichen Untersuchung von Wechselspannungen,  
Phasendifferenzen und aperiodischen Vorgängen.

### **Erster Teilversuch zu den Basisbedienelementen des Oszilloskops**

**Ziel:** Verstehen der Grundfunktionen eines Oszilloskops zur Darstellung zeitlich periodischer Spannungen.

**Methode:** Untersuchung der Bedienungselemente und erlangen einesverständnis zum Ablenkfaktor und den Triggereinstellungen.

### **Zweiter Teilversuch zur Amplitudenmessung**

**Ziel:** Aufbau eines Verständnisses zur Cursor Bedienfläche

**Methode:** Ausmessen der Amplitude am Oszilloskop.

### **Dritter Teilversuch zur Phasendifferenzmessung**

**Ziel:** Bestimmung der Phasendifferenz zweier gleichfrequenter Wechselspannungen.

**Methode:** Vergleich der Signalverläufe auf dem Oszilloskop und Berechnung der Phasendifferenz.

### **Vierter Teilversuch zum Auf- und Entladevorgang eines Kondensators**

**Ziel:** Analyse der periodischen Lade- und Entladekurven eines Kondensators.

**Methode:** Anregung des Kondensators mit einem Funktionsgenerator und Beobachtung mit dem Oszilloskop.

### **Fünfter Teilversuch zur quantitativen Registrierung der Entladekurve**

**Ziel:** Quantitative Untersuchung eines einmaligen Entladevorgangs eines Kondensators.

**Methode:** Aufzeichnung mithilfe der Speicherfunktion des Oszilloskops und anschließende Analyse.

### 0.1.3 VPO-Vierpole

Edmund-Rumpler-Straße 9

Schwerpunkte:

Elementare Mess- und Schaltungstechniken an VIERPOLEN.

Zur

anschaulichen Untersuchung frequenzabhängiger Eigenschaften und Signalübertragung.

#### Erster Teilversuch zum Verhalten einfacher Bauelemente im Wechselstromkreis

**Ziel:** Beobachtung der frequenzabhängigen Größen Strom, Spannung und Phasenverschiebung an Widerstand, Kondensator und Spule.

**Methode:** Messung von Strom- und Spannungsverläufen bei Variation der Frequenz und Vergleich mit den theoretischen Phasenbeziehungen.

#### Zweiter Teilversuch zum Frequenzverhalten von Hoch- und Tiefpass

**Ziel:** Veranschaulichung der Funktionsweise von Hoch- und Tiefpassfiltern.

**Methode:** Untersuchung der Signalübertragung bei unterschiedlichen Frequenzen und Nachweis der Filterwirkung.

#### Dritter Teilversuch zur Resonanzkurve eines Serienschwingkreises

**Ziel:** Quantitative Ermittlung der Resonanzkurve eines Serienschwingkreises.

**Methode:** Aufzeichnung der Spannungs- oder Stromamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz und Bestimmung der Resonanzfrequenz sowie der Güte.

#### Vierter Teilversuch zur Differenzier- und Integrierschaltung

**Ziel:** Beobachtung der zeitlichen Spannungsverläufe von Vierpolen (Integrierer und Differenzierer).

**Methode:** Einspeisung von Rechteck- und Sinussignalen und Analyse der Ausgangssignale zur Bestätigung des erwarteten Verhaltens.

## 0.1.4 MAG-Magnetisches Feld

Edmund-Rumpler-Straße 9

Schwerpunkte:

Elementare Mess- und Schaltungstechniken zu dem MAGNETSCHEN FELD.

Zur

anschaulichen Untersuchung von Magnetfeldern,  
Drehmomenten und Induktionsphänomenen.

### Erster Teilversuch: Smartphoneexperiment zur Bestimmung des Magnetfelds einer Leiterschleife

**Ziel:** Einführung in die Untersuchung von Magnetfeldern durch Messung des Magnetfelds einer Leiterschleife sowie der Inklination des Erdmagnetfeldes.

**Methode:** Nutzung der Sensoren eines Smartphones in Kombination mit der Phyphox-App zur Datenerfassung.

### Zweiter Teilversuch: Sichtbarmachen der Magnetfeldlinien mit Eisenspänen

**Ziel:** Qualitative Darstellung von Magnetfeldlinien.

**Methode:** Streuen beweglicher Eisenspäne in eine Ebene parallel zur Feldspulenachse und Beobachtung ihrer Ausrichtung entlang der Feldlinien.

### Dritter Teilversuch: Drehmoment auf eine stromdurchflossene Spule

**Ziel:** Untersuchung des Drehmoments, das ein Magnetfeld auf eine stromdurchflossene Spule ausübt, in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Spulenachse und Feldrichtung.

**Methode:** Induktion einer Spannung durch Drehung einer Spule in einem konstanten Magnetfeld zur Registrierung des zeitlichen Verlaufs der induzierten Spannung.

### Vierter Teilversuch: Induktion durch Drehen einer Spule im Magnetfeld

**Ziel:** Nachweis der Induktion einer Spannung durch Bewegung einer Spule in einem konstanten Magnetfeld.

**Methode:** Drehung einer Spule, Registrierung des zeitlichen Verlaufs der induzierten Spannung und Bestimmung der Feldstärke aus Messwerten und Spulengeometrie.

### Fünfter Teilversuch: Induktion durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld

**Ziel:** Untersuchung der Induktion in einer stationären Spule durch ein zeitlich variables Magnetfeld. Überprüfung des Induktions Gesetzes.

**Methode:** Registrierung des zeitlichen Verlaufs der Feldstärke und der induzierten Spannung, Nachweis der Proportionalität der Induktionsspannung zur negativen Zeitableitung der Feldstärke.

## 0.1.5 APW-Ausgewählte Phänomene aus der Wärmelehre

Edmund-Rumpler-Straße 9

Schwerpunkte:

Elementare Mess- und Schaltungstechniken zur WÄRMELEHRE.

Zur

anschaulichen Untersuchung von Wärmekapazität,

Phasenübergängen, Dampfdruck und Wärmestrahlung.

### Erster Teilversuch: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern

**Ziel:** Bestimmung der Wärmekapazität verschiedener Körper und Vergleich mit der Theorie von Dulong und Petit.

**Methode:** Durchführung kalorimetrischer Messungen.

### Zweiter Teilversuch: Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern

**Ziel:** Nachweis der Grenze der Dulong-Petitschen Regel bei tiefen Temperaturen.

**Methode:** Abkühlung der Proben mit flüssigem Stickstoff und Messung der Wärmekapazität.

### Dritter Teilversuch: Gefriervorgang von Wasser

**Ziel:** Untersuchung des Phasenübergangs beim Gefrieren von Wasser.

**Methode:** Abkühlung unter den Schmelzpunkt und Aufnahme eines Temperatur-Zeit-Diagramms.

### Vierter Teilversuch: Dampfdruckkurve von Wasser

**Ziel:** Überprüfung der Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks von Wasser.

**Methode:** Messung des Dampfdrucks in einem geschlossenen Gefäß und Vergleich mit der theoretischen Exponentialabhängigkeit.

### Fünfter Teilversuch: Strahlung eines Schwarzen Strahlers

**Ziel:** Bestätigung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes.

**Methode:** Messung der Abstrahlungsleistung eines Schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur.

### Sechster Teilversuch: Wärmeleitung mit der Wärmebildkamera

**Ziel:** Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit eines Festkörpers.

**Methode:** Untersuchung der Wärmeleitung in einem Stahlblock mithilfe einer Wärmebildkamera.

## 0.1.6 TEP-Thermodynamische Prozesse

Edmund-Rumpler-Straße 9

Schwerpunkte:

Zustandänderungen an einem IDEALEN GAS.

Zur

untersuchung der Idealen Gasgesetze.

### Erster Teilversuch zur Isothermen Kompression

**Ziel:** Bestätigung des Gesetzes von Boyle-Mariotte

**Methode:** Beobachtung der Expansion entlang der Isobaren.

Messung des Drucks mit konstanter Teilchenzahl und der Temperatur als funktion vom Volumen.

### Zweiter Teilversuch zur Isochoren Druck erhöhung

**Ziel:** Bestätigung des Gesetzes von Amontons. Extrapolation des Absoluten Nullpunkts.

**Methode:** Messung des Drucks als funktion der Temperatur mit konstanten Volumen und Teilchenzahl.

### Dritter Teilversuch zur Isothermen Kompression

**Ziel:** Bestätigung des Gesetzes von Boyle-Mariotte

**Methode:** Beobachtung der Kompression entlang der Isobaren.

Messung des Drucks mit konstanter Teilchenzahl und der Temperatur als funktion vom Volumen.

### Vierter Teilversuch zur Isobaren Expansion

**Ziel:** Bestätigung des Gesetzes von Amontons. Extrapolation des Absoluten Nullpunkts.

**Methode:** Messung des Drucks als funktion der Temperatur mit konstanten Volumen und Teilchenzahl.

### Fünfter Teilversuch zur Adiabatischen Zustandsänderung

**Ziel:** Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft.

**Methode:** Messung der Schwingungsdauer innerhalb einer wasser säule in einem U-Rohr mit eingeschlossener Luftpumpe.

## 0.2 Begriffsglossar

*ESK*

|   |      |
|---|------|
| Elektrische Stromstärke                   | href |
| Elektrische Feldstärke                    | href |
| Elektrisches Potential                    | href |
| Elektrische Spannung                      | href |
| Ohmischer Leiter                          | href |
| Spannungsmessung                          | href |
| Dual-Slope                                | href |
| Spannungsabfall                           | href |
| Spannungsteilung                          | href |
| Potentiometer                             | href |
| Multimeter                                | href |
| Quellspannung                             | href |
| Klemmspannung                             | href |
| Innenwiderstand                           | href |
| Kompensationsordnung nach Du Bois-Reymond | href |
| Nullinstrument                            | href |
| Spannungsnormal                           | href |
| Kalibrierung und Normierung               | href |
| Kirschhoffscher Maschensatz               | href |
| Kirschhoffscher Kontensatz                | href |

*OSZ*

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| Kurzzeit messungen               | href |
| Bildröhre                        | href |
| Zeitablenkung                    | href |
| Sägezahnspannung                 | href |
| Trigger                          | href |
| Stehende Bilder                  | href |
| Eingangskopplung AC/DC/GND       | href |
| Sinus-Spannung                   | href |
| Kreisfrequenz                    | href |
| Effektivwert                     | href |
| Lissajous-Ellipse                | href |
| Aufladevorgang eines Kondensator | href |
| Entladevorgang eines Kondensator | href |
| Relaxationszeit                  | href |
| +                                | href |

## VPO

|   |      |
|---|------|
| Komplexe Wechselspannung                                | href |
| Zeigerdiagramm  | href |
| Ohmische Gesetz für A(C)-Ströme                         | href |
| Impedanz  | href |
| Phasenverschiebungen, Widerstand, Kondensator und Spule | href |
| Serienschwingkreis-Schaltung                            | href |
| Impedanz des Serienschwingkreis                         | href |
| Resonanz  | href |
| Dämpfung durch Phasenverschiebung                       | href |
| Vierpole  | href |
| Pegelmaß, Übertragungsverhältnis                        | href |
| Tiefpass  | href |
| Grenzfrequenz   | href |
| Übertragungsverhältnis                                  | href |
| Differenzierer-Schaltung                                | href |
| Integrierer-Schaltung                                   | href |
| +   | href |

## MAG

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| Magnetfeld                           | href |
| Amperesches Durchflutungsgesetz      | href |
| Gesetz von Biot und Savart           | href |
| Helmholtzspulenpaar                  | href |
| Kräfte im Stromdurchflossenen Leiter | href |
| Magnetisches Drehmoment              | href |
| Magnetisches Dipolmoment             | href |
| Induktionsspannung                   | href |
| Lorentz-Kraft                        | href |
| Magnetischer Flussdichtevektor       | href |
| Erweitertes Induktionsgesetz         | href |
| Allgemeines Induktionsgesetz         | href |
| +                                    | href |

|   |      |
|---|------|
| Wärme   | href |
| Temperatur  | href |
| Wärmekapazität  | href |
| Spezifische Wärmekapazität  | href |
| Kaloriometrie   | href |
| Regel von Dulong und Petit  | href |
| Extrapolationsverfahren   | href |
| Molekulare Vorgänge an der Oberfläche einer Flüssigkeit                   | href |
| Zustandekommen des Dampfdrucks  | href |
| Dampfdruckkurve   | href |
| Spezifische Ausstrahlung  | href |
| Schwarzkörper   | href |
| Planksche Strahlungsgesetz  | href |
| Stefan-Boltzmann-Gesetz   | href |
| Prinzipielle Anordnung zur Bestimmung einer Wärmekapazität                | href |
| Wasserwert; Grundprinzip der Bestimmung der spezifischen Wärmekapazitäten | href |
| Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern                 | href |
| Extrapolationsverfahren   | href |
| Experimentelle Bestimmung der Wärmekapazität eines Festkörpers            | href |
| Abhängigkeit des Dampfdrucks von der Temperatur                           | href |
| Experimentelle Anordnung zur Bestimmung der Dampfdruckkurve               | href |
| Ursache der Wärmestrahlung  | href |
| Ausstrahlung eines geheizten Hohlraums                                    | href |
| Experimenteller Aufbau zur Überprüfung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes      | href |
| Experimenteller Nachweis der Temperaturabhängigkeit                       | href |
| <i>TEP</i>  |      |
| Ideales Gas   | href |
| Volumen, Druck, Temperatur und Teilchenzahl                               | href |
| Isotherm  | href |
| Gesetz von Boyle-Mariotte   | href |
| Isochore  | href |
| Gesetz von Amontons   | href |
| Isobare   | href |
| Gesetz von Gay-Lussac   | href |
| +   | href |

### 0.3 Referenzierte

### Inhalte

#### Versuchsanleitungen

|   |                           |                      |
|---|---------------------------|----------------------|
| Elektrische Stromkreise                                     | 02-September-2020 [V-ESK] |                      |
| V-ESK(Versuchsanleitung)-Abbildungsverzeichniss: VA#        |                           | 3,7-29               |
| Wechselspannungen und aperiodische Vorgänge (Oszilloskop I) | 29. Juli 2022 [V-OSZ]     |                      |
| V-OSZ(Versuchsanleitung)-Abbildungsverzeichniss: VA#        |                           | 1,8,9,11,15,16,22-24 |
| Vierpole (Oszilloskop II)                                   | 9. August 2022 [V-VPO]    |                      |
| V-VPO(Versuchsanleitung)-Abbildungsverzeichniss: VA#        |                           | 1,9,13,21-26         |
| Magnetisches Feld   | 8. August 2023 [V-MAG]    |                      |
| V-MAG(Versuchsanleitung)-Abbildungsverzeichniss: VA#        |                           | 1,3,5,11,13,14       |
| Ausgewählte Phänomene der Wärmelehre                        | 16. Juli 2024 [V-APW]     |                      |
| V-APW(Versuchsanleitung)-Abbildungsverzeichniss: VA#        |                           | 2-7,10-13            |
| Thermodynamische Prozesse                                   | 31. Juli 2025 [V-TEP]     |                      |
| V-TEP(Versuchsanleitung)-Abbildungsverzeichniss: VA#        |                           | 5-9,12-16            |

#### Literaturverzeichnis

[GER] MESCHEDE, D.:

Gersten Physik Springer Spektrum 2015  
GER-Abbildungsverzeichniss # ISBN: 978-3-662-45977-5  
8-50abc,48,42,41,40ab,40

[PHE] THUSELT, F.:

Physik der Halbleiterbauelemente Springer 2018 ISBN: 978-3-662-57637-3

[DOS] KLEIN, P.:

Das Oszilloskop Franzis-Verlag-München 1978  
DOS-Abbildungsverzeichniss # ISBN: 3-7723-6481-0  
2.4

[NPG] E.K.S.:

Das neue Physikalische Grundpraktikum Springer 2016  
NPG-Abbildungsverzeichniss # ISBN: 978-3-662-49023-5  
26.9

[STI] STIERSTADT, K.:

Thermodynamik d. Ba.s. Springer 2018 ISBN: 978-3-662-55715-0  
STI-Abbildungsverzeichniss # 8.1

[TAE] HOROWITZ, P. HILL, W.:

The Art of Electronics Cambridge University Press 2015 ISBN: 978-0-521-80926-9  
TAE-Formelverzeichniss # 1.22

#### Verwendete

#### Software

|                      |  |
|----------------------|--|
| TexShop              | LaTeX-Editor für macOS (Download: 2024)                                |
| ChatGPT              | Unterstützung bei Text- erstellung und -formatierung. (Download: 2025) |
| LTspice              | Simulation von elektrischen Schaltungen (Download: eQ2 2025)           |
| PyCharm (Py-V 3.9.6) | Skizzierung von Exponentialfunktionen (Download: 2024)                 |

## 0.4 Anhänge und Ergebnisse

### ESK

LTspice Kirchhoff LTspice-Simulation, Schaltplan und Strommessung (ZIP-Datei)

#### 0.4.1 ESK-Ergebnisse siehe 109

##### Belastungsabhängigkeit zweier Spannungsquellen:

Die Klemmenspannung  $U_{Mult}$  der galvanischen Zelle fällt mit steigendem Belastungsstrom  $I_{Bel}$  linear ab, was den Einfluss des Innenwiderstandes verdeutlicht. Die Leerlaufspannung entspricht dem Stromfluss von  $I_{Bel} = 0$  und stellt den temporär maximalen Wert der Zellspannung dar.

##### Ohmsches Gesetz:

Die gemessenen Widerstandswerte aus Tabelle, Multimeter und Berechnung stimmen innerhalb der begründeten Messunsicherheiten überein. Die Steigung der  $U-I$ -Geraden liefert einen präzisesten Wert für den Widerstand, da Messfehler über mehrere Messpunkte geglättet werden.

##### Spannungsabfall und Potentiometer:

Der Spannungsabfall  $U_{\Delta L}$  entlang des Drahtes steigt linear mit zunehmender Drahtlänge, was die Homogenität des Drahtmaterials bestätigt. Die Messung bestätigt das Ohmsche Gesetz, da  $U = \rho \frac{L}{A} \cdot I$  proportional zur Drahtlänge ist.

##### Spannungsmessung durch Kompensation:

Die Kompensationsmessung liefert für die galvanische Zelle eine Spannung von  $U_{KagZ} = (1,347 \pm 0,002) \text{ V}$ , was den gemessenen Leerlaufwert mit einer Genauigkeit von 1 mV entspricht.

##### Bestätigung der Kirchhoffschen Sätze:

Die gemessenen Ströme erfüllen die Kirchhoffschen Knoten- und Maschensätze innerhalb der Messfehler mit Ausnahme von allen Maschen an den der Verbraucher  $R_4$  beteiligt ist, hier ist die Spannungsmessung Polungsumgekehrt gemessen worden, das wurde mit einer Simulation bestätigt.

#### 0.4.2 OSZ-Ergebnisse siehe 126

**Basiselemente**

**des**

**Oszilloskops:**

Die Ablenkfaktoren *time/div* und *volt/div* wurden zusammen mit den Trigger-Funktionen ausprobiert.

**Messen**

**einer**

**Amplitude:**

Der Vergleich zwischen Multimeterwert und Oszilloskop-Effektivwert zeigt eine Übereinstimmung im Rahmen der Messgenauigkeit.

**Messen**

**einer**

**Phasendifferenz:**

Im Experiment wurde der Aufbau qualitativ nachvollzogen. Anschließend wurde eine Lücke in der Messreihe festgestellt, welche durch Annahme gleicher Bedingungen ergänzt wurde. Mit den so vorliegenden Messwerten konnte die Phasengleichheit der y-t- und der x-y-Methode über die Lissajous-Ellipse bestätigt werden.

**Betrachten des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators:**

Der Versuch beinhaltete die qualitative Betrachtung der genannten Vorgänge sowie die Identifizierung ihrer Verläufe. Abgeleitet wurde, dass die Relaxationszeit durch Veränderung der RC-Größen variabel ist.

**Messen der Relaxationszeit bei der Entladung eines Kondensators:**

Aufgrund des Ausbleibens des erwarteten linearen Verlaufs wurde auf eine theoretische Auswertung zurückgegriffen. Hierbei konnten Herstellerangaben anhand der Anfangsspannung bestätigt werden.

**0.4.3 VPO-Ergebnisse siehe 136**

0.4.4 MAG-Ergebnisse siehe 142

**0.4.5 APW-Ergebnisse siehe ??**

**0.4.6 TEP-Ergebnisse siehe 154**

## 0.5 Inhaltsangabe

|          |   |                              |
|----------|---|------------------------------|
| 0.1      | TEILVERSUCHSZIELE . . . . .   | 2                            |
| 0.1.1    | ESK-ELEKTRISCHE STROMKREISE . . . . .                                     | 2                            |
| 0.1.2    | OSZ-WECHSELSPANNUNGEN UND APERIDOISCHE VORGÄNGE . . . . .                 | 3                            |
| 0.1.3    | VPO-VIERPOLE . . . . .  | 4                            |
| 0.1.4    | MAG-MAGNETISCHES FELD . . . . .   | 5                            |
| 0.1.5    | APW-AUSGEWÄHLTE PHÄNOMENE AUS DER WÄRMELEHRE . . . . .                    | 6                            |
| 0.1.6    | TEP-THERMODYNAMISCHE PROZESSE . . . . .                                   | 7                            |
| 0.2      | Begriffsglossar . . . . .   | 8                            |
| 0.3      | Referenzierte Inhalte . . . . .   | 11                           |
| 0.4      | Anhänge und ERGEBNISSE . . . . .  | 12                           |
| 0.4.1    | ESK-ERGEBNISSE siehe 109 . . . . .  | 12                           |
| 0.4.2    | OSZ-ERGEBNISSE siehe 126 . . . . .  | 12                           |
| 0.4.3    | VPO-ERGEBNISSE siehe 136 . . . . .  | 13                           |
| 0.4.4    | MAG-ERGEBNISSE siehe 142 . . . . .  | 13                           |
| 0.4.5    | APW-ERGEBNISSE siehe ?? . . . . .   | 13                           |
| 0.4.6    | TEP-ERGEBNISSE siehe 154 . . . . .  | 13                           |
| 0.5      | Inhaltsangabe . . . . .   | 14                           |
| <b>1</b> | <b>Vorbereitung und Grundlagen</b>  | <b>17</b>                    |
| 1.1      | ESK   | Versuchstermin 19.08.2025 18 |
| 1.2      | OSZ   | Versuchstermin 21.08.2025 22 |
| 1.3      | VPO   | Versuchstermin 26.08.2025 29 |
| 1.4      | MAG   | Versuchstermin 28.08.2025 34 |
| 1.5      | APW   | Versuchstermin 02.09.2025 41 |
| 1.6      | TEP   | Versuchstermin 05.09.2025 45 |
| <b>2</b> | <b>Experiment Durchführungen</b>  | <b>51</b>                    |
| 2.1      | Durchführung  |                              |
|          | zum Gleichstrom Kreis . . . . .   | 51                           |
| 2.1.1    | BELASTUNGABHÄNGIGKEIT ZWEIER SPANNUNGSQUELLEN . . . . .                   | 53                           |
| 2.1.2    | BESTÄTIGUNG DES OHMISCHEN GESETZ . . . . .                                | 55                           |
| 2.1.3    | SPANNUNGSABFALL UND POTENTIOMETER . . . . .                               | 57                           |
| 2.1.4    | SPANNUNGSMESSUNG DURCH KOMPENSATION . . . . .                             | 60                           |
| 2.1.5    | BESTÄTIGUNG DER KIRCHHOFFSCHEN SÄTZE . . . . .                            | 61                           |
| 2.2      | Durchführung zum Oszilloskop und der Wechselspannung . . . . .            | 63                           |
| 2.2.1    | BASISELEMENTE DES OSZILLOSKOPS . . . . .                                  | 65                           |
| 2.2.2    | MESSEN EINER AMPLITUDE . . . . .  | 66                           |
| 2.2.3    | MESSEN EINER PHASENDIFFERENZ . . . . .                                    | 66                           |
| 2.2.4    | BETRachten DES AUF- UND ENTLADEVORGANGS EINES KONDENSATORS . . . . .      | 68                           |
| 2.2.5    | MESSEN DER RELAXATIONSZEIT BEI DER ENTLADUNG EINES KONDENSATORS . . . . . | 69                           |
| 2.3      | Durchführung zur Vierpol-Schaltung . . . . .                              | 71                           |
| 2.3.1    | QUALITATIVE UNTERSUCHUNG EINZELNER SCHALELEMENTE . . . . .                | 71                           |
| 2.3.2    | FREQUENZVERHALTEN EINES RC-HOCH- UND TIEFPASSFILTER . . . . .             | 73                           |
| 2.3.3    | RESONANZKURVE EINES SERIENSCHWINGKREIS . . . . .                          | 75                           |
| 2.3.4    | DIFFERENZIER- UND INTEGRIERSCHALTUNG . . . . .                            | 77                           |
| 2.4      | Durchführung zum Magnet Feld . . . . .                                    | 79                           |

|          |  |                                  |
|----------|--|----------------------------------|
| 2.4.1    | EIGENREGIE-TEILVERSUCH: SMARTPHONEEXPERIMENT ZUR BESTIMMUNG DES MAGNETFELDS EINER LEITERSCHLEIFE (DURCHFÜHRUNG VORAB ZU HAUSE) . . . . . | 81                               |
| 2.4.2    | SICHTBARMACHEN DER MAGNETFELDLINIEN MIT HILFE VON EISENSPÄNEN . . . . .  | 82                               |
| 2.4.3    | DREHMOMENT DES FELDES AUF EINE STROMDURCHFLOSSENE SPULE . . . . .  | 83                               |
| 2.4.4    | INDUKTION DURCH DREHEN EINER SPULE IN EINEM MAGNETFELD . . . . .   | 85                               |
| 2.4.5    | INDUKTION DURCH EIN ZEITLICH VERÄNDERLICHES MAGNETFELD . . . . .   | 86                               |
| 2.5      | Durchführung der Phänomene aus der Wärmelehre . . . . .  | 89                               |
| 2.5.1    | ERSTER TEILVERSUCH: BESTIMMUNG DER WÄRMEKAPAZITÄTEN VON FESTKÖRPERN . . . . .  | 91                               |
| 2.5.2    | ZWEITER TEILVERSUCH: TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER WÄRMEKAPAZITÄT VON FESTKÖRPERN . . . . .   | 93                               |
| 2.5.3    | DRITTER TEILVERSUCH: GEFRIERVORGANG VON WASSER . . . . .   | 94                               |
| 2.5.4    | VIERTER TEILVERSUCH: DAMPFDRUCKKURVE VON WASSER . . . . .  | 96                               |
| 2.5.5    | FÜNFTER TEILVERSUCH: STRAHLUNG EINES SCHWARZEN STRAHLERS . . . . .   | 100                              |
| 2.6      | Durchführung der Thermodynamischen Prozesse . . . . .  | 101                              |
| 2.6.1    | ISOTHERME EXPANSION . . . . .  | 101                              |
| 2.6.2    | ISOCHORE ZUSTANDÄNDERUNG . . . . .   | 102                              |
| 2.6.3    | ISOTHERME KOMPRESSION . . . . .  | 104                              |
| 2.6.4    | ISOBARE ZUSTANDÄNDERUNG . . . . .  | 105                              |
| 2.6.5    | ADIABATISCHE ZUSTANDÄNDERUNG . . . . .   | 106                              |
| <b>3</b> | <b>Auswertung</b>  | <b>109</b>                       |
| 3.1      | Auswertung zum 25.08.2025  | Elektrische Stromkreise 109      |
| 3.1.1    | BELASTUNGABHÄNGIGKEIT ZWEIER SPANNUNGSQUELLEN . . . . .  | 110                              |
| 3.1.2    | ZUM OHMISCHEN GESETZ . . . . .   | 113                              |
| 3.1.3    | SPANNUNGSABFALL UND POTENTIOMETER . . . . .  | 115                              |
| 3.1.4    | SPANNUNGSMESSUNG DURCH KOMPENSATION . . . . .  | 117                              |
| 3.1.5    | BESTÄTIGATION DER KIRCHHOFFSCHEN SÄTZE . . . . .   | 119                              |
| 3.2      | Auswertung zum 27.08.2025  | AC und aperiodische Vorgänge 126 |
| 3.2.1    | BASISELEMENTE DES OSZILLOSKOPS . . . . .   | 127                              |
| 3.2.2    | MESSEN EINER AMPLITUDE . . . . .   | 129                              |
| 3.2.3    | MESSEN EINER PHASENDIFFERENZ . . . . .   | 130                              |
| 3.2.4    | BETRachten DES AUF- UND ENTLADEVORGANGS EINES KONDENSATORS . . . . .   | 132                              |
| 3.2.5    | MESSEN DER RELAXATIONSZEIT BEI DER ENTLADUNG EINES KONDENSATORS . . . . .  | 133                              |
| 3.3      | Auswertung zum 01.09.2025  | Vierpole 136                     |
| 3.3.1    | QUALITATIVE UNTERSUCHUNG EINZELNER SCHALELEMENTE . . . . .   | 137                              |
| 3.3.2    | FREQUENZVERHALTEN EINES RC-HOCH- UND TIEFPASSFILTER . . . . .  | 138                              |
| 3.3.3    | RESONANZKURVE EINES SERIENSCHWINGKREIS . . . . .   | 140                              |
| 3.3.4    | DIFFERENZIER- UND INTEGRIERSCHALTUNG . . . . .   | 141                              |
| 3.4      | Auswertung zum 03.09.2025  | Magentisches Feld 142            |
| 3.4.1    | EIGENREGIE-TEILVERSUCH: SMARTPHONEEXPERIMENT ZUR BESTIMMUNG DES MAGNETFELDS EINER LEITERSCHLEIFE (DURCHFÜHRUNG VORAB ZU HAUSE) . . . . . | 143                              |

|          |   |                               |
|----------|---|-------------------------------|
| 3.4.2    | SICHTBARMACHEN DER MAGNETFELDLINIEN MIT HILFE VON<br>EISENSPÄNEN . . . . .                  | 144                           |
| 3.4.3    | DREHMOMENT DES FELDES AUF EINE STROMDURCHFLOSSENE<br>SPULE . . . . .                        | 145                           |
| 3.4.4    | INDUKTION DURCH DREHEN EINER SPULE IN EINEM MAGNET-<br>FELD . . . . .                       | 146                           |
| 3.4.5    | INDUKTION DURCH EIN ZEITLICH VERÄNDERLICHES MAGNET-<br>FELD . . . . .                       | 147                           |
| 3.5      | Auswertung zum 08.09.2025   | AP-Wärmelehre 148             |
| 3.5.1    | ERSTER TEILVERSUCH: BESTIMMUNG DER WÄRMEKAPAZITÄTEN<br>VON FESTKÖRPERN . . . . .            | 149                           |
| 3.5.2    | ZWEITER TEILVERSUCH: TEMPERATURABHÄNGIGKEIT DER WÄRMEKAPAZITÄT<br>VON FESTKÖRPERN . . . . . | 150                           |
| 3.5.3    | DRITTER TEILVERSUCH: GEFRIERVORGANG VON WASSER . . . . .                                    | 151                           |
| 3.5.4    | VIERTER TEILVERSUCH: DAMPFDRUCKKURVE VON WASSER   | 152                           |
| 3.5.5    | FÜNFTER TEILVERSUCH: STRAHLUNG EINES SCHWARZEN STRAHLERS<br>.                               | 153                           |
| 3.6      | Auswertung zum 11.09.2025   | Thermodynamische Prozesse 154 |
| 3.6.1    | ISOTHERME EXPANSION . . . . .   | 155                           |
| 3.6.2    | ISOCHORE ZUSTANDÄNDERUNG . . . . .  | 156                           |
| 3.6.3    | ISOTHERME KOMPRESSION . . . . .   | 157                           |
| 3.6.4    | ISOBARE ZUSTANDÄNDERUNG . . . . .   | 158                           |
| 3.6.5    | ADIABATISCHE ZUSTANDÄNDERUNG . . . . .  | 159                           |
| <b>4</b> | <b>Anhänge</b>  | <b>160</b>                    |
| <b>5</b> | <b>Formelsammlungen</b>   | <b>164</b>                    |

# 1 Vorbereitung und Grundlagen

Mit der Abgabe der Vorbereitung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde! Die Abgabe ist vor dem Einreichen auf äußere Form und Struktur kontrolliert. Die Gefahr einer Verschiebung des Korrekturprozesses durch äußere Formfehler ist bekannt.

Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München

Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2

Blockpraktikum vom 11. Aug. bis 9. Sept. 2025

| Vorname:   | Ahmed                     |     |     |     |     |     | Name:     | Djelassi |     |     |     |     |      | Gruppe:                             | C2-5 |
|--|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|----------|-----|-----|-----|-----|------|-------------------------------------|------|
| Mit Abgabe der Vorbereitung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!  |                           |     |     |     |     |     |           |          |     |     |     |     |      |                                     |      |
| Die Abgabe ist vor dem Einreichen auf eine saubere äußere Form und Struktur zu kontrollieren.<br>Bei ungenügender äußerer Form erfolgt zunächst keine Korrektur! |                           |     |     |     |     |     |           |          |     |     |     |     | OK?  | <input checked="" type="checkbox"/> |      |
|  | Schriftliche Vorbereitung |     |     |     |     |     | Vortrag   |          |     |     |     |     |      |                                     |      |
| APW  | 2,0                       | 1,6 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | 2,0       | 1,6      | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | kein |                                     |      |
|  | Antestat:                 |     |     |     |     |     | Antestat: |          |     |     |     |     |      |                                     |      |
| TEP  | 2,0                       | 1,6 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | 2,0       | 1,6      | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | kein |                                     |      |
|  | Antestat:                 |     |     |     |     |     | Antestat: |          |     |     |     |     |      |                                     |      |
| ESK  | 2,0                       | 1,6 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | 2,0       | 1,6      | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | kein |                                     |      |
|  | Antestat:                 |     |     |     |     |     | Antestat: |          |     |     |     |     |      |                                     |      |
| OSZ  | 2,0                       | 1,6 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | 2,0       | 1,6      | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | kein |                                     |      |
|  | Antestat:                 |     |     |     |     |     | Antestat: |          |     |     |     |     |      |                                     |      |
| VPO  | 2,0                       | 1,6 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | 2,0       | 1,6      | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | kein |                                     |      |
|  | Antestat:                 |     |     |     |     |     | Antestat: |          |     |     |     |     |      |                                     |      |
| MAG  | 2,0                       | 1,6 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | 2,0       | 1,6      | 1,2 | 0,8 | 0,4 | 0,0 | kein |                                     |      |
|  | Antestat:                 |     |     |     |     |     | Antestat: |          |     |     |     |     |      |                                     |      |

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

## 1.1 ESK

Versuchstermin 19.08.2025

Der KLASISCHE ELEKTRISCHE LEITER beschreibt ein System von Ladungen und Transportmedien. Hier interagieren geladene Teilchen vor allem durch ein spezifisch gedämpftes elektrisches Feld.

| Konstante            | Wert                        | Einheit            |
|----------------------|-----------------------------|--------------------|
| $\rho_{\text{Cu}}$   | $1.68 \cdot 10^{-8}$        | $\Omega \text{ m}$ |
| $\rho_{\text{Luft}}$ | $\approx 1.3 \cdot 10^{-5}$ | $\Omega \text{ m}$ |
| $e$                  | $1.602 \cdot 10^{-19}$      | C                  |

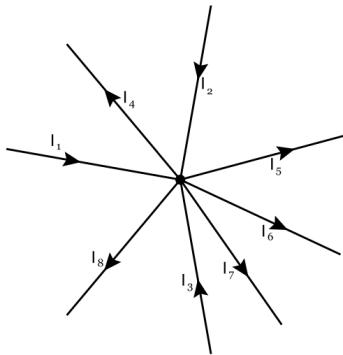
| Größe                            | Einheit                     | Formel                             | Beschreibung  |
|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Spannung $U$                     | V (Volt)                    | $U = R \cdot I$                    | Die elektrische Spannung nimmt entlang eines Leiters ab.  |
| Widerstand $R$                   | $\Omega$ (Ohm)              | $R = \frac{U}{I}$                  | Begrenzung des Stromflusses im Leiter.                    |
| Spezifischer Widerstand $\rho$   | $\Omega \cdot \text{m}$     | $R = \frac{\rho \cdot l}{A}$       | Materialabhängige Eigenschaft des Leiters.                |
| Elektrische Feldstärke $E_f$     | $\frac{\text{V}}{\text{m}}$ | $E_f = \frac{U}{d}$                | Zeigt Richtung und Stärke der Kraft auf eine Probeladung. |
| Elektrisches Potential $\varphi$ | V (Volt)                    | $\varphi = \Delta U = \frac{W}{Q}$ | Arbeit pro Ladungseinheit.                                |
| Stromstärke $I$                  | A (Ampere)                  | $I = \frac{Q}{t}$                  | Ladung pro Zeit, in unverzweigtem Leiter konstant.        |
| Leistung $P$                     | W (Watt)                    | $P = U \cdot I$                    | Energieübertragung pro Zeiteinheit.                       |
| Energie $E$                      | J (Joule)                   | $E = U \cdot I \cdot t$            | Leistung mal Zeit, in Ladungen gespeichert/umgesetzt.     |
| Ladung $Q$                       | C (Coulomb)                 | $Q = I \cdot t$                    | Größe der transportierten Elektronenmenge.                |

## GLEICHSTROM

Im Gleichstrommodell ist die Stromstärke  $I$  konstant, d.h. sie ändert weder Betrag noch Richtung über die Zeit. Die transportierte Ladung  $Q$  wird erhalten und steigt mit der Zeit und konstantem Strom linear an:

$$Q = I \cdot t$$

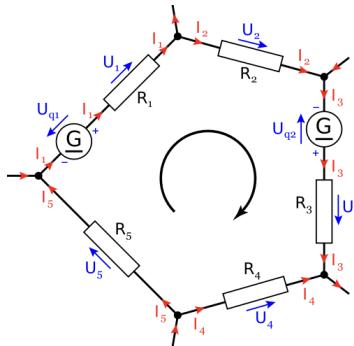
- **Ohmsches Gesetz:** Die Stromstärke  $I$  ist proportional zur Spannung  $U$  und umgekehrt proportional zum Widerstand  $R$ .
- **Kirchhoffsche Sätze:**
  - *Knotensatz:* Summe der Ströme in einem Knoten ist null.



**Versuchs Abbildung 1 [V-ESK-VA8]:**

$$\sum_i I_i = I_2 + I_3 + I_1 = I_4 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8 = \text{Konst.}$$

- *Maschensatz:* Summe der Spannungen in einer geschlossenen Schleife ist null.



**Versuchs Abbildung 2 [V-ESK-VA9]:**

$$\sum_i U_i = U_{q1} - U_1 - U_2 + U_{q2} - U_3 + U_4 - U_5 = 0$$

- **Vermessungskonsequenz:** Spannung wird immer parallel zum Bauteil gemessen, Strom immer in Reihe. In Reihenschaltungen ist der Strom durch alle Bauteile gleich, die Spannungen teilen sich auf (Maschensatz) Außerdem gilt das Dual-Slope-verfahren ist zu beachten. In Parallelschaltungen bleibt die Spannung über alle Zweige gleich, die Ströme teilen sich entsprechend auf (Knotensatz). Deshalb messen wir  $U$  parallel und  $I$  in Reihe, um diese Grundprinzipien zu berücksichtigen.
- **Leistungsgesetz:** Die elektrische Leistung  $P$  wird durch das Produkt von Spannung und Strom bestimmt:  $P = U \cdot I$ . [Einheit: Watt]
- **Richtungsabhängigkeit:** Der Strom fließt in einer konstanten Richtung vom Plus- zum Minuspol.

## Zur Spannungsdiffenz;

Das Elektrische Potenzial: Die Spannung nimmt mit dem Widerstand entlang eines Pfades ab. Dieses Phänomen wird Spannungsabfall genannt. Alles was eine möglichst stabile Spannung liefert, heißt eine Spannungsquelle.

So lassen sich beispiele in, der Mechanischen Wechselwirkung von Feststoffen.

(Reibungselektrizität), der thermische Bewegung von Ladungsträgern

(Thermoelement), dem Eingehen einer chemischen Bindung (galvanische Zelle), der Bewegung von Leitern in einem Magnetfeld (Dynamomaschine), wieder finden.

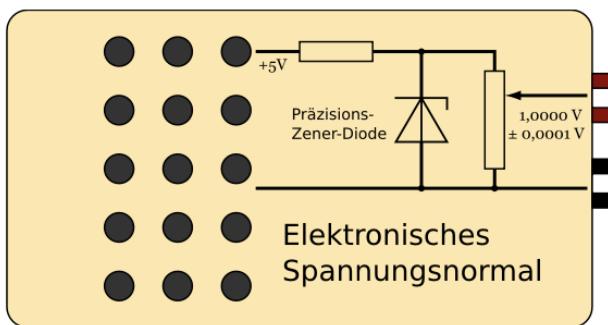
Ein solche Quelle hat eine Natürliche Quellspannung die sich aus der Berücksichtigung des Innenwiderstands wie folgt berechnen lässt.  $U_a = U_q - I \cdot R_i$

mit in dieser reihenfolge; der Ausgangsspannung, der Unbelasteten Leerlaufspannung, der Laststrom und des Innenwiderstandes. Auf gleicherweise lässt sich die Spannung an einer Messklemme ermitteln:  $U = U_q - I \cdot R_i$

Ein Teil  $U_i$  der ursprünglichen Spannung  $U_q$  wird nun dazu verbraucht, den Strom  $I$  durch den Innenwiderstand  $R_i$  zu treiben. [V-ESK-s.8]

## Spannungsnormale

Die wellige Gleichspannung des Gleichrichters wird über einen Vorwiderstand an eine in Sperrrichtung geschaltete Präzisions-Zener-Diode gelegt. Da die Eingangsspannung stets oberhalb der Durchbruchspannung liegt, fällt an der Zener-Diode konstant die Durchbruchspannung ab, wodurch eine wirksame Glättung erreicht wird. [V-ESK-s.15]



**Versuchs Abbildung 3 [V-ESK-VA15]:** Geschilderter Aufbau eines Spannungsnormals.

## Messinstrumente

Die folgenden geräte werden vor der Durchführung des Erster Experiments erläutert so das Ihre Geräte-angaben und -fehler ermittelt werden:

Multimeter

Erster Teilversuch teil a

“Kleiner” Potentiometer

Erster Teilversuch teil a

Stromzange

Erster Teilversuch teil b

“Großer” Potentiometer

Erster Teilversuch teil b

Netzgerät

Erster Teilversuch teil b

Wendelpotentiometer Helipot

Dritter Teilversuch teil a

Nullinstrument

Vierter Teilversuch

Spannungsnormal

Vierter Teilversuch

## Messkompetenzen

### Dual-Slope Verfahren

Dabei wird ein Kondensator zunächst über eine feste Zeit  $t_0$  auf die zu messende Spannung  $U$  aufgeladen. Anschließend erfolgt eine lineare Entladung des Kondensators über eine konstante Referenzspannung. Die Dauer  $t$  dieser Entladung wird gezählt und ist proportional zur Eingangsspannung  $U$ . Auf diese Weise lassen sich Spannungen genau digitalisieren.

### Kompensation nach Du Bois-Reymond

Dieses Verfahren dient der **Stabilisierung und Korrektur von Messwerten** bei sich langsam ändernden oder schwankenden Signalen. Durch die kontinuierliche Anpassung der Referenzspannung oder des Nullpunkts werden systematische Fehler reduziert, sodass präzise und wiederholbare Messungen möglich sind. Besonders bei biologischen oder schwach variierenden elektrischen Signalen ist diese Technik nützlich, um Rauschen und Drift zu kompensieren.

Vorbereitungs bepunktung

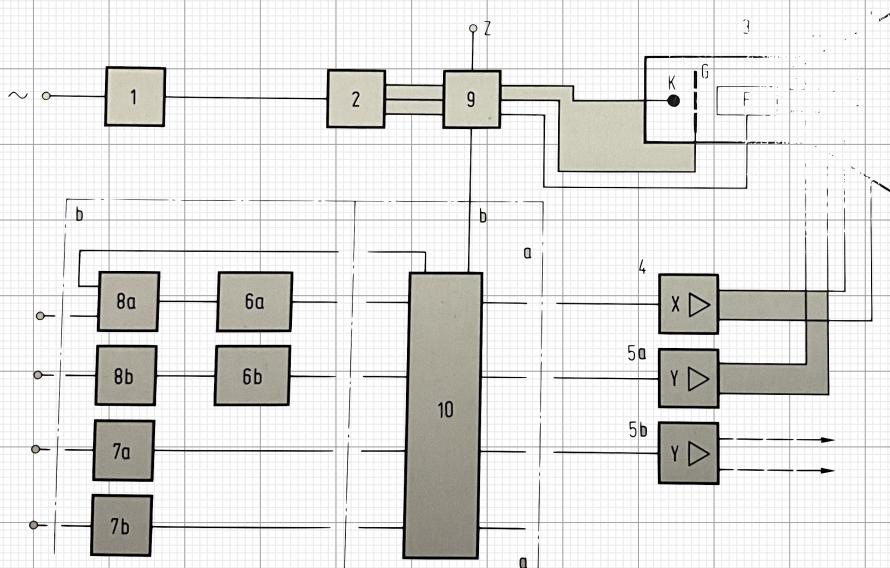
|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

Vortrags bepunktung

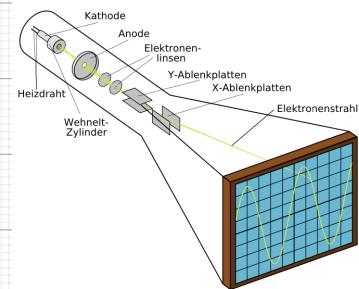
|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

Korrektor: Kuok Lon Leong

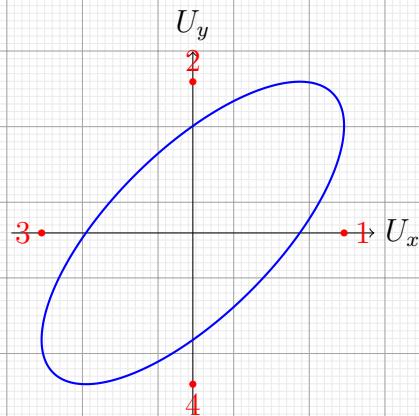
### Das Oszilloskop



**Versuchs Abbildung [DOS-A1]:** Universelle Aufbauskizze eines Oszilloskops.  
Hier gilt: Bereich bbba macht die Schaltfläche aus; 3 die Oszilloskop-Röhre; und der rest Steuert den Elektronenstrahl, Zeit und Position.



**Versuchs Abbildung [V-OSZ-VA11]:** Bereich 3: die Oszilloskop-Röhre aus der isometrischen Ansicht.



**Abbildung:** Lissajous-Ellipse mit charakteristischen Punkten

### Die Oszilloskop-Röhre

#### Elektronenstrahlerzeugung

Der Elektronenstrahl im Oszilloskop wird durch eine geheizte Glühkathode erzeugt. Die Kathode besteht meist aus einem Wolframdraht, der mit einer Metalloxid-Schicht (z. B. Bariumoxid) beschichtet ist. Durch die thermische Anregung (Heizung) überwinden Elektronen die Austrittsarbeit des Materials und treten aus der Oberfläche aus. Dieser Vorgang wird *thermische Elektronenemission* genannt. Die freigesetzten Elektronen werden anschließend durch die angelegte Beschleunigungsspannung  $U_A$  zu einem gerichteten Elektronenstrahl geformt. Hierzu

gilt die **Richardson-Gleichung** für die Emissionsstromdichte:

$$j(T) = A T^2 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right),$$

wobei  $A \approx 1,20 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}^2 \text{K}^2}$  die Richardson-Konstante,  $T$  die Temperatur der Kathode,  $W$  die Austrittsarbeit des Materials und  $k_B$  die Boltzmann-Konstante ist.

## Elektronenstrahl

Nichtrelativistisch gilt nach dem Energiesatz:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = e U_A$$

wobei  $U_A$  die Beschleunigungsspannung,  $v_E$  die Elektronengeschwindigkeit und  $e$  die Ladung des Elektron mit dem Betrag [ $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ ] C und der Elektronenmasse [ $m_e \approx 9,11 \times 10^{-31}$ ] kg. Daraus folgt

$$v(U_A) = \sqrt{\frac{2eU_A}{m_e}} \propto \sqrt{U_A}.$$

Relativistisch (für größere  $U_A$ ) gilt:

$$eU_A = (\gamma - 1)m_e c^2, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad v = c \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \frac{eU_A}{m_e c^2})^2}},$$

wobei [ $c = 299\,792\,458 \approx 2,99 \cdot 10^8$ ] m/s und stets  $v < c$  gilt.

| Beschleunigungsspannung<br>[ $U_A$ ] in V | Klassische Geschwindigkeit<br>[ $v_{E,k}$ ] in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ | Relativistische Geschwindigkeit<br>[ $v_{E,R}$ ] in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ |
|---|--|---|
| 1   | $5,93 \times 10^5$   | $5,93 \times 10^5$  |
| 10  | $1,88 \times 10^6$   | $1,88 \times 10^6$  |
| 100 k                                     | $1,88 \times 10^8$   | $1,64 \times 10^8$  |
| 1 M                                       | $5,93 \times 10^8$   | $2,82 \times 10^8$  |

Tabelle  $V_E$

## Elektronenstrahlbündelung und -ablenkung

Die Elektronenwolke wird im Verlauf der Röhre durch elektrostatische Felder gebündelt. Dazu dienen insbesondere Beschleunigungsanoden sowie der Wehnelt-Zylinder, die zusammen ein System von *elektronischen Linsen* bilden. Diese wirken analog zu optischen Linsen, indem sie den divergierenden Elektronenstrahl fokussieren und auf eine schmale Bahn bündeln.

Die Ablenkung des Elektronenstrahls erfolgt mittels zweier Paare von Ablenkplatten, die jeweils parallel angeordnet sind und ein homogenes elektrisches Feld erzeugen. Ein Plattenpaar ist für die horizontale ( $x$ ), das andere für die vertikale ( $y$ ) Ablenkung zuständig. Durch Anlegen einer Spannung  $U_p$  an die Platten erfährt der Elektronenstrahl eine seitliche Kraft und wird proportional zur Feldstärke ausgelenkt.

Die Spannung  $U_p$  induziert ein Elektrisches Querfeld  $= d_p \cdot E_p$  mit  $F_p = E_p \cdot e$  gilt  $F_p = \frac{U_p}{d_p} \cdot e$  aus dem Newtonischen Zusammenhang ergibt sich die Quergeschwindigkeit

$$v_p = a_p \cdot t_E = \frac{U_p}{d_p} \frac{e}{m} \cdot t_E$$

Mehr zum beschriebenen Oszilloskop Anteil in [DOS-Seiten 17-28]

Tabelle **V<sub>E</sub>** zeigt, dass die Elektronengeschwindigkeit selbst bei geringen Spannungen hoch ist. Durch die Abbildung auf den Leuchtstoff resultiert daraus eine weit höhere Bewegungsrate als die Aufnahmerate des Menschlichen Auges. Ein kontinuierlich abzubildendes Signal erscheint daher für den Betrachter wie ein stehendes Bild.

## Zeit beim Oszilloskop

In der eingangs gezeigten Abbildung auf Seite 22 enthält die Boxen 8a und 8b diese und der Bereich 9 Steuern hier Extern und Intern die Zeit des Messgeräts. Die Bereiche 8 sind so genannte Trigger, mit dem der Benutzer selbst die Zeit des Geräts anpassen kann.

## Kurzzeitmessungen

Kurzzeitmessungen betreffen Signale, die nur kurzzeitig auftreten und daher meist einmalig sowie nicht periodisch sind. Die kurze Dauer erschwert die direkte Messung des Signals. Um dies zu erleichtern, werden Kondensatoren verwendet, die während der Messung geladen und anschließend konstant entladen werden, sodass das Signal an die Entladungskurve des Kondensators angepasst wird.

## Kondensator, Lade- und Entladekurve sowie Relaxationszeit

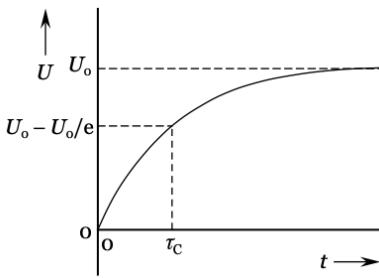
Ein Kondensator der Kapazität  $C$  speichert elektrische Ladung nach  $Q = CU$ , wobei  $U$  die Kondensatorspannung ist. Wird er über einen Widerstand  $R$  an eine Spannungsquelle  $U_0$  angeschlossen, so fließt ein Strom  $I(t) = \frac{dQ}{dt}$ , der den Kondensator auflädt. Die Kondensatorspannung wächst dabei exponentiell nach

$$U_C(t) = U_0(1 - e^{-t/(RC)}),$$

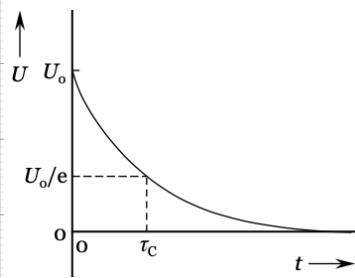
wobei zu Beginn  $U_C(0) = 0$  gilt und sich der Kondensator asymptotisch der Quellenspannung  $U_0$  annähert. Beim Entladen über denselben Widerstand gilt hingegen

$$U_C(t) = U_0 e^{-t/(RC)},$$

sodass die Spannung exponentiell gegen null abfällt. Die charakteristische Zeitkonstante  $\tau = RC$  wird als *Relaxationszeit* bezeichnet. Sie gibt die Zeit an, nach der die Spannung beim Entladen auf den  $e$ -ten Teil ihres Anfangswertes abgesunken ist bzw. beim Laden rund 63 % der Endspannung erreicht sind. Damit beschreibt  $\tau$  die Geschwindigkeit, mit der sich der Kondensator in Richtung seines jeweiligen Gleichgewichtszustandes bewegt.



**Versuchs Abbildung [V-OSZ-VA8]:** Ansteigen der Kondensatorspannung bei Aufladen über einen Widerstand.



**Versuchs Abbildung [V-OSZ-VA9]:** Absinken der Kondensatorspannung bei Entladen über einen Widerstand.

### Trigonometrische Funktionen, Fourier-Darstellungen und Näherungen von Wechselspannungen

Wechselspannungen (AC, *Alternating Current*) sind zeitabhängige Ströme oder Spannungen, die periodisch verlaufen können. Jede periodische, hinreichend glatte Funktion lässt sich als Reihe trigonometrischer Funktionen darstellen, gemäß der Fourier-Reihen-Entwicklung:

$$U(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \right],$$

wobei  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  die Grundkreisfrequenz und  $T$  die Periode ist.

Nicht alle AC-Signale sind glatt oder überall differenzierbar. Während sinusförmige Spannungen überall differenzierbar sind, treten bei vielen praktischen Signalen wie Rechteck-, Sägezahn- oder Dreieckspannungen Knicke oder Sprünge auf. Diese können dennoch über Fourier-Reihen dargestellt werden, wobei die Konvergenz an Sprungstellen langsamer erfolgt (Gibbs-Phänomen).

Häufig wird für Spannungen nur der Effektivwert  $U_{\text{eff}}$  angegeben. Dabei handelt es sich um den sogenannten **Gleichwert**, also diejenige Gleichspannung, die denselben Effekt an einem ohmschen Widerstand erzeugt wie die Wechselspannung.

Für den Wechselstrom gilt entsprechend: Der Effektivwert  $I_{\text{eff}}$  ist derjenige Strom, der eine konstante Leistung  $P = RI_{\text{eff}}^2$  Beispiel: Sinusspannung

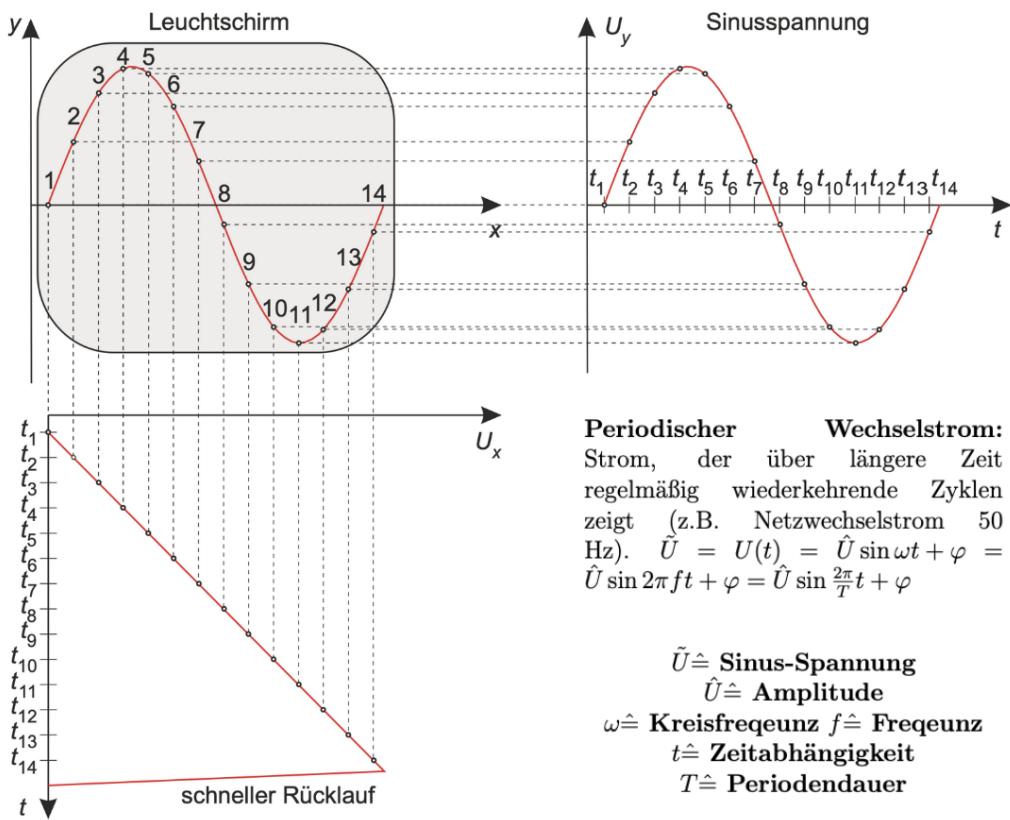
Für eine sinusförmige Wechselspannung  $U(t) = \hat{U} \sin(\omega t)$  gilt:

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}}, \quad I_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{eff}}}{R}$$

Damit liefert die Wechselspannung dieselbe mittlere Leistung wie eine Gleichspannung von  $U_{\text{eff}}$ .

### Wechselspannungen

Unter dem englischen Begriff *Alternating Current (AC)* versteht man Ströme, deren Stärke zeitlich variiert. Diese Ströme können dabei unterschiedliche Formen annehmen:



[NPG-Bild-26.9]: Zeitableitung beim Oszilloskop

Eine periodische Wechselspannung kann immer als Reihe trigonometrischer Funktionen dargestellt werden:

$$U(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)],$$

wobei  $a_n$  und  $b_n$  die Fourier-Koeffizienten und  $\omega_0 = 2\pi/T$  die Grundkreisfrequenz ist. Darüber hinaus kann eine hinreichend glatte Funktion lokal auch mittels der Taylor-Entwicklung angenähert werden:

$$U(t) = U(t_0) + U'(t_0)(t - t_0) + \frac{U''(t_0)}{2!}(t - t_0)^2 + \dots$$

- **Kurzzeitstrom / transienter Strom:** Strom, der nur über einen begrenzten Zeitraum fließt, z.B. beim Einschalten eines Geräts oder bei Blitzentladungen.
- **Sonstige zeitabhängige Ströme:** beliebige nicht-konstante Ströme, die sich durch eine zeitabhängige Funktion  $I(t)$  beschreiben lassen, lassen sich auch mit einer fourierreihen darstellen so gilt
  - **Rechteckspannung:** Eine Rechteckspannung mit Amplitude  $\hat{U}$  und Periode  $T$  kann durch eine unendliche Sinusreihe dargestellt werden (nur ungerade Harmonische):

$$U_{\text{Rechteck}}(t) = \frac{4\hat{U}}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\omega_0 t), \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

- **Sägezahnspannung:** Eine Sägezahnspannung kann durch alle Harmonischen (Sinus) dargestellt werden:

$$U_{\text{Säge}}(t) = \frac{2\hat{U}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin(n\omega_0 t)$$

- **Dreiecksspannung:** Eine Dreiecksspannung kann ebenfalls als Fourierreihe beschrieben werden (nur ungerade Harmonische, aber Quadrat der Frequenz im Nenner):

$$U_{\text{Dreieck}}(t) = \frac{8\hat{U}}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{(n-1)/2}}{n^2} \sin(n\omega_0 t)$$

**Hinweis:** - Rechteck: nur ungerade Harmonische, Amplituden  $1/n$  - Sägezahn: alle Harmonischen, Amplituden  $1/n$  - Dreieck: nur ungerade Harmonische, Amplituden  $1/n^2 \rightarrow$  glatterer Verlauf

## Lissajous-Ellipsen und Phasenmessung

Eine Lissajous-Ellipse entsteht, wenn zwei sinusförmige Wechselspannungen  $U_x(t) = \hat{U}_x \sin(\omega t)$  und  $U_y(t) = \hat{U}_y \sin(\omega t + \varphi)$  auf die X- und Y-Eingänge eines Kathodenstrahl-Oszilloskops gegeben werden. Der Strahl beschreibt auf dem Bildschirm eine Ellipse, deren Form von der **Phasendifferenz**  $\varphi$  abhängt.

## Charakteristische Punkte

- Schnittpunkte mit den Achsen (Punkte 1–4) erleichtern die Bestimmung der Phasenverschiebung. - Für  $\varphi = 0 \rightarrow$  Gerade durch den Ursprung - Für  $\varphi = \pi/2$  und  $\hat{U}_x = \hat{U}_y \rightarrow$  Kreis - Breite der Ellipse an  $U_y = 0$  (Äquator) liefert:

$$\varphi = \arcsin \frac{U_{x0}}{\hat{U}_x}$$

## Herleitung der Ellipsengleichung

Aus den beiden sinusförmigen Spannungen:

$$U_x = \hat{U}_x \sin(\omega t), \quad U_y = \hat{U}_y \sin(\omega t + \varphi)$$

leitet man die Ellipsengleichung her:

1. Verwende die trigonometrische Identität:

$$\sin(\omega t + \varphi) = \sin(\omega t) \cos \varphi + \cos(\omega t) \sin \varphi.$$

2. Setze dies in  $U_y$  ein:

$$U_y = \hat{U}_y (\sin(\omega t) \cos \varphi + \cos(\omega t) \sin \varphi).$$

3. Teile beide Gleichungen durch die jeweiligen Amplituden:

$$\frac{U_x}{\hat{U}_x} = \sin(\omega t), \quad \frac{U_y}{\hat{U}_y} = \sin(\omega t) \cos \varphi + \cos(\omega t) \sin \varphi.$$

4. Löse  $\cos(\omega t)$  aus der zweiten Gleichung:

$$\cos(\omega t) = \frac{\frac{U_y}{\hat{U}_y} - \frac{U_x}{\hat{U}_x} \cos \varphi}{\sin \varphi}.$$

5. Wende die Pythagoras-Identität  $\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1$  an:

$$\left(\frac{U_x}{\hat{U}_x}\right)^2 + \left(\frac{\frac{U_y}{\hat{U}_y} - \frac{U_x}{\hat{U}_x} \cos \varphi}{\sin \varphi}\right)^2 = 1.$$

6. Multipliziere aus und fasse ähnliche Terme zusammen:

$$\left(\frac{U_x}{\hat{U}_x}\right)^2 + \left(\frac{U_y}{\hat{U}_y}\right)^2 - 2 \frac{U_x}{\hat{U}_x} \frac{U_y}{\hat{U}_y} \cos \varphi = \sin^2 \varphi.$$

Damit ergibt sich die Ellipsengleichung:

$$\boxed{\left(\frac{U_x}{\hat{U}_x}\right)^2 + \left(\frac{U_y}{\hat{U}_y}\right)^2 - 2 \frac{U_x}{\hat{U}_x} \frac{U_y}{\hat{U}_y} \cos \varphi = \sin^2 \varphi}.$$

### Messen der Phasendifferenz

- Aus der Ellipsenform lassen sich  $\varphi$  und das Verhältnis  $\hat{U}_y/\hat{U}_x$  bestimmen. - Speziell:

$$\sin \varphi = \frac{U_{y0}}{\hat{U}_y}, \quad \text{wobei } U_{y0} \text{ die Höhe bei } U_x = 0 \text{ ist}$$

- Mit dem Oszilloskop kann die Phasendifferenz direkt aus der Ellipsenform abgelesen werden, ohne dass die Signale zeitlich gleichzeitig dargestellt werden müssen.

Vorbereitungs bepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

Vortrags bepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

KorrektorIn: Lisa Marie Bauer

## Komplexe Wechselspannung

Eine sinusförmige Wechselspannung wird beschrieben durch

$$\tilde{U}(t) = \hat{U} \cos(\omega t - \varphi),$$

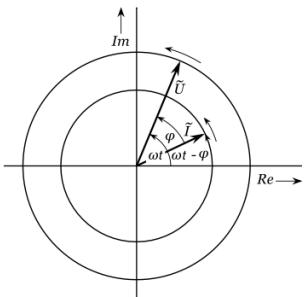
wobei  $\hat{U}$  die Amplitude,  $\omega = 2\pi f$  die Kreisfrequenz und  $\varphi$  die Phase (Phasenverschiebung) ist. Durch Einführung komplexer Exponentialfunktionen

$$\tilde{U}(t) = \hat{U} e^{i(\omega t - \varphi)}$$

vereinfacht sich die Rechnung, da Addition, Multiplikation und Differentiation einfacher darstellbar sind.

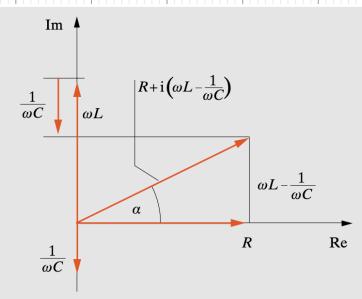
## Zeigerdiagramm

Komplexe Spannungen und Ströme können in Rahmen einer konformen Abbildung als Zeiger in der komplexen Ebene dargestellt werden. Die Spitzen dieser Zeiger laufen mit der Zeit auf einer Kreislinie. Zeigerdiagramme veranschaulichen Phasenverschiebungen zwischen Spannung und Strom.



[V-VPO-VA1]:

Zeigerdiagramm für Komplexe Ströme



[GER-8-48]

## Impedanz

Die Impedanz  $Z$  setzt sich aus Wirkwiderstand  $R$  und Blindwiderstand  $X$  zusammen:

$$Z = R + iX, \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad \tan \varphi = \frac{X}{R}.$$

## Ohmsches Gesetz für A(C)-Ströme

Die Impedanz  $Z$  eines Bauelements ergibt sich aus dem Verhältnis

$$Z = \frac{\tilde{U}}{\tilde{I}} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} e^{i\varphi} = |Z| e^{i\varphi} = \frac{U_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} e^{i\varphi}$$

wobei  $\varphi$  die Phasenverschiebung ist. Damit gilt eine verallgemeinerte Form des Ohm'schen Gesetzes für Wechselstrom.

# Phasenverschiebungen und Impedanzen von Grundbauelementen

## Ohmscher Widerstand:

$$Z_R = R, \quad \varphi_R = 0^\circ$$

Spannung und Strom sind in Phase.

## Serienschwingkreis:

$$Z_{LC} = i \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right),$$

$$\varphi_{LC} = \begin{cases} -90^\circ, & \omega < \omega_0 \\ 0^\circ, & \omega = \omega_0 \\ +90^\circ, & \omega > \omega_0 \end{cases}$$

mit Resonanzfrequenz  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

## Spule:

$$Z_L = i\omega L, \quad \varphi_L = +90^\circ$$

Spannung eilt dem Strom um  $90^\circ$  voraus (induktiv).

Die Phasenverschiebung  $\varphi = \arg(Z)$  hängt vom Vorzeichen des Imaginärteils ab:  $\varphi = -90^\circ$  für  $\omega < \omega_0$ ,  $\varphi = 0^\circ$  bei Resonanz  $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  und  $\varphi = +90^\circ$  für  $\omega > \omega_0$ . Der Strom eilt vor der Resonanz der Spannung voraus (kapazitiv) und folgt ihr danach (induktiv).

## Zur Resonanz

Bei der Resonanzfrequenz  $\omega_0$  heben sich die Blindwiderstände von  $L$  und  $C$  auf. Die Impedanz wird minimal und der Strom maximal.

## Dämpfung durch Phasenverschiebung

In realen Schaltungen begrenzen ohmsche Verluste die Amplitude. Der Gesamtwiderstand  $R$  führt zu einer endlichen Stromstärke und zu frequenzabhängigen Phasenverschiebungen:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad \tan \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

## Kondensator:

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C} = -\frac{i}{\omega C}, \quad \varphi_C = -90^\circ$$

Strom eilt der Spannung um  $90^\circ$  voraus (kapazitiv).

## Serienschwingkreis-Schaltung

Ein Serienschwingkreis besteht aus  $L$  und  $C$  in Reihe. Die Gesamtmpedanz lautet:

$$Z = i\omega L - \frac{i}{\omega C} = i\left(\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}\right)$$

## Differenzierer-Schaltung

Eine Differenzierschaltung liefert am Ausgang die Ableitung der Eingangsspannung. Realisierbar mit Spule oder durch RC-Schaltung (Kondensator vorne, Widerstand nach Masse).

## Integrierer-Schaltung

Ein Integrierer liefert am Ausgang das Integral der Eingangsspannung. Realisierbar mit RC-Schaltung (Widerstand vorne, Kondensator nach Masse).

### VIERPOLE

Ein VIERPOL beschreibt die elektrische Beziehung zwischen zwei Eingangs- und zwei Ausgangsgrößen. Die charakteristischen Variablen sind die Eingangsspannung  $U_1$ , der Eingangsstrom  $I_1$  sowie die Ausgangsspannung  $U_2$  und der Ausgangsstrom  $I_2$ .

Allgemein gilt die **Übertragungsmatrix-Darstellung**:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{pmatrix}, \quad \det \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = 1 \text{ (verlustfrei)}.$$

Besondere Fälle:

- $A$ - $D$  sind die VIERPOLPARAMETER.
- $\det = 1$  bei ideal verlustfreien Vierpolen.
- Kaskadierung: Matrizenkette  $M = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots$

Die Matrixdarstellung

$$\begin{bmatrix} \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \end{bmatrix}$$

erweitert das Ohm'sche Gesetz.

### Pegelmaß und Übertragungsverhältnis

Das logarithmische Pegelmaß in dB lautet:

$$a = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \text{ dB.}$$

Eine Dämpfung von  $-3 \text{ dB}$  entspricht einer Halbierung der Leistung.

### Tiefpass (c)

Ein RC-Tiefpass wirkt wie ein frequenzabhängiger Spannungsteiler, der niedrige Frequenzen nahezu unverändert überträgt, hohe dagegen stark dämpft. Das Übertragungsverhältnis beträgt

$$|G(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctan(\omega RC).$$

Die Grenzfrequenz ist definiert durch

$$\omega_c = \frac{1}{RC}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC}.$$

## Hochpass (b)

Ein RC-Hochpass überträgt hohe Frequenzen besser als tiefe. Das Übertragungsverhältnis beträgt

$$|G_{\text{HP}}(\omega)| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad \varphi_{\text{HP}}(\omega) = \arctan\left(\frac{1}{\omega RC}\right).$$

Auch hier gilt die Grenzfrequenz

$$\omega_c = \frac{1}{RC}, \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC}.$$

## Grenzfrequenz

Die Grenzfrequenz  $\omega_g$  ergibt sich zu

$$\omega_g = \frac{1}{RC},$$

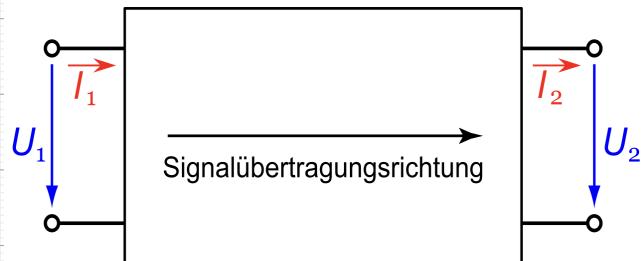
bei der  $|G| = \frac{1}{\sqrt{2}}$  und die Leistung halbiert ist (-3 dB).

## Übertragungsverhältnis

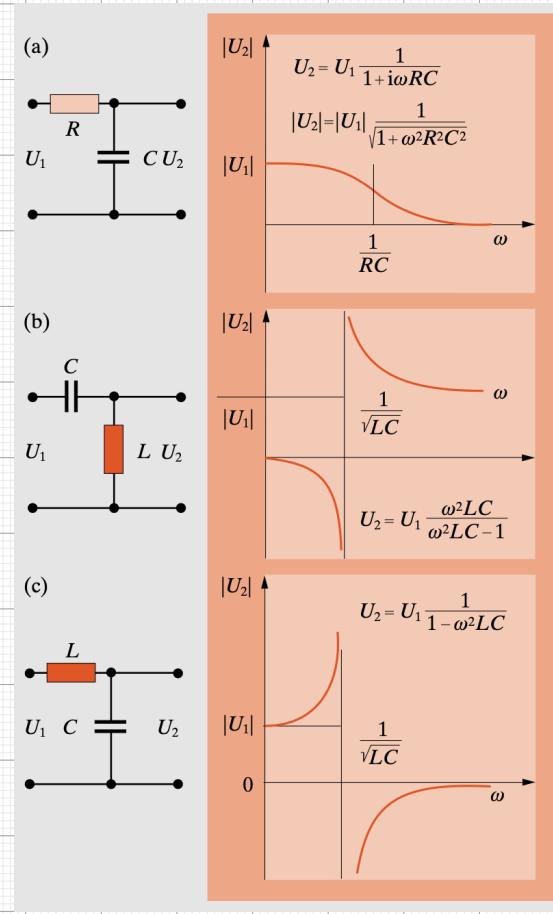
Allgemein beschreibt

$$G(\omega) = |G(\omega)|e^{-i\varphi(\omega)}$$

das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangssignal eines Vierpols.



[V-VPO-VA9]:



[GER-8-50abc]

Vorbereitungs bepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

Vortrags bepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

KorrektorIn: Georg Schallhorn

## MAGNETFELD

Das Magnetfeld  $\vec{B}$  ist ein Vektorfeld, das die Kraftwirkung auf bewegte Ladungen beschreibt. Es wird definiert über die **Lorentz-Kraft**:

**Magnetfeld Kraft nach Lorentz**

$$\vec{F}_m = Q(\vec{v} \times \vec{B}) = QvB\sin\alpha \quad (780002-mag-2)$$

**Erzeugung von Magnetfeldern**

Magnetfelder entstehen durch bewegte elektrische Ladungen (Ströme) oder zeitlich veränderliche elektrische Felder. Typische Quellen:

- stromdurchflossene Leiter,
- Spulen,
- Dauermagnete.

**Amperesches Durchflutungsgesetz (??)**

Das Durchflutungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen Strom und Magnetfeld:

**Durchflutungsgesetz von Ampere**

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I \quad (??\text{-mag-3})$$

Dies erlaubt die Berechnung des Magnetfeldes in symmetrischen Geometrien (z. B. lange Leitungen, Solenoid).

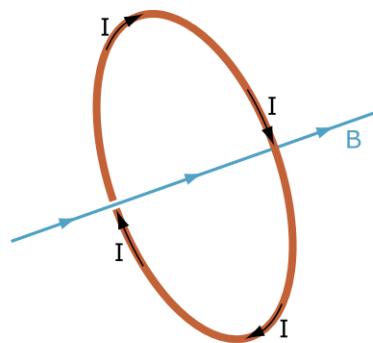
**Gesetz von Biot–Savart (?? -mag-5)**

Allgemeiner lässt sich das Magnetfeld mit dem Biot–Savart-Gesetz berechnen:

**Gesetz von Biot und Savart  $\vec{r}_i$ : Ortsvektor**

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{\vec{r}_i - \vec{r}}{|\vec{r}_i - \vec{r}|^3} \times d\vec{r}_i \quad (??\text{-mag-5})$$

Beispiel: Feld im Mittelpunkt eines Kreisrings der Stromstärke  $I$  und des Radius  $R$ :



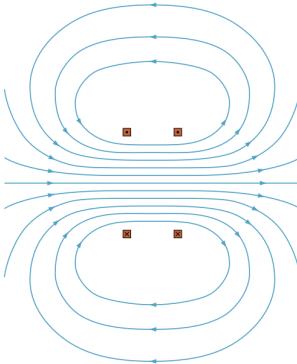
[V-MAG-VA1]: Feld eines Kreisrings

**Flussdichte in einem Ringfeld**

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \cdot \quad (??\text{-mag-22})$$

## Feld eines Helmholtzspulenpaars

Zwei identische Spulen im Abstand ihres Radius  $R$  erzeugen zwischen sich ein homogenes Magnetfeld:



[V-MAG-VA3]: Skizze eines Feldes eines Helmholtzspulenpaars

### Feld der Helmholtzspule (zwei parallele Drahtringe) 2% Genauigkeit in Theoretischen innenzylinder

$$B = 2 \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2}{\left(\frac{R^2}{2^2} + R^2\right)^{\frac{3}{2}}} NI = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{NI}{R} = \mu_0 \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{NI}{R} \quad (\text{??-mag-7})$$

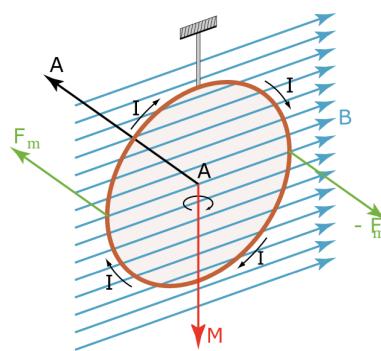
mit  $N$  = Windungszahl. Die Besonderheit: In der Mitte ist die Homogenität des Feldes besonders hoch.

## Kraft auf stromdurchflossenen Leiter

Wirkt ein Magnetfeld  $\vec{B}$  auf einen Leiter der Länge  $L$  mit Strom  $I$ .

### Drehmoment auf eine Leiterschleife

Eine rechteckige Leiterschleife mit Fläche  $A$  im Feld  $\vec{B}$  erfährt ein Drehmoment:



[V-MAG-VA5]: Drehmoment auf einer Leiterschleife

### Magnetisch Induziertes Drehmoment

$$\vec{M} = \vec{a} \times \vec{F}_m = a \vec{F}_m \sin \alpha = a I a B \sin \alpha = I A B \sin \alpha = \vec{m} \times \vec{B} \quad (\text{??-mag-10})$$

mit dem **magnetischen Dipolmoment**  $\vec{m}$ .

### Magnetisches Dipolmoment $m$

$$M = N I A B \sin \alpha = m B \sin \alpha \quad (\text{??-mag-11})$$

Das magnetische Dipolmoment charakterisiert die Stärke und Orientierung einer Leiterschleife oder eines Atommagnetismus:

## Experimentelle Anordnung

Im Versuch wird das Drehmoment einer stromdurchflossenen Leiterschleife im Magnetfeld gemessen, z. B. über eine Torsionsfeder.

### Rotierende Leiterschleife im homogenen Magnetfeld

Eine Leiterschleife mit  $N$  Windungen, Fläche  $A$  rotiert mit Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in einem homogenen Magnetfeld  $\vec{B}$ . Der zeitabhängige magnetische Fluss durch die Schleife ist

#### Flussdichte in einem Ringfeld

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (\text{??-mag-22})$$

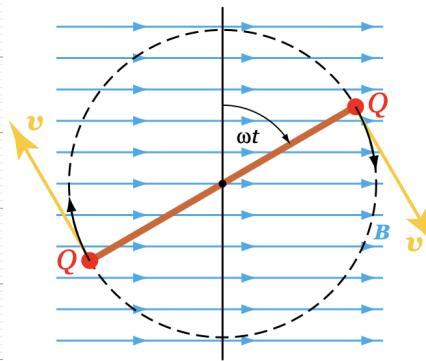
wobei  $\varphi_0$  die Anfangsphase ist, und vom arg subtrahiert wird. Nach Faraday entsteht dadurch eine Induktionsspannung

#### Entstehende (Induzierte) Spannung im Magnetischen Feld

$$U_i = BA\omega \sin(\omega t) = NBA\omega \sin(\omega t) = -N\vec{B}d_t\vec{A} \quad (\text{??-mag-13})$$

Dies ist die klassische Herleitung einer sinusförmigen Wechselspannung aus der rotierenden Leiterschleife nach dem Generatorprinzip.

**Hinweis zur Skizze:** Zeichne eine rechteckige Schleife, Achse durch den Mittelpunkt,  $B$  als Pfeil senkrecht zur Rotationsachse; beschrifte Winkel  $\theta = \omega t$ , wie:



[V-MAG-VA11]: Rechteckleitre mit Flussdichte

### Erklärung der Induktionsspannung mit der Lorentz-Kraft

Betrachte ein Leiterstück der Länge  $\ell$  mit Schwerpunktgeschwindigkeit  $\vec{v}$  im Magnetfeld  $\vec{B}$ . Ladungsträger mit Ladung  $q$  erfahren die Lorentz-Kraft

#### Faradayische Induktionsspannung

$$\mathcal{E}(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = NBA\omega \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (\text{??-mag-24})$$

Die Arbeit pro Ladung entlang des Leiters bestimmt die elektromotorische Kraft (motional emf):

#### EMF : Electromotiveforce

$$\mathcal{E} = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{\ell} \quad (\text{??-mag-25})$$

Für eine rotierende Leiterschleife lässt sich so die oben angegebene  $NBA\omega \sin(\omega t)$ -Form gewinnen (durch Integration über die bewegten Leitersegmente).

Für eine Quadratische Leiter schleife gilt

### Arbeit einer rotierenden quadratischen Leiterschleife

$$W = F_m 2a = QvB \sin(\omega t) 2a = Q\omega \frac{a}{2} B \sin(\omega t) = QU_i \quad (\text{??-mag-12})$$

Die resultierende emf (Arbeit pro Ladung) ist  
**Integral zur arbeit entlang eines Leiters**

$$W = \int_C \vec{F}_L \cdot d\vec{\ell} = q \int_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{\ell}. \quad (\text{??-mag-26})$$

### Entstehung einer sinusförmigen Wechselspannung

Für eine Schleife mit Fläche  $A$  und  $B$  senkrecht zur Rotationsachse gilt wie oben:  
**Entstehende (Induzierte) Spannung im Magnetischen Feld**

$$U_i = BA\omega \sin(\omega t) = NBA\omega \sin(\omega t) = -N\vec{B}d_t \vec{A} \quad (\text{??-mag-13})$$

Amplitude: **Messspannung eines Magnetfeldes**

$$\hat{U}_i = NBA\omega \quad (\text{??-mag-14})$$

### Magnetfeldmessung mit einer Leiterschleife

Eine Leiterschleife (Hall-Sensor-Alternative) kann zur Bestimmung von  $B$  benutzt werden, indem man  $\mathcal{E}_{\max}$  misst und umstellt:

#### Magnetfeld Flussdichte

$$B = \frac{\hat{U}_i}{NA\omega} \quad (\text{??-mag-15})$$

Praktische Hinweise:

- Beachte systematische Fehler durch nicht-homogenes Feld und Widerstand der Schleife.
- Kalibriere mit bekannter Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$ .

### Experimentelle Anordnung (Teilversuch 2)

Typische Komponenten:

- rotierende Schleife mit definierter Windungszahl  $N$ ,
- Antriebsmotor mit Drehzahlmesser (Tachometer),
- Voltmeter/Oszilloskop zur Messung der Wechselspannung,
- homogene Magnetfeldquelle (z. B. Helmholtzspulen oder Permanentmagnet).

### Vor-Ort-Fragen zu Teilversuch 2

Beispielhafte Fragen, die vor Ort gestellt werden können:

- Wie ändert sich die Amplitude der Induktionsspannung bei Verdopplung der Drehzahl?
- Welche Rolle spielt die Windungszahl  $N$ ?
- Welche systematischen Fehler treten bei Verkabelung und Messgerät auf?

## Magnetischer Fluss

Der magnetische Fluss durch eine Fläche  $A$  ist definiert als  
**Flussdichte mal Fläche : Magnetische Fluss**

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{A} \quad (\text{??-mag-21})$$

Für homogene Felder und flache Schleifen vereinfacht sich dies zu  $\Phi = BA \cos \theta$ .

## Induktionsgesetz für zeitlich veränderliches Magnetfeld

Faradays Gesetz (integralform) für eine ruhende Leiterschleife:

### Faradays Gesetz für Ruhende Leiter

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{??-mag-28})$$

Das Minuszeichen entspricht der Lenzschen Regel (**Richtung der Induktionsspannung so, dass sie der Ursache der Flussänderung entgegenwirkt**).

## Allgemeines Induktionsgesetz (inkl. bewegter Leiter)

Die verallgemeinerte Form (mit elektrischen Feldern und Bewegungen) lautet

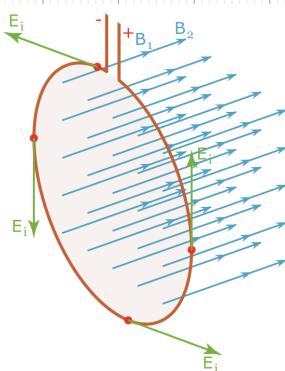
### Allgemeines Induktionsgesetz

$$U_i = -Nd_t(\vec{B} \cdot \vec{A}) = -Nd_t\Phi \quad (\text{??-mag-20})$$

Hier ist  $A(t)$  die ggf. zeitabhängige Fläche, die vom Leitungskreis eingeschlossen wird.  
Diese Form kombiniert Feldänderungen und motional emf.

## Feldlinienbild der elektrischen Feldstärke bei zeitlich veränderlichem $\vec{B}$

Ein zeitlich veränderliches  $\vec{B}(t)$  erzeugt nach Maxwell-Faraday ein wirbelförmiges elektrisches Feld  $\vec{E}$  mit



[V-MAG-VA13]: Feldlinien der Magnetischen Flussdichte

### Feldlinien form

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{??-mag-29})$$

Die elektrischen Feldlinien sind geschlossen (Zirkulation), im Gegensatz zu elektrischen Feldlinien stationärer Ladungsverteilungen (die von Ladungen ausgehen bzw. zu ihnen hin verlaufen).

## Nachweis der Induktionsspannung bei veränderlichem Magnetfeld (Experiment)

Typische Messanordnung:

- Primärspule zur Erzeugung eines zeitlich veränderlichen Feldes (z. B. durch Wechselstrom oder Rechteckstrom),
- Sekundärspule (Messspule) zur Induktionserzeugung,
- Oszilloskop zur Darstellung der induzierten Spannung,
- Variationen: Veränderung der Frequenz, Amplitude oder Form des Primärstroms.

## Lorentz-Kraft und Induktion

Die Lorentz-Kraft ist die Grundlage aller hier behandelten elektromagnetischen Effekte:

### Elektromagnetisches Kraft Gesetz von H. A. Lorentz

$$\vec{F}_{em} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{??-mag-1})$$

Für unbewegte Leiter  $\vec{v} = 0$  reduziert sich der Beitrag auf  $\vec{E}$ , bei Bewegung tritt die motional emf hinzu.

### Beispiel: Gerade Leiter, der aus einem Magnetfeld herausgezogen wird

Für einen Leiter der Länge  $\ell$ , der mit Geschwindigkeit  $v$  durch ein Feld  $B$  gezogen wird, ergibt sich die Spannung zwischen den Enden

$$\mathcal{E} = B \ell v.$$

Herleitung:  $\mathcal{E} = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{\ell}$  mit  $\vec{v} \perp \vec{B} \perp \ell$ .

## Dämpfende Induktionsströme (Eddy Currents)

Änderungen von  $B$  in leitfähigen Körpern induzieren Wirbelströme (Eddy currents), die Wirbelverluste (Dämpfung) und Erwärmung verursachen. Diese Effekte sind wichtig bei:

- Wirbelstrombremsen,
- Verlustberechnung in Transformatoren und Motoren,
- Messung elektrischer Leitfähigkeit (kontaktlos).

## Beispielhafte Fragen zur Diskussion:

- In welchem Bereich stimmt die Linearität besonders gut?
- Gibt es systematische Abweichungen bei hohen Strömen (Spulenerwärmung, Sättigung des Eisenkerns)?
- Welche Konsequenzen haben die Beobachtungen für technische Anwendungen (z. B. Generatoren, Transformatoren)?

Vorbereitungs bepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

Vortrags bepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

KorrektorIn:

## Wärme

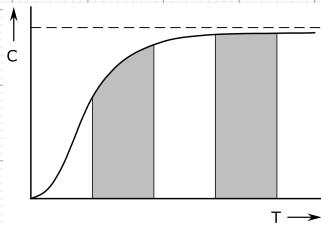
Wärme ist eine Energieform, die sich durch die ungeordnete Bewegung von Teilchen (Molekülen, Atomen, Ionen) in einem Stoff auszeichnet. Sie verteilt sich statistisch auf die Freiheitsgrade der Teilchen. Wärme fließt stets vom wärmeren zum kälteren Körper und verändert entweder die Temperatur eines Systems oder seinen Aggregatzustand. Die **Temperatur** ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen eines Systems. Eine Wärmezufuhr führt entweder zu einer Temperaturerhöhung oder zu einem Phasenübergang. Höhere Temperatur bedeutet größere mittlere Geschwindigkeit der Teilchen. Die **Wärmekapazität**  $C$  gibt an, wie viel Wärmeenergie  $Q$  nötig ist, um ein System um  $\Delta T$  zu erwärmen:

$$Q = C \Delta T.$$

Sie kann von der Temperatur abhängen; für kleine Bereiche verwendet man häufig Mittelwerte. Die Wärmekapazität wird auf eine Bezugsgröße normiert, um eine Stoffkonstante zu erhalten:

- massenbezogen:  $c = C/m$      $[c] = \text{J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
- molbezogen (Molwärme):  $C_m = C/n$      $[C_m] = \text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
- molekülbezogen:  $c_m = C/N$      $[c_m] = \text{J K}^{-1}$

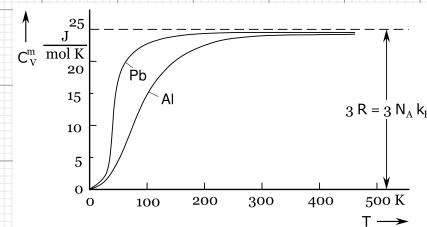
## Spezifische



[V-APW-VA3]

$$C_V = 3R$$

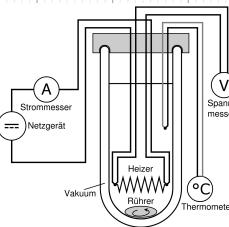
## Wärmekapazität



[V-APW-VA2]

## Regel von Dulong und Petit

Nach dem klassischen Modell beträgt die molare Wärmekapazität vieler Festkörper bei hohen Temperaturen. Dies folgt aus dem Gleichverteilungssatz (siehe TEP). Bei tiefen Temperaturen treten jedoch Abweichungen auf, die durch das Debyesche  $T^3$ -Gesetz beschrieben werden.  
3: Festeröper, 2: Aluminium und Blei.



## Kalorimetrie

Kalorimetrie ist die Methode zur Bestimmung von Wärmemengen. Ein *Kalorimeter* ist ein wärmeisoliertes Gefäß, meist mit Wasser gefüllt. Die Temperaturänderungen  $\Delta T$  des Wassers erlauben die Berechnung der ausgetauschten Wärmemenge.

**[V-APW-VA7]: Kalorimeter mit eingebauten Strom-, Spannungs- und Thermometer**

## Prinzipielle Anordnung zur Bestimmung einer Wärmekapazität

Eine Probe wird in ein Kalorimeter mit bekanntem Wasserwert eingebracht. Aus der Mischungstemperatur lässt sich die Wärmekapazität der Probe bestimmen.

## Wasserwert

Der Wasserwert  $m_w^*$  ist die fiktive Wassermasse, die dieselbe Wärmekapazität wie das Kalorimetergefäß besitzt. Er erlaubt die Berücksichtigung der Gefäßwärmekapazität durch

$$C = c_w(m_w + m_w^*).$$

## Extrapolationsverfahren

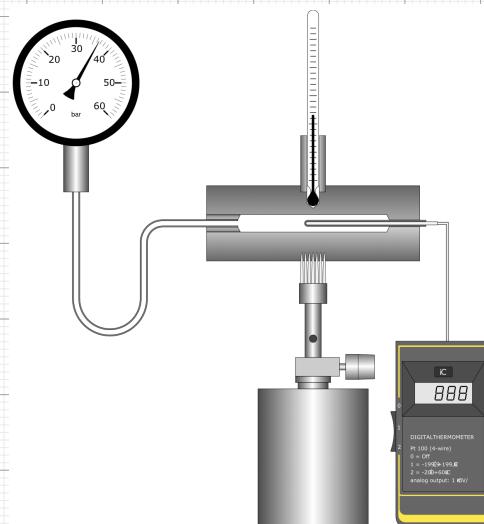
Da ein Kalorimeter nie völlig isoliert ist, zeigt die Temperaturkurve Vor- und Nachlauf. Durch Extrapolation dieser Kurven und Flächengleichheit kann die Mischtemperatur korrekt bestimmt werden.

## Molekulare Vorgänge an der Oberfläche einer Flüssigkeit

Moleküle können durch thermische Bewegung die Flüssigkeit verlassen und in den Dampfraum übergehen. Gleichzeitig treten Moleküle zurück. Ein Gleichgewicht führt zum Aufbau des Dampfdrucks. Der **Dampfdruck** ist der Gleichgewichtsdruck, der sich einstellt, wenn genauso viele Moleküle die Flüssigkeit verlassen wie zurückkehren. Er steigt exponentiell mit der Temperatur.

## Experimentelle Anordnung zur Bestimmung der Dampfdruckkurve

In einem geschlossenen Gefäß wird der Druck einer Flüssigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Daraus ergibt sich die Dampfdruckkurve und die Bindungsenergie: [V-APW-VA11]



**[V-APW-VA11]**

## Dampfdruckkurve

Die Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks folgt der Clausius-Clapeyron-Gleichung:

$$p = p_\infty \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right).$$

Auftragen von  $\ln(p)$  gegen  $1/T$  ergibt eine Gerade, deren Steigung die Bindungsenergie  $E_b$  liefert.

## Abhängigkeit des Dampfdrucks von der Temperatur

Der Dampfdruck steigt exponentiell mit der Temperatur an. Moleküle besitzen mit steigender Temperatur mehr Energie, um die Flüssigkeit zu verlassen.

## Spezifische Ausstrahlung

Die spezifische Ausstrahlung  $M_\lambda(\lambda, T)$  beschreibt die Strahlungsleistung pro Flächen- und Wellenlängeneinheit:

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{\Delta\Phi}{\Delta A \Delta\lambda}.$$

Sie hängt sowohl von Temperatur als auch von der Wellenlänge ab.

## Schwarzkörper

Ein Schwarzkörper absorbiert sämtliche elektromagnetische Strahlung und emittiert maximale Strahlung. Seine Emission ist unabhängig vom Material und hängt nur von der Temperatur ab.

## Plancksches Strahlungsgesetz

Die spektrale spezifische Ausstrahlung eines Schwarzkörpers ist:

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}.$$

Dies beschreibt korrekt die beobachtete Strahlungsverteilung und war Grundlage der Quantenphysik.

## Stefan-Boltzmann-Gesetz

Die totale Strahlungsleistung eines Schwarzkörpers wächst mit der vierten Potenz der Temperatur:

$$M_s(T) = \sigma T^4,$$

wobei  $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  die Stefan-Boltzmann-Konstante ist.

# Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern

Bei tiefen Temperaturen nimmt die Wärmekapazität ab. Das Debye-Gesetz beschreibt:

$$C_V \sim T^3.$$

Bei hohen Temperaturen gilt näherungsweise die Regel von Dulong und Petit.

## Experimentelle Bestimmung der Wärmekapazität eines Festkörpers

Eine Probe bekannter Masse und Temperatur wird in das Kalorimeter eingebracht. Durch Gleichsetzen der Wärmeflüsse zwischen Probe und Kalorimeter erhält man die spezifische Wärmekapazität.

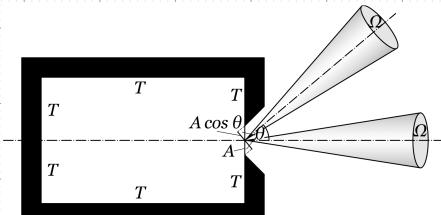
## Ursache der Wärmestrahlung

Beschleunigte elektrische Ladungen in Atomen und Molekülen senden elektromagnetische Strahlung aus. Diese thermische Strahlung hängt nur von der Temperatur ab.

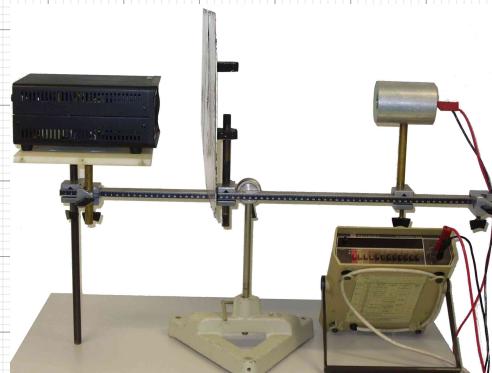
In einem **Hohlraumstrahler** stellt sich eine universelle Strahlungsverteilung ein, die unabhängig von Material und Geometrie ist. Die Strahlung entspricht der des idealen Schwarzkörpers.

## Experimenteller Aufbau zur Überprüfung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes

Ein Schwarzer Strahler wird auf verschiedene Temperaturen erhitzt. Messungen der abgestrahlten Leistung bestätigen die Proportionalität  $\Phi \propto T^4$ .



[V-APW-VA4]



[V-APW-VA12]

## Experimenteller Nachweis der Temperaturabhängigkeit

Die Wärmekapazität eines Metalls wird bei Raumtemperatur und bei tiefen Temperaturen (z. B. 77 K, flüssiger Stickstoff) bestimmt. Der Vergleich zeigt die Abweichung von der Regel von Dulong und Petit und bestätigt das Debye-Gesetz.

Vorbereitungs bepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

Vortrags bepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

KorrektorIn:

Das IDEALE GAS MODELL beschreibt ein System aus Volumenlosen (ohne Innerestruktur und wechselwirkung) Punkt förmigen Teilchen die sich frei und ungeordnet bewegen. Es treten nur elastische Stöße zwischen ihnen und der Gefäß begrenzung auf. Hier ist die zugrundeliegende Gleichung:

$$PV = nRT = Nk_B T$$

welche aus,

$$\langle E_{kin} \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

$$P = \frac{\langle E_{kin} \rangle 3N}{2V} \Rightarrow PV = \frac{\langle E_{kin} \rangle 3N}{2} = Nk_B T$$

mit

$$R = N_A k_b$$

$$n = NN_A$$

folgt, das Verhalten des Systems wird anhand der Zustandgrößen  $N$  der Teilchenzahl, [V des Eingeschlossenen Volumen] in Kubikmeter, [T der durch die Temperatur] in Kelvin dargestellten Kinetischen Energie und [des Drucks P] in Pascal beschrieben und von der Allgemeinengaskonstante  $R$ , der Boltzmannkonstante  $k_B$  und der Avogadrozahl  $N_A$  komplementiert.

|                         |       |                             |                                  |
|-------------------------|-------|-----------------------------|----------------------------------|
| Allgemeine Gaskonstante | $R$   | 8.314462618                 | $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
| Boltzmannkonstante      | $k_B$ | $1.380649 \times 10^{-23}$  | $\text{J K}^{-1}$                |
| Avogadrozahl            | $N_A$ | $6.02214076 \times 10^{23}$ | $\text{mol}^{-1}$                |

Der Zusammenhang mit der INNEREN ENERGIE wird aus dem Äquipartitionsprinzip gewonnen so gilt:

$$\Delta U = \frac{\text{Anzahl der Freiheitgrade}}{2} nR\Delta T \stackrel{n=1}{=} \frac{f}{2} RT$$

für Monoatomare Strukturen gilt also:

$$U = \frac{3}{2} k_B NT$$

| Gas              | Freiheitsgrade $f$ (Molekültyp) |
|------------------|---------------------------------|
| He               | 3 (monoatomig)                  |
| O <sub>2</sub>   | 5 (diatomig, linear)            |
| H <sub>2</sub>   | 5 (diatomig, linear)            |
| CO <sub>2</sub>  | 5–7 (linear, 3-atomig)          |
| H <sub>2</sub> O | 6–9 (nichtlinear, 3-atomig)     |
| SF <sub>6</sub>  | 6–21 (nichtlinear, mehratomig)  |

Aus  $\partial_T(\frac{f}{2} RT) = \frac{f}{2} R = c_V$  folgt die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen. aus dem fall  $n \neq 1$  ist offensichtlich  $c_V \propto N$  (Bei bewuster Konstanten umwandlung). und aus dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik bei konstanten Druck und variablem Volumen sogenannter Hubarbeit folgt die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck, so gilt

$$\Delta U = Q - W \Rightarrow \Delta U + W = Q$$

$$\Delta U = n c_V \Delta T \text{ und } W = P \Delta V = n R \Delta T$$

$$\Delta Q = n c_V \Delta T + n R \Delta T = (c_V + R) n \Delta T$$

$$c_P = \frac{Q}{n \Delta T} = c_V + R$$

Das Verhältniss der Gefundenen Wärmekapazitäten liefert den ADIABATENEXPONENTEN.

$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} = \frac{f+2}{f}$$

Der Adiabatenexponent, nach S.D.Poisson (1781–1840) auch Poisson-Zahl genannt, ist insbesondere für Poisson Gleichung relevant. So gilt wenn:

$$P V^\gamma = N k_B T = \text{Konstant} = T V^{\gamma-1}$$

wir von einer Adiabatischen Zustandsänderung gesprochen. Zum Messen des Adiabatenexpoenentes wird im Experiment die Zweite Methode verwendet:

- Volumen-Methode

$N = \text{konstant}$

Messe den Druck  $P$  in Abhängigkeit vom Volumen  $V$  in einem angeregten System, bevor es sich einpendelt.

Trage die Werte in ein  $\log(V)$ - $\log(P)$ -Diagramm ein und ermittle die Steigung.

Die Steigung entspricht dem Adiabatenexponenten  $\gamma$ :

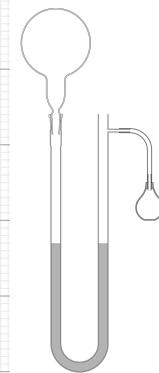
$$\gamma = -\frac{d \log P}{d \log V}.$$

- Schwingungsmethoden **Teilversuch Fünf**

Messe Schwingungsdauer mit und ohne eingeschlossenen Luftvolumen dann gilt:

$$\gamma = -\frac{2 \rho_{med.} g V_{Luft}}{PA} \left( \frac{\tau_{medium}}{\tau_{med.+Luft}} - 1 \right).$$

Hierzu wird folgende Kolbenkonstruktion verwendet:



#### **Versuchs Abbildung [V-TEP-VA16]:**

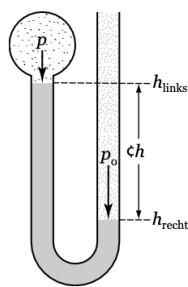
Luftgefüllter Kolben mit angeschlossener schwingungsfähiger Wassersäule

Weiter Experimente zur Messung der Zustandgrößen sind:

- *Volumen* wird an einer Kolbenskala abgelenen eine muss gelten  $V \propto x$  sowie  $A = \text{Konstant}$   
Minimiere Schädliches Volumen für genaue Ergebnisse.

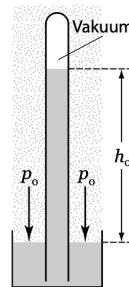
- Druck nur mit Referenz mit dem Quecksilber Monometer messbar, ablese der Absoluten Höhendifferenz bei angespannten zusatand, ermittlung durch

$$P = P_0 + \rho_{Hg} g \Delta h$$



**Versuchs Abbildung**  
[V-TEP-VA12]:

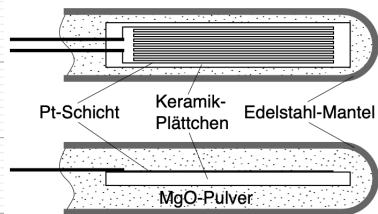
Manometer: Messung einer Druckdifferenz mit Hilfe von verbundenen Flüssigkeitssäulen



**Versuchs Abbildung**  
[V-TEP-VA13]:

Hg-Barometer: Messung des Atmosphärendrucks als Differenz gegen ein Vakuum.

- Temperatur ist über einen Platinwiderstandmessbar, hohe Thermische Leitfähigkeit des Sensor mantels, Widerstandserhöhung durch Termische Zustandsänderung.



**Versuchs Abbildung**  
[V-TEP-VA14]:

Temperaturmessfühler für ein Platin-Widerstandsthermometer:  
Das Keramik-Plättchen mit der Platinschicht ist in stark gepresstes Magnesiumoxid-Pulver eingebettet, das den Wärme Kontakt zum Schutzmantel herstellt. Magnesiumoxid ( $MgO$ ) ist ein elektrischer Nichtleiter, aber ein guter Wärmeleiter.

## Zustandsänderungen

können mit Konstanten Zustandsgrößen ablaufen dieses Verhalten ist in den Spezialfällen des POLYTROPENEXPONENTS

$$n \text{ aus } PV^n = \text{Konstant}$$

Abgebildet, so gilt:

- $n = 0$  Isobarer Prozess
- $n = 1$  Isothermer Prozess
- $n = \gamma$  Adiabatischer Prozess
- $n \rightarrow \infty$  Isochorer Prozess

außerdem wurden folgende Gesetzmäßigkeiten für die Spezialfälle gefunden:

Thermische Volumenausdehnung

Gesetz von Gay-Lussac  $V \propto T$

$$V = V_0(1 + \alpha\Delta T)$$

mit  $\alpha =$

$$V^{-1} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \Leftrightarrow \text{Isobar}$$

Thermische Druckkoeffizient

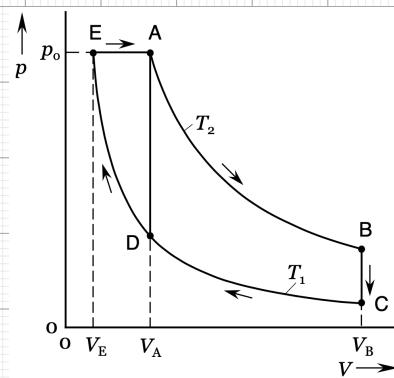
Gesetz von Amontons  $P \propto T$

$$P = P_0 (1 + \beta\Delta T)$$

mit  $\beta =$

$$P_0^{-1} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \Leftrightarrow \text{Isochor}$$

### P-V-Diagramm



#### Versuchs Abbildung [V-TEP-VA16]:

P(V)-Diagramme von Kreisprozessen im Versuch wird ABCEA durchlaufen. Der in ihm enthaltene Teil ABCDA heißt Stirling-Prozess. Hier gilt:

- **EA** Isobarerprozess  $\parallel$  zur V-Achse (Parallel zur Ordinate)
- **BC** Isochorerprozess  $\parallel$  zur P-Achse (Parallel zur Abzisse)
- **AB** und **CD** Isotherme, Hyperartig mit konstanter Temperatur.

In Kreisprozessen

-werden außerdem

- Adiabatischeprozesse (Steilere Funktionen als Isothermen)
- und Polytrope Zustandändern (Steigung zwischen Adiabatisch und Isotherm)

durchlaufen um die gewonnene Energie in einem Prozess anzupassen oder um Tacktung und Schwingung zu bedingen.

-gilt folgendes:

Wird durch eine Totale Kontrolle die Menge an veränderbaren (zustands)größen maximiert kann durch ihre Wechselwirkung Arbeit gewonnen werden, hier bestimmt die flussrichtung am P-V-Diagramm das Vorzeichen also ob das System Arbeit verichtet oder an dem System Arbeit geleistet wird.

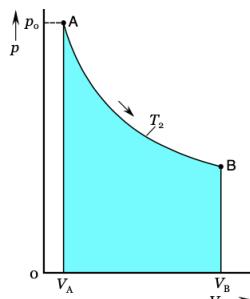
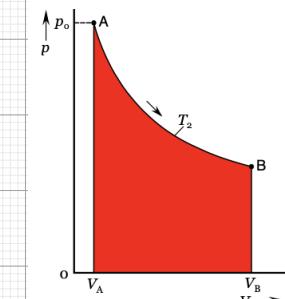
$$\circlearrowleft = +W \quad \circlearrowright = -W$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} pdV = \oint pdV$$

Beispiel,

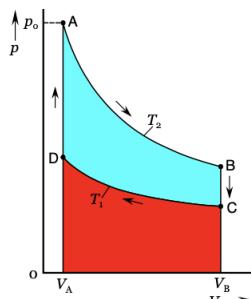
- Carnot:

- Isotherme Expansion
- Adiabatische Expansion
- Isotherme Kompression
- Adiabatische Kompression



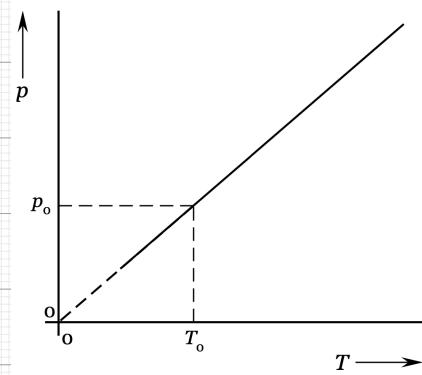
- Stirling:

- Isotherme Expansion
- Isochore Abkühlung
- Isotherme Kompression
- Isochore Erwärmung



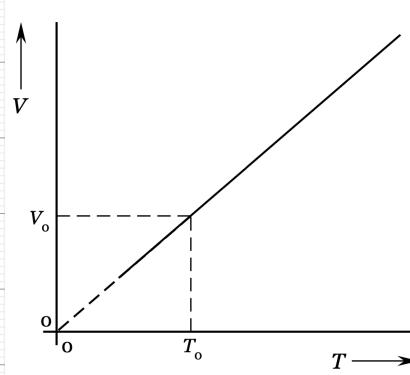
### Versuchs Abbildung [V-TEP-VA8]: Energieumwandlung in einem Sterling Prozess

#### Extrapolation des Absoluten Nullpunkts der Temperatur



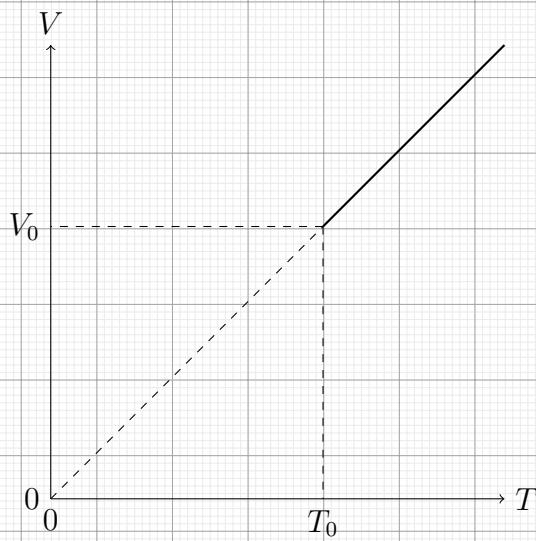
#### Versuchs Abbildung [V-TEP-VA5]:

Lineares Anwachsen des Volumens bei einer isobaren Zustandsänderung eines idealen Gases: Der gestrichelte Teil der Geraden kann im Experiment nicht realisiert werden, da sich das Gas bei tiefen Temperaturen nicht mehr ideal verhält.



#### Versuchs Abbildung [V-TEP-VA6]:

Lineares Anwachsen des Druckes bei einer isochoren Zustandsänderung eines idealen Gases: Der gestrichelte Teil der Geraden kann im Experiment nicht realisiert werden, da sich das Gas bei tiefen Temperaturen nicht mehr ideal verhält.



Gesetz von Gay-Lussac

Gesetz von Amontons

Die Extrapolation des Nullpunktes erfolgt Graphisch.

$$V = V_0(1 + \alpha \Delta T) \text{ mit } \alpha \approx T_0^{-1}$$

$$P = P_0(1 + \beta \Delta T) \text{ mit } \beta \approx T_0^{-1}$$

Vorbereitungsbepunktung

|     |     |     |     |   |     |     |     |     |   |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|
| 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2 |
|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|---|

Korrektor: Ziang Niu

## 2 Experiment Durchführungen

### 2.1 Durchführung zum Gleichstrom Kreis

**Multimeter** Teilversuch 1a  
misst Spannung, Stromstärke oder  
Widerstand in elektrischen  
Schaltungen — Gerätefehler:  
Messgenauigkeit kann durch  
falsche Einstellung oder  
Abnutzung der Messeingänge  
beeinträchtigt werden.

Modellnummer: [VC251TRMS]  
Hersteller: [VOLTCRAFT]  
Max. Messbereich Spannung:  
[600] V Max. Messbereich Strom:  
[10] A

#### MESSGERÄTE UND ERSTMALIGE VERWENDUNG

#### [NUR DC]

| Bereich          | Auflösung        | Genauigkeit      |
|------------------|------------------|------------------|
| 200,0 $\mu$ A    | 0,1 $\mu$ A      | $\pm(1,0\% + 5)$ |
| 20,00 mA         | 0,01 mA          | $\pm(1,0\% + 5)$ |
| 200,0 mA         | 0,1 mA           | $\pm(1,0\% + 5)$ |
| 10,00 A          | 0,01 A           | $\pm(1,6\% + 7)$ |
| 200,0 mV         | 0,1 mV           | $\pm(0,9\% + 6)$ |
| 2,000 V          | 0,001 V          | $\pm(0,9\% + 4)$ |
| 20,00 V          | 0,01 V           | $\pm(0,9\% + 4)$ |
| 200,0 V          | 0,1 V            | $\pm(0,9\% + 4)$ |
| 600 V            | 1 V              | $\pm(0,9\% + 4)$ |
| 2,000 k $\Omega$ | 0,001 k $\Omega$ | $\pm(1,0\% + 8)$ |
| 20,00 k $\Omega$ | 0,01 k $\Omega$  | $\pm(1,0\% + 8)$ |
| 200,0 k $\Omega$ | 0,1 k $\Omega$   | $\pm(1,0\% + 8)$ |

**Stromzange** Teilversuch 1b  
Messgerät zur berührungslosen  
Erfassung von Strömen —  
Gerätefehler: Empfindlich  
gegenüber elektromagnetischen  
Störungen, Offset-Drift durch  
Temperaturänderungen möglich.

Modellnummer und Datenblatt  
[IEC 1010- 316] Hersteller:  
[B&KPrecision] Messbereich:  
10 A bei 1 mA Genauigkeit: [2,5  
%  $\pm$  10dgt]

#### Labornetzgerät als Gleichstromquelle

Teilversuch 1b  
versorgt den Versuchsaufbau mit  
geregelter Gleichspannung —  
Gerätefehler: Ausgangsspannung  
kann schwanken oder  
Strombegrenzung auslösen.

Modellnummer: [PS-1302 D]  
Hersteller: [VOLTCRAFT]  
Max. Ausgangsspannung: [30] V  
Max. Ausgangstrom: [2] A

## Wendelpotentiometer Helipot

### Teilversuch 3a

präziser Drehwiderstand für exakte Spannungsteilung — Gerätefehler: Mechanische Abnutzung kann Messfehler verursachen.

Hersteller: [UNI]

Widerstandsbereich: [100

$\Omega \pm 0,1\%$ ] Linearitätstoleranz:  
[ $\pm 0,1\%$ ]

**Nullinstrument** Teilversuch 4  
empfindlicher Spannungsmesser zur Feststellung der Stromkonstanz — Gerätefehler: Empfindlichkeit kann durch Magnetisierung oder Alterung der Bauteile reduziert sein.

## Großer“ Potentiometer

### Teilversuch 1b

dient zur groben Einstellung von Spannungen oder Widerständen — Gerätefehler: Schleifkontakt kann springen oder ungleichmäßig sein.

Hersteller: [UNI] Max. Anzeige:  
[100] s

## Spannungsnormal Teilversuch 4

Referenzgerät zur Kalibrierung von Spannungsmessungen — Gerätefehler: Alterung der Referenzspannung kann die Genauigkeit verringern.

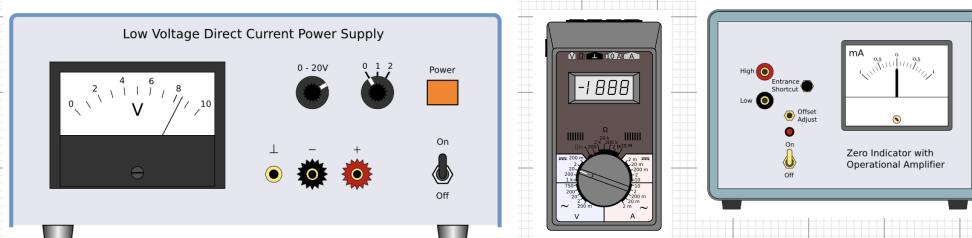
Referenzspannung: [1.0000] V

Genauigkeit: [0,0001] V

## Kleiner“ Potentiometer

Teilversuch 1a  
ermöglicht feine Spannungseinstellungen im Stromkreis — Gerätefehler: Kontaktwiderstände oder Abnutzung können die Genauigkeit beeinträchtigen.

Hersteller: [UNI] Maximaler Widerstand: [150]  $\Omega$  Max.  
Anzeige: [100] s



### Versuchs Abbildung [V-ESK-VA13, 19 $\wedge$ 20]:

Verwendete Messinstrumente, für die in der selben Reihenfolge gilt:  
Labornetzgerät, Multimeter, Nullinstrument .

## 2.1.1 Belastungabhängigkeit zweier Spannungsquellen

### Ziel

Die Untersuchen von Eigenschaften von Spannungsquellen anhand ihrer Ausgangsapnnung in abhängigkeit von der Belastungsstromstärke.

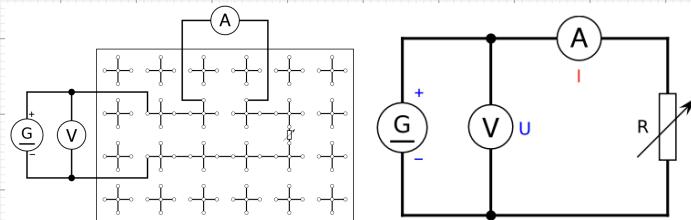
### Methode

Messung der Ausgangsspannung einer galvanischen Zelle und ermittelung des Innenwiderstandes anhand des Ohmischengesetz mitels der Belastungsstromstärke.

### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A0: NOTIERE DIE ANGABEN ZU DEN GERÄTEN. VGL. S. 51 [-x-]
- A1: STECKE DIE GERÄTE ZUR STABILISATION IN EINE NETZSTECKDOSE. [-x-]
- A2: STELLE DIE MESSINSTRUMENTE AUF DIE HÖCHSTE DEZIMALGENAUIGKEIT EIN. [-x-]
- A3: BAUE DEN BELASTUNGSKREIS – GALVANISCHE ZELLE – WIE FOLGT AUF (A4–A7). [-x-]



Versuchs Abbildungen  $\wedge$  26 [V-ESK-VA12  $\wedge$  26]:  
Belastungskreis-galvanische-Zelle G

- A4: NUTZE BEIM AUFBAU DEN KLEINEN POTENTIOMETER ALS VARIABLEN WIDERSTAND. [-x-]
- A5: ERMITTELE DEN REGELUNGSBEREICH UND TEILE IHN IN ZEHN ÄQUIDISTANTE SCHRITTE. [-x-]
- A6: ERGÄNZE UM DIE STROMSTÄRKE UND FORMATIERE TABELLE UND DIAGRAMM (SKALEN). [-x-]
- A7: BELASTE DIE GALVANISCHE ZELLE, INDEM DU SIE IN DIE SCHALTUNG EINBAUST (AA). [-x-]
- AA: ARBEITE AB JETZT ZÜGIG, UM DER ENTLADUNG ZUVORZUKOMMEN.
- A9: MESSE DIE LEERLAUFSPANNUNG DER UNKONTAKTIERTEN ZELLE  $U_{uk}$  VOR DEM EXPERIMENT. [-x-]

- I1: REGEL DEN STROM  $I_{Bel}$ , GIB IHN IN  $(\hat{I}_{max} - \hat{I}_{min})/10$  UND  $\hat{I}_{max}$  AN. [-1-]
- I2: MESSE DIE SPANNUNG  $U_{Mult}$  DER ZELLE MIT DEM MULTIMETER. [-2-]
- A10: MESSE DIE LEERLAUFSPANNUNG NACH DEM EXPERIMENT  $U_{nE}$ . [-x-]

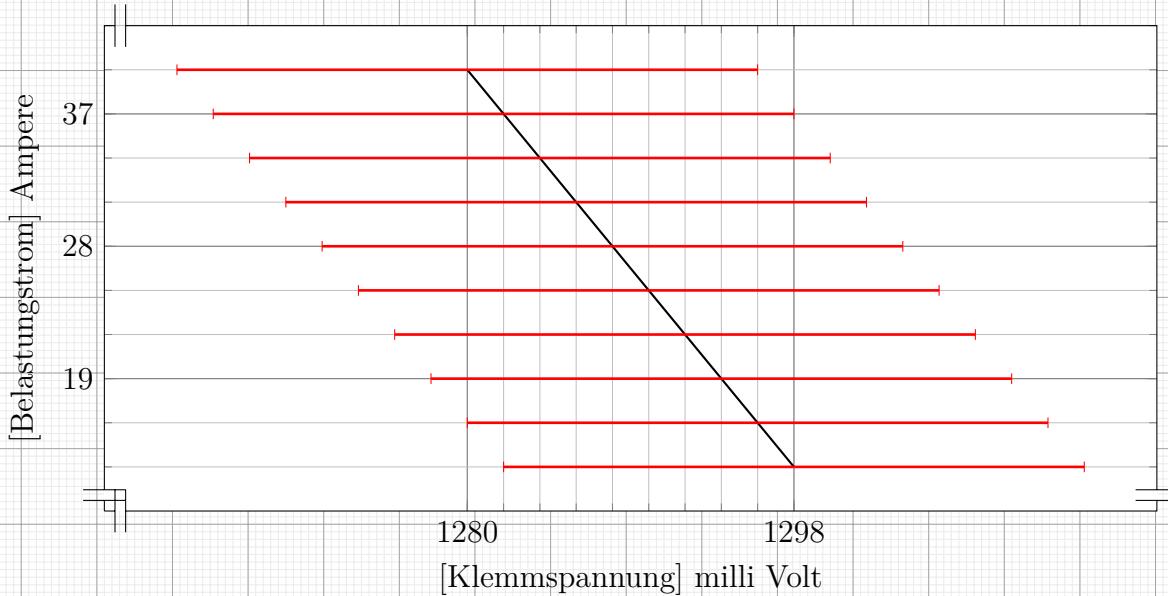
**Referenzgrößen:**

- $U_{uk}$  [LADESTAND, LEERLAUFSPANNUNG]  $(1,38 \pm 0,17)$  V
- $U_{nE}$  [LADESTAND] NACH DEM EXPERIMENT  $(1,32 \pm 0,16)$  V
- [BELASTUNGSSTROM]  $I_{Bel}$  P.A. (PER ANNAHME) FEHLERFREI [2,9 (3) & 38,7] mA
- [POTENTIAL] DER GALVANISCHEN ZELLE : [9%o +4DGT]  $\pm 16$  mV

$U_{Mult}$  In der Auswertung in mV umgeschrieben

| Messreihe esk 1 |  | $I_{Bel}$ | $U_{Mult}$ | $\pm \Delta$ |
|-----------------|--|-----------|------------|--------------|
| $i$             |  |           |            |              |
| 1               |  | 13        | 1298       | 16           |
| 2               |  | 16        | 1296       | 16           |
| 3               |  | 19        | 1294       | 16           |
| 4               |  | 22        | 1292       | 16           |
| 5               |  | 25        | 1290       | 16           |
| 6               |  | 28        | 1288       | 16           |
| 7               |  | 31        | 1286       | 16           |
| 8               |  | 34        | 1284       | 16           |
| 9               |  | 37        | 1282       | 16           |
| 10              |  | 40        | 1280       | 16           |

$U_{Mult}$ - $I_{Bel}$ -Diagramm



## Zweiter Teil Belastung eines Netzgeräts

Arbeitsschritte: [-x-]

- A1: STELLE  $U_{NG1}$  AM NETZGERÄT EIN. [-x-]
- A2: TAUSCHE IN DER SCHALTUNG DIE GALVANISCHE ZELLE GEGEN DAS NETZGERÄT AUS UND VGL. S. 51. [-x-]
- A3: TAUSCHE DEN KLEINEN GEGEN DEN GROSSEN POTENTIOMETER AUS. [-x-]
- A4: NOTIERE  $A_{min}$ ,  $A_{max}$  UND STELLE DEN WIDERSTAND ZUM INTERVALLBEGINN ENTSPRECHEND EIN. [-x-]
- I1: STELLE DIE SPANNUNG AUF  $A_1$  EIN. [-1-]
- I2: MESSE DIE STROMSTÄRKE MIT DER STROMZANGE. [-2-]

Referenzgrößen:

- $U_{NG1}$  ANFANGSNETZGERÄTSPANNUNG 10,0 V
- $A_i$  POTENTIOMETERSTROM 96,6 mA BIS 430 mA
- $\Delta A$  ÄQUIDISTANTE STROMSCHRITTE 30 mA
- $U_{Mult}$  MESSSPANNUNG DES MULTIMETERS [— V]
- $I_{Mult}$  MESSSTROM DES MULTIMETERS [— mA  $\wedge$  A]
- $I_{Zang}$  MESSSTROM DER STROMZANGE [— A]
- $I_{krit}$  KRITISCHER STROM 0,43 A

| Messreihe esk 2 |  | $i$   | $U_{Mult}$ | $\pm \Delta$ | $I_{Mult}$ | $\pm \Delta$ | $I_{Zang}$ | $\pm \Delta$ |
|-----------------|--|-------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| 1               |  | 10,01 | 0,13       | 096,6        | 0,5        | 0,092        | 0,013      |              |
| 2               |  | 10,01 | 0,13       | 126,5        | 0,7        | 0,120        | 0,013      |              |
| 3               |  | 10,01 | 0,13       | 156,4        | 0,8        | 0,150        | 0,014      |              |
| 4               |  | 10,01 | 0,13       | 186,6        | 1,0        | 0,180        | 0,015      |              |
| 5               |  | 10,01 | 0,13       | 216,1        | 1,1        | 0,208        | 0,016      |              |
| 6               |  | 10,00 | 0,13       | 00,24        | 0,08       | 0,234        | 0,016      |              |
| 7               |  | 10,00 | 0,13       | 00,27        | 0,08       | 0,273        | 0,017      |              |
| 8               |  | 10,00 | 0,13       | 00,31        | 0,08       | 0,301        | 0,018      |              |
| 9               |  | 09,99 | 0,13       | 00,35        | 0,08       | 0,345        | 0,019      |              |
| 10              |  | 09,99 | 0,13       | 00,39        | 0,08       | 0,379        | 0,020      |              |
| 11              |  | 09,95 | 0,13       | 00,43        | 0,08       | 0,418        | 0,021      |              |
| 12              |  | 05,02 | 0,08       | 00,43        | 0,08       | 0,424        | 0,021      |              |
| 13              |  | 00,06 | 0,04       | 00,43        | 0,08       | 0,425        | 0,021      |              |
| 14              |  | 09,98 | 0,13       | 00,42        | 0,08       | 0,413        | 0,021      |              |

### 2.1.2 Bestätigung des Ohmischen Gesetz

#### Ziel

Nach dem Ohmischen Gesetz ist  $I \propto U$  bestätigt durch Multimetermessungen.

## Methode

Die Steigung der  $\frac{\text{Spannung}}{\text{Belastungsstromstärke}}$  liefert den Innenwiderstand eines Verbrauchers.

## Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

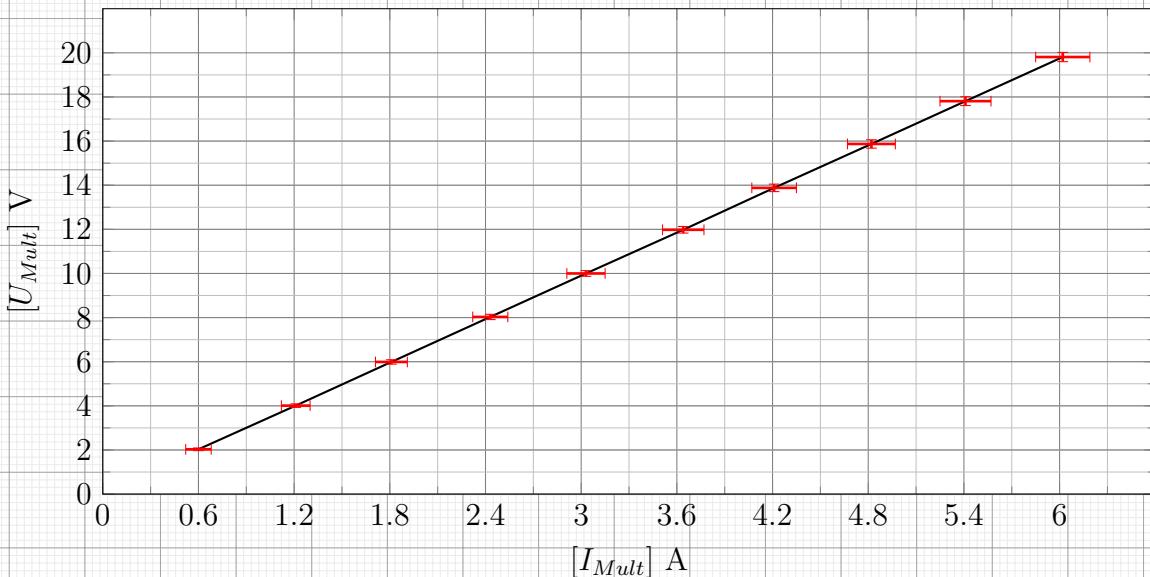
- A1: ENTWERFE VORORT UND BAUE EINE TESTSCHALTUNG ZUR SPANNUNGSMESSUNG. [-x-]
- A2: STELLE DIE ANFANGSSPANNUNG  $U_0$  EIN. [-x-]
- A3: LESE DEN WIDERSTANDSWERT AB, VGL. S. 160, ABLESETABELLE. [-x-]
- A4: MESSE MIT DEM MULTIMETER DEN WIDERSTANDSWERT  $R_{Mult}$ . [-x-]
- I1: STELLE  $U_1 = U_0 + \Delta U_{Reg}$  ITERATIV EIN. [-1-]
- I2: MESSE  $U_i$  UND  $I_i$  MIT DEM MULTIMETER. [-2-]
- A5: EREICHE  $U_{Reg}$ . [-x-]

## Referenzgrößen:

- $R_{ablese}$  AUS DER TABELLE [ABGELESENER WIDERSTANDWERT]: [ $\Delta = 1\%$ ]  $[3.30 \pm 0.33] \text{ k}\Omega$
- $R_{Mult}$  MIT DEM MULTIMETERE [GEMESSENER WIDERSTANDWERT]: [ $\Delta = 1\% R + 0,08$ ]  $[3.28 \pm 0.12] \text{ k}\Omega$
- $U_0$  [ANFANGSREGELSPANNUNG]  $[0] \text{ V}$
- $\Delta U_{Reg}$  REGEL [SPANNUNG] DES NETZGERÄTS  $[2] \text{ V}$
- $I_{Mult}$  MULTIMETER [STROMWERT]  $[\text{---}] \text{ A}$
- $U_{Mult}$  MULTIMETER [SPANNUNGSWERT]  $[\text{---}] \text{ V}$
- $U_{Reg}$  [ENDSPANNUNG]  $[20] \text{ V}$

| Messreihe esk 3 |  | $i$ | $I_{Mult}$ | $\pm \Delta$ | $U_{Mult}$ | $\pm \Delta$ |
|-----------------|--|-----|------------|--------------|------------|--------------|
|                 |  | 1   | 00.60      | 0.08         | 02.03      | 0.06         |
|                 |  | 2   | 01.21      | 0.09         | 04.01      | 0.08         |
|                 |  | 3   | 01.81      | 0.10         | 05.99      | 0.10         |
|                 |  | 4   | 02.43      | 0.11         | 08.03      | 0.12         |
|                 |  | 5   | 03.03      | 0.12         | 10.00      | 0.13         |
|                 |  | 6   | 03.64      | 0.13         | 11.98      | 0.15         |
|                 |  | 7   | 04.21      | 0.14         | 13.88      | 0.17         |
|                 |  | 8   | 04.82      | 0.15         | 15.87      | 0.19         |
|                 |  | 9   | 05.41      | 0.16         | 17.81      | 0.20         |
|                 |  | 10  | 06.02      | 0.17         | 19.81      | 0.21         |

## $I_{Mult}$ - $U_{Mult}$ -Diagramm



### 2.1.3 Spannungsabfall und Potentiometer

#### Ziel

*Messung der Spannung eines Stromdurchflossenen Draht und eines Wendelpotentiometere (Helipot) als funktion der Drahtlänge*

#### Methode

*Nutzung des Multimeter und Variation der angesetzten Länge.*

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse:

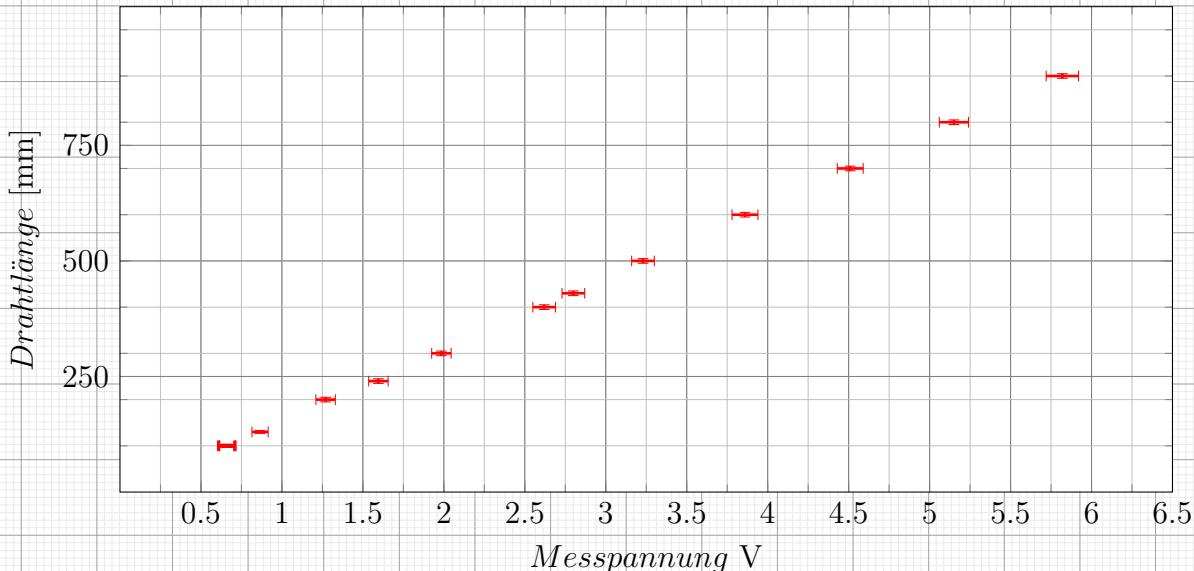
- A1: LEGE DEN [PRÜFSTROM] ÜBER DIE GESAMTE LÄNGE DES SCHLEIFDRAHTS. [-x-]
- A2: VERDOPPLE DEN STROM KURZZEITIG UND STELLE DIE THERMISCHE VERÄNDERUNG DES DRAHTS FEST. [-x-]
- A3: MESSE DIE GESAMTDRAHT-[SPANNUNG]. [-x-]
- A4: STELLE EINEN MULTIMETER-KONTAKT AN DREI STELLEN AM 10 cm DRAHT HER. WEISE QUALITATIV DEN SPANNUNGSABFALL NACH. [-x-]
- A5: MESSE DEN [SPANNUNGSABFALL]  $U_{A10}$ . [-x-]
- I1: VARIIERE DIE LÄNGE ÄQUIDISTANT FÜNFMAL. [-1-]
- I2: MESSE DEN [SPANNUNGSABFALL]  $U_{\Delta L}$ . [-2-]

## Referenzgrößen:

- $I_{\text{PRÜF}} [\text{PRÜFSTROM}]: [\Delta = 7 \cdot \text{mA} + 1.6\%]$  0,5 A
- $U_{\text{GES}} [\text{DRAHTSPANNUNG}] \text{ AM } 1000 \text{ mm DRAHT}$   $(6,668 \pm 0,010) \text{ V}$
- $U_{\Delta L} [\text{SPANNUNGSABFALL}] \text{ AM LÄNGENVARIERTEM DRAHT}$  [—] V
- $\Delta L \ddot{\text{A}}\text{QUIDISTANTE} [\text{LÄNGENVARIATION}]$  100 mm

| Messreihe esk 4 |     |                 |              |                |              |                              |              |
|-----------------|-----|-----------------|--------------|----------------|--------------|------------------------------|--------------|
|                 | $i$ | $L [\text{mm}]$ | $\pm \Delta$ | $U [\text{V}]$ | $\pm \Delta$ | $I_{\text{Mult}} [\text{A}]$ | $\pm \Delta$ |
|                 | 1   | 100             | 3            | 0.67           | 0.05         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 2   | 100             | 3            | 0.66           | 0.05         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 3   | 100             | 3            | 0.67           | 0.05         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 4   | 100             | 3            | 0.66           | 0.05         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 5   | 100             | 3            | 0.65           | 0.05         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 6   | 300             | 5            | 1.99           | 0.06         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 7   | 240             | 5            | 1.6            | 0.06         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 8   | 130             | 3            | 0.87           | 0.05         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 9   | 400             | 5            | 2.62           | 0.07         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 10  | 430             | 5            | 2.8            | 0.07         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 11  | 700             | 5            | 4.51           | 0.08         | 0.53                         | 0.08         |
|                 | 12  | 800             | 5            | 5.15           | 0.09         | 0.52                         | 0.08         |
|                 | 13  | 900             | 5            | 5.82           | 0.10         | 0.52                         | 0.08         |
|                 | 14  | 200             | 5            | 1.27           | 0.06         | 0.52                         | 0.08         |
|                 | 15  | 500             | 5            | 3.23           | 0.07         | 0.52                         | 0.08         |
|                 | 16  | 600             | 5            | 3.86           | 0.08         | 0.52                         | 0.08         |
|                 | 17  | 1000            | 5            | 6.67           | 0.10         |                              |              |

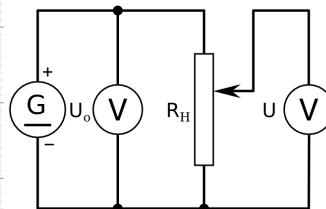
Spannung-Skala-Diagramm



## Experiment

Umbau- [-x-] und Iterative Prozesse:

- A1: BAUE DIE WENDELPOTENTIOMETERSCHALTUNG ENTSPRECHEND AUF.  
[-x-]



**Versuchsabbildung [V-ESK-VA27]:** Wendelpotentiometerschaltung

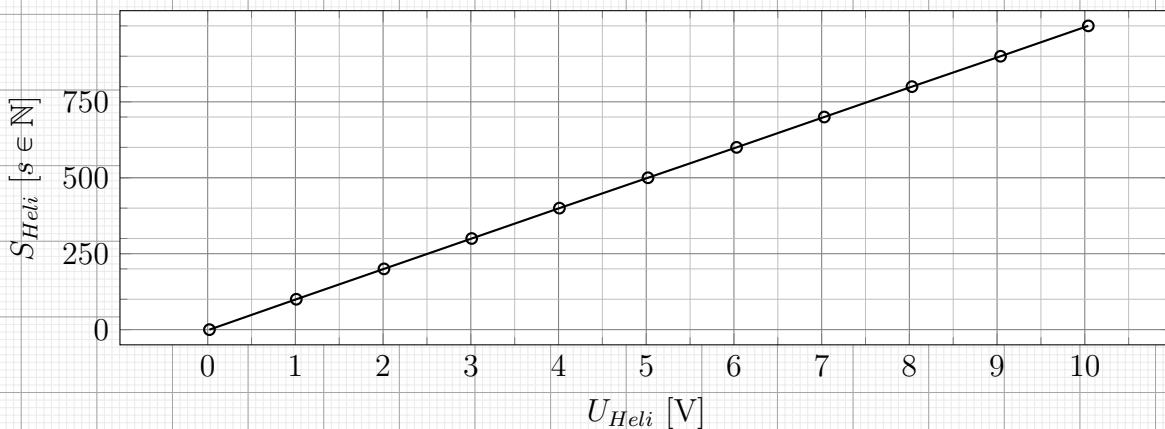
- A2: LEGE EINE KONSTANTE [EINGANGSSPANNUNG]  $U_e$  AN. [-x-]
- I1: ERHÖHE DEN [SKALENWERT] UM  $\Delta S$ . [-1-]
- I2: MESSE JEWELLS DEN ABFALLENDEN [SPANNUNGSWERT]. [-2-]
- A3: VERGLEICHE DIE SPANNUNGMESSGERÄTE:  $U_1 \stackrel{?}{=} U_2$ . [-x-]

### Referenzgrößen:

- $U_{Heli}$  [AUSGANGSSPANNUNG DES HELIPOTS]: [ $\Delta = \text{MULTIMETER}$ ]. [— V]

| Messreihe esk 5 |  | $U_{Heli}$ [V]    | $\pm \Delta$      | $S_{Heli}$ [s] | $\pm \Delta$ |
|-----------------|--|-------------------|-------------------|----------------|--------------|
| i               |  |                   |                   |                |              |
| 0               |  | $2 \cdot 10^{-2}$ | $4 \cdot 10^{-2}$ | 0              | 0.5          |
| 1               |  | 1.01              | $5 \cdot 10^{-2}$ | 100            | 0.6          |
| 2               |  | 2.01              | $6 \cdot 10^{-2}$ | 200            | 0.7          |
| 3               |  | 3.01              | $7 \cdot 10^{-2}$ | 300            | 0.8          |
| 4               |  | 4.01              | $8 \cdot 10^{-2}$ | 400            | 0.9          |
| 5               |  | 5.02              | $9 \cdot 10^{-2}$ | 500            | 1            |
| 6               |  | 6.03              | 0.1               | 600            | 1.1          |
| 7               |  | 7.03              | 0.11              | 700            | 1.2          |
| 8               |  | 8.03              | 0.12              | 800            | 1.3          |
| 9               |  | 9.04              | 0.13              | 900            | 1.4          |
| 10              |  | 10.04             | 0.13              | 1000           | 1.5          |

Spannung-Skala-Diagramm



## 2.1.4 Spannungsmessung durch Kompensation

### Ziel

Messung einer Unbekannten Spannung mittels Kompensation.

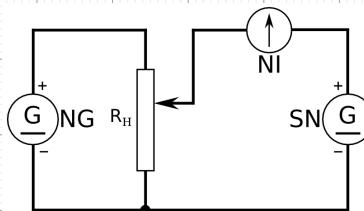
### Methode

Die Erzeugung eines kalibrierten Referenzstroms um unbekannte Spannungen vom Spannungsnormal und der Galvanischen Zelle zu messen.

### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: BAUE DIE KOMPENSATIONSSCHALTUNG WIE FOLGT AUF. [-x-]
- A2: BEACHTE DIE POLUNG DES NETZGERÄTS (NG)! [-x-]



**Versuchsabbildung [V-ESK-VA28]:** Kompensationsschaltung

- A3: ÜBERPRÜFE DIE OFFSET-EINSTELLUNG. [-x-]
- A4: STELLE DIE NETZGERÄTSAUSGANGSSPANNUNG AUF  $U_{NG2}$ . [-x-]
- A50: KALIBRIERE DIE KOMPENSATIONSORDNUNG MIT DEM SPANNUNGSNORMAL. [-x-]
- A51: FÜHRE EINE KOMPENSATION AUS. [-1-]
- A52: NOTIERE DEN HELIPOT-SKALENWERT  $S_{HSN}$ . [-x-]
- A53: BESTIMME DEN EINSTELLUNGSFEHLER. [-x-]

### Referenzgrößen:

- $U_{NG2}$  [NETZGERÄTSPANNUNG]. [2] V
- $S_{HNG}$  KOMPENSIERTER NETZGERÄT-HELIPOT-SKALENWERT. [492 < 493] s

### Experiment:

Umbau [-x-] und iterative Prozesse

- A6: ERSETZE DAS SPANNUNGSNORMAL (SN) DURCH DIE GALVANISCHE ZELLE. [-x-]
- A7: KOMPENSIERE DIE SPANNUNG DER GALVANISCHEN ZELLE. [-x-]
- A8: NOTIERE DEN HELIPOT-WIDERSTANDSWERT  $R_{HgZ}$ . [-x-]

## Referenzgrößen:

- $U_{gZ}$  [ZELLSPANNUNG].  $(1,35 \pm 0,06)$  V
- $S_{HgZ}$  KOMPENSIERTER ZELLWIDERSTANDWERT DES WENDELPOTENTIOMETERS.  $[(663 < 664) \pm 0,5]$  s
- SKALENBEREICH DES HELIPOTS:  $0 \leq S_{Heli} \leq 1000$ , MIT BIS ZU  $(100,0 \pm 0,1)$   $\Omega$

### 2.1.5 Bestätigung der Kirchoffschen Sätze

#### Ziel

*Bestätigung der Kirschhoffsschesätze*

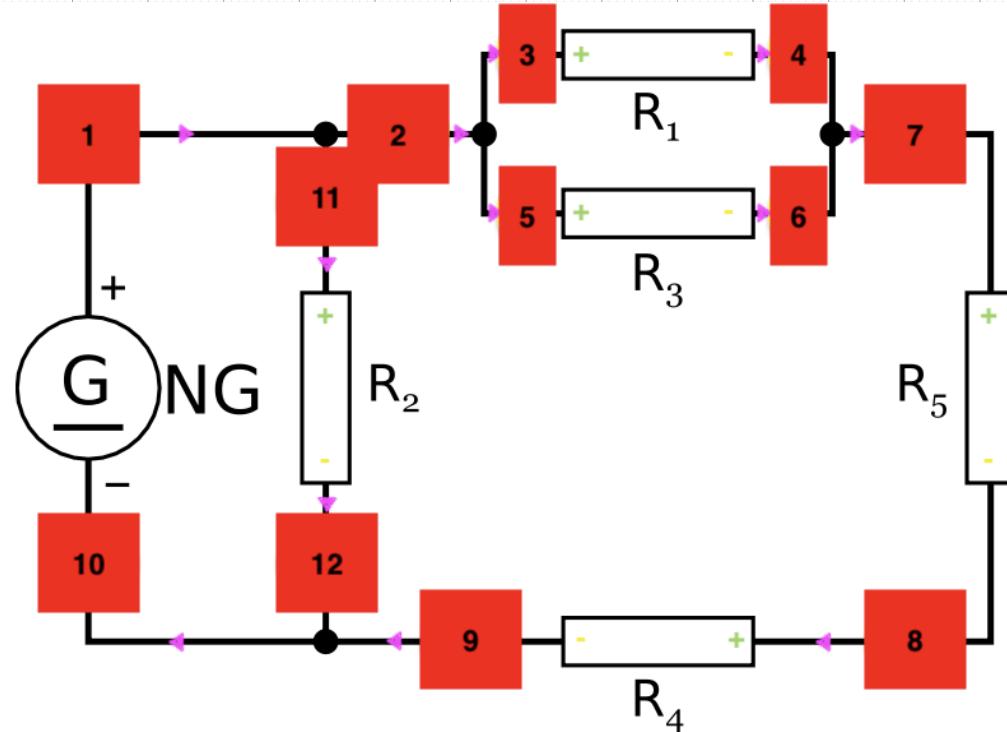
#### Methode

*Aufbau einer Testschaltung*

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: BAUE DIE KIRSCHHOFFTESTSCHALTUNG AUF. [-x-]
- A2: STELLE DIE NETZGERÄTAUSGANGSPANNUNG AUF  $U_{NG1}$ . [-x-]



**Versuchs Abbildung [V-ESK-VA29]:** Strommesspunkte an der Kirschhofftestschaltung.

- I1: MESSE [STROM] AN DEN BEZEICHNETEN PUNKTEN. [-1-]
- I2: MESSE [SPANNUNG] PARALLEL ZU DEN BAUTEILEN. [-2-]

## Referenzgrößen:

- $U_{NG1}$  [NETZGERÄTAUSGANGSPANNUNG]. 10 V
- $U_{Mult}$  [MESSSPANNUNG] DES MULTIMETERS [—] V
- $I_{Mult}$  [MESSSTROM] DES MULTIMETERS [—] A

| Messreihe esk 6 |            |                      |
|-----------------|------------|----------------------|
| $i$             | $I_{Mult}$ | $\Delta \mu\text{A}$ |
| 1               | 2.8        | 78                   |
| 2               | 1.47       | 65                   |
| 3               | 0.59       | 56                   |
| 4               | 0.59       | 56                   |
| 5               | 2.2        | 72                   |
| 6               | 0.59       | 56                   |
| 7               | 1.37       | 64                   |
| 8               | 1.32       | 63                   |
| 9               | 1.32       | 63                   |
| 10              | 2.8        | 78                   |
| 11              | 1.47       | 65                   |
| 12              | 1.47       | 65                   |

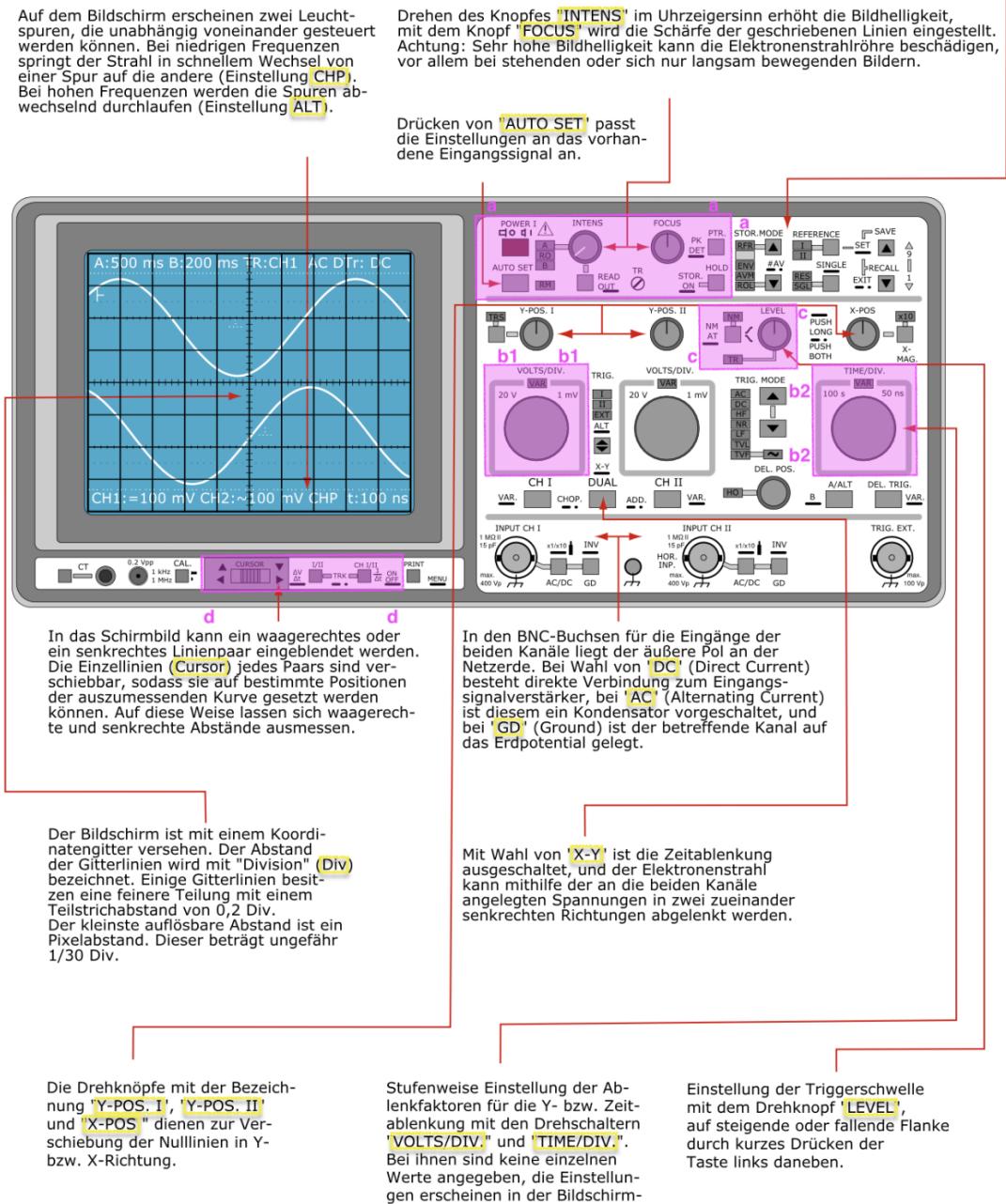
## Bauteilpolung

- $NG : U_{NG} = 10 \text{ V}$
- $R_1 = 3,28\text{k}\Omega : U_1 = -1.96\text{V}$
- $R_2 = 6,79\text{k}\Omega : U_2 = 10.03\text{V}$
- $R_3 = 2,68\text{k}\Omega : U_3 = -1.96\text{V}$
- $R_4 = 2,20\text{k}\Omega : U_4 = 2.90\text{V}$
- $R_5 = 3,89\text{k}\Omega : U_5 = 5.16\text{V}$

## $R_i$ Multimeter Messungen

## 2.2 Durchführung zum Oszilloskop und der Wechselspannung

### MESSEGERÄTE UND ERSTMALIGE VERWENDUNG (WEITERE MESSGERÄTE 71)



**Versuchs Abbildung [V-OSZ-VA11]:** Das im Versuch verwendete Oszilloskop

### Oszilloskop

dient zur Darstellung  
zeitabhängiger Spannungsverläufe  
— Gerätefehler: Abweichungen  
können durch Kalibrierung,  
Tastkopf-Dämpfung oder  
Bandbreitenbegrenzung entstehen.

Modellnummer: **[HM1507-3]**

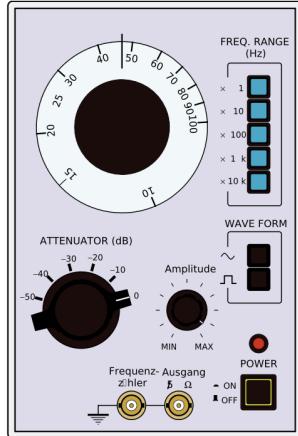
Hersteller und Datenblatt:

**[HAMAG]**

Nächster Prüftermin: **[Sep. 2025]**

Anzahl Kanäle: **[2]**

Datenblatt:



**Versuchs Abbildung [V-OSZ-VA15]:** Der im Versuch verwendete Funktionsgenerator.

### Funktionsgenerator

erzeugt elektrische Signalformen (Sinus, Rechteck, Dreieck) unterschiedlicher Frequenz und Amplitude — Gerätefehler: Signalverzerrungen oder Amplitudenabweichungen durch nichtlineare Verstärkung oder Limitierung der Ausgangsstufe.

Modellnummer: **[AG-203-**

**7090016]**

Hersteller: **[KENWOOD]**

Nächster Prüftermin: **[Sep. 2025]**

Frequenzbereich: **[10] Hz – [1] MHz**

Wellenformen: **[Sin  $\wedge$  Rechteck]**

(Ausgang)Impedanz: **[600]**

Attenuator: **[-50 bis 0 in  $i = 5$  ]**



**Versuchs Abbildung [V-OSZ-VA16]:** Der im Versuch verwendete Frequenzzähler.

### Frequenzzähler

misst präzise die Frequenz periodischer elektrischer Signale — Gerätefehler: Messunsicherheiten durch Triggerfehler, Jitter oder begrenzte Zeitbasisstabilität.

Modellnummer: **[PM 6661]**

Hersteller: **[Philips]**

Nächster Prüftermin: **[Sep. 2025]**

Frequenzbereich: **[400] Hz – [10] MHz**

Auflösung: **[80] MHz**

Anlegewiderstand: **[1] MΩ**

Max. Eingangsspannung: **[220] V**

mit Auflösung: **[<400] Hz**

Max. Eingangsspannung: **[12] V**

mit Auflösung: **[>10] MHz**

**Multimeter** Teilversuch 1a  
misst Spannung, Stromstärke oder  
Widerstand in elektrischen  
Schaltungen — Gerätefehler:  
Messgenauigkeit kann durch  
falsche Einstellung oder  
Abnutzung der Messeingänge  
beeinträchtigt werden.

Modellnummer: [289] Hersteller  
und Datenblatt: [FLUKE] Max.  
Messbereich Spannung: CAT IV  
[600] V Messbereich [600] V;  
Bereichstoleranz: [1% +3] V  
Max. Messbereich Strom: [10] A

## 2.2.1 Basiselemente des Oszilloskops

### Ziel

*Verstehen der Grundfunktionen eines Oszilloskops zur Darstellung zeitlich periodischer Spannungen.*

### Methode

*Untersuchung der Bedienungselemente und erlangen einesverständnis zum Ablenkfaktor und den Triggereinstellungen*

### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A0: NOTIERE DIE ANGABEN ZU DEN GERÄTEN. SIEHE 63 [-x-]
- A1: VERBINDE DIE GERÄTE MITEINANDER. [-x-]
- A2: STELLE AM FUNKTIONSGENERATOR EINE BELIEBIGE FREQUENZ ZWISCHEN 1 kHz UND 10 kHz EIN. [-x-]
- A3: MACHE DICH MIT DEN ANPASSUNGEN FÜR HELLIGKEIT UND SCHÄRFE VERTRAUT (VGL. 63, BEREICH A). [-x-]
- A4: NUTZE AUTO SET. [-x-]
- A5: TESTE DIE POSITIONSEINSTELLUNG IN DEN BEREICHEN B1 UND B2. [-x-]
- A6: STELLE DEN TRIGGER-MODUS AUF NORMAL“ IM BEREICH C EIN. [-x-]
- A7: MACHE DICH MIT EINER ANSTEIGENDEN FLANKE VERTRAUT. [-x-]
- A8: MACHE DICH MIT EINER FALLENDEN FLANKE VERTRAUT. [-x-]
- A9: MACHE DICH MIT DER LEVEL-EINSTELLUNG VERTRAUT. [-x-]

**Ansteigende Flanke:** Fokussiert eine positive Steigung.

**Fallende Flanke:** Fokussiert eine negative Steigung.

**Fokus:** Konzentriert den Elektronenstrahl.

**AUTO SET:** Aktiviert automatischen Bildschirmfokus.

## Referenzgrößen:

- $f_{func}$  FUNKTIONSGENERATOR [EINSTELLUNGSFREQUENZ] P.A. FEHLERFREI  
6983 Hz

### 2.2.2 Messen einer Amplitude

#### Ziel

Aufbau eines Verständnisses zur Cursor Bedienfläche

#### Methode

Ausmessen der Amplitude am Oszilloskop.

#### Experiment:

Arbeitsschritte [-x-] und iterative Prozesse

- A1: STELLE SICHER, DASS DER FREQUENZBEREICH DES MULTIMETERS AUF  $f_{Mult}$  EINGESTELLT IST. [-x-]
- A2: STELLE UNABHÄNGIG VON DER ERKENNTNIS DEN FREQUENZBEREICH DES MULTIMETERS ENTSPRECHEND AM FUNKTIONSGENERATOR EIN. [-x-]
- A3: NOTIERE  $\hat{U}_{Mult}$ . [-x-]
- A4: NUTZE DEN CURSOR SINNVOLL, UM  $\hat{U}_{osz}$  AUSZUMESSEN. MESSE HIER VON MINIMUM BIS MAXIMUM UND TEILE ENTSPRECHEND DURCH 2. [-x-]
- A5: VERGLEICHE  $\hat{U}_{osz}$  MIT  $\hat{U}_{Mult}$ . [-x-]

#### Referenzgrößen:

- $f_{Mult}$  [FREQUENZBEREICH DES MULTIMETERS] FEHLER VERNACHLÄSIGBAR  
45 Hz – 400 Hz
- $f_{func}$  [EINSTELLFREQUENZ DES FUNKTIONSGENERATORS] FEHLER VERNACHLÄSIGBAR  
228 Hz
- $U_{Mult}$  [EFFEKTIWERT DES MULTIMETERS]  $(8,35 \pm 0,09)$  V
- $\Delta U_{osz}$  [DOPPELTE AMPLITUDE]  $(24,00 \pm 0,25)$  V BEI 5 V
- $U_{eff,osz}$  [EFFEKTIWERT DES OSZILLOSKOPS]  $(8,49 \pm 0,08)$  V

### 2.2.3 Messen einer Phasendifferenz

#### Ziel

Bestimmung der Phasendifferenz zweier gleichfrequenter Wechselspannungen.

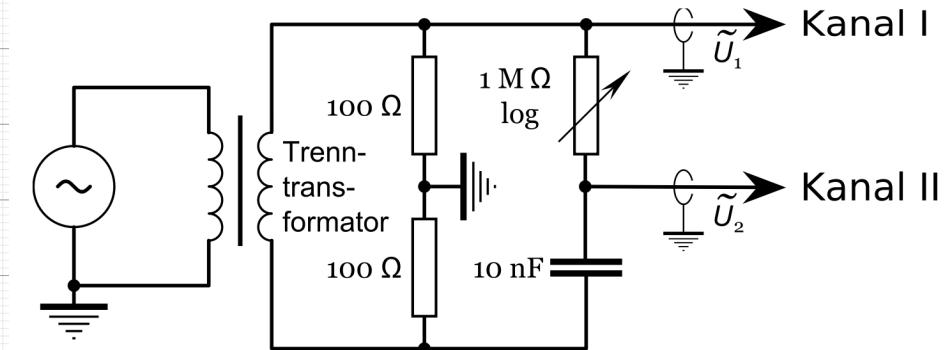
## Methode

Vergleich der Signalverläufe auf dem Oszilloskop und Berechnung der Phasendifferenz.

## Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: BAUE DIE SCHALTUNG ENTSPRECHEND AUF. [-x-]



Versuchsabbildung [V-OSZ-VA22]: Schaltung TV3

- A2: TESTE DIE FUNKTION DES POTENTIOMETERS, STELLE SICHER, DASS EINE PHASENVERSCHIEBUNG VON  $\pi$  MÖGLICH IST. [-x-]
- A3: NUTZE DEN SENKRECHTEN CURSOR, UM DIE PERIODENDAUER AUSZUMESSEN. [-x-]
- A4: BERECHNE DIE FREQUENZ DURCH DRÜCKEN DER CHI/II-TASTE. [-x-]
- A5: BESTIMME DIE PHASENDIFFERENZ MITTELS SINUS-DARSTELLUNG UND DER LISSAJOUS-ELLIPSE WIE FOLGT: [-x-]
- A6: STELLE SICHER, DASS DER T-Y-TRIGGER EINGESTELLT IST. [-x-]
- A7: NOTIERE DAS VORZEICHEN DER PHASENVERSCHIEBUNG ZWISCHEN DEN KANÄLEN UND ERKENNE DIE IMPLIKATION FÜR DIE ZEITLICHE VERSCHIEBUNG. [-x-]
- A8: BETRACHTE DURCH DIE FUNKTIONSTASTE ADD DIE INTERFERENZ DER ÜBERLAGERTEN WELLEN. [-x-]

**Beobachtung:** Konstruktive Interferenz, zweimal Sinus

- A9: STELLE DIE PHASENVERSCHIEBUNG  $\varphi \neq [0, 90, 180]^\circ$  EIN UND MESSE  $T_\varphi$  UND  $F_\varphi$ . [-x-]
- A10: WECHSEL IN DEN X-Y MODUS. [-x-]
- A11: BEOBACHTE DIE FORM DER ELLIPSE BEI ÄNDERUNG DER PHASENVERSCHIEBUNG. [-x-]
- A12: BEOBACHTE DEN EINFLUSS EINER VERÄNDERTEN LAGE DER TEILSCHWINGUNGEN AUF DIE ABLESBARKEIT. [-x-]

- A13: VERBINDE DEN KLINKENSTECKER, UM AUDIO VISUELL ZU ERFASSEN.  
[—]

### Beobachtungen:

- A11: Die Ellipse streckt, staucht sich und rotiert.  
A12: Die Position verschiebt sich, die Spannung wird gestaucht und gestreckt.  
A13: Audioerfassung wurde nicht durchgeführt; dies ist nicht zweckmäßig und nicht priorisiert.

### Referenzgrößen (bei div):

- $T_s$  [PERIODENDAUER] DER SCHWINGUNG, FEHLER VERNACHLÄSSIGBAR 4,56 s BEI 1 ms
- $f_s$  [FREQUENZ] DES SCHWINGUNGSZÄHLERS, FEHLER VERNACHLÄSSIGT 222 Hz
- $f_s$  [FREQUENZ] DER SCHWINGUNG 220 Hz BEI 1 ms
- $T_s$  [FREQUENZ] DER SCHWINGUNG ALS PERIODENDAUER  $(4,54 \pm 0,05)$  ms
- $\Delta t_\varphi$  [PERIODENVERSCHIEBUNG]  $(908,00 \pm 0,05)$  ms BEI 1 ms
- $\Delta X_{X,\varphi}$  [SPANNUNGSVERSCHIEBUNG] 2,55 V BEI 500 mV

### 2.2.4 Betrachten des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators

#### Ziel

Analyse der periodischen Lade- und Entladekurven eines Kondensators.

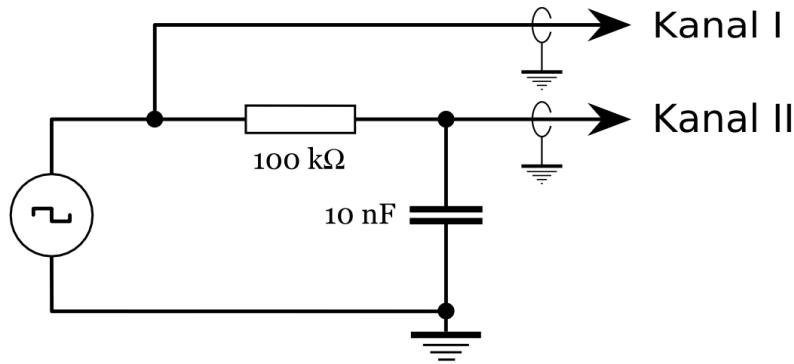
#### Methode

Anregung des Kondensators mit einem Funktionsgenerator und Beobachtung.

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: BAUE DIE SCHALTUNG ENTSPRECHEND AUF. [-x-]



**Versuchs Abbildung [V-OSZ-VA23]:** Schaltung TV4

- A2: WÄHLE AC UND STELLE DIE [FREQUENZ] AM FUNKTIONSGENERATOR AUF ETWA 60 Hz EIN. [-x-]
- A3: NUTZE DAS OSZILLOSKOP SINNVOLL, UM DEN VOLLSTÄNDIGEN AUF- UND ENTLADEVORGANG DES KONDENSATORS ZU BEOBACHTEN. BETRACHTE BEIDE KANÄLE. [-x-]
- A4: ERSETZE DEN  $100\text{ k}\Omega$ -WIDERSTAND DURCH EIN  $1\text{ M}\Omega$  LOGARITHMISCHES POTENTIOMETER UND STELLE EINE VERÄNDERUNG DER KURVE FEST. [-x-]
- A5: VERDOPPLE DIE KAPAZITÄT DURCH EINE PARALLELSCHALTUNG UND STELLE EINE VERÄNDERUNG DER KURVE FEST. [-x-]

### 2.2.5 Messen der Relaxationszeit bei der Entladung eines Kondensators

#### Ziel

Bestimmung der Relaxationszeit  $\tau = RC$  durch digitale Speicherung und wiederholte Anzeige des Entladevorgangs mit dem Oszilloskop.

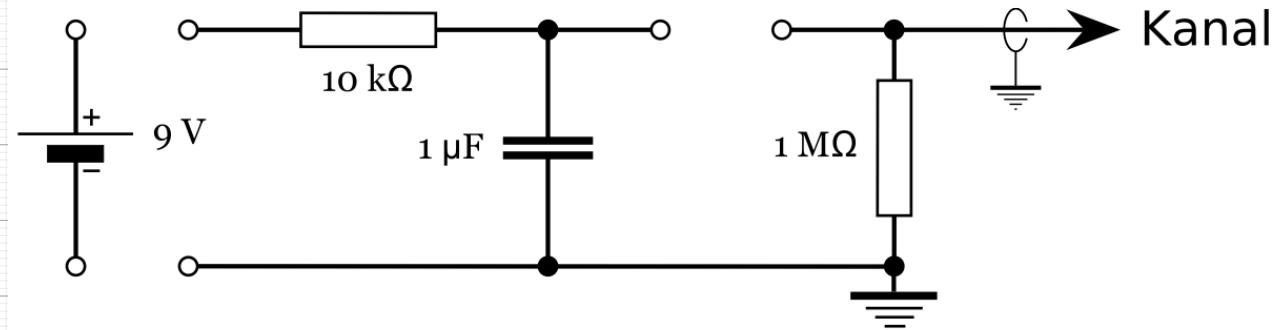
#### Methode

Aufzeichnung des Spannungsverlaufs  $U_C(t)$  am Kondensator mit dem Speicheroszilloskop, anschließende Daueranzeige sowie Vergleichsmessungen mit 1x- und 10x-Tastkopf.

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und iterative Prozesse

- A1: BAUE DIE SCHALTUNG ENTSPRECHEND ABBILDUNG 24 AUF. [-x-]



**Versuchsabbildung [V-OSZ-VA24]:** Entladung eines Kondensators über einen Widerstand

- A2: STELLE AM TASTKOPF DIE GEWÄHLTE DÄMPFUNG (1X ODER 10X) EIN UND NOTIERE DIESE. [-x-]
- A3: WÄHLE AM OSZILLOSKOP NULLPUNKT, VOLT/DIV UND TIME/DIV SO, DASS DER GESAMTE ENTLADEVORGANG IM BILD SICHTBAR IST. [-x-]

- A4: STELLE DEN TRIGGER AUF FALLENDEN FLANKE, WÄHLE EIN SINNVOLLES TRIGGERLEVEL UND AKTIVIERE DEN SPEICHERBETRIEB (STOR ON). [-x-]
- A5: LADE DEN KONDENSATOR ÜBER DEN  $10 \text{ k}\Omega \pm 1\%$ -WIDERSTAND MIT 9 V. [-x-]
- A6: DRÜCKE RESET (RES) UND AKTIVIERE SINGLE (SGL), DAMIT DIE ZEITBASIS NUR EINMAL DURCHLÄUFT. [-x-]
- A7: ENTLADE NUN DEN KONDENSATOR ÜBER DEN  $1 \text{ M}\Omega$ -WIDERSTAND UND BEOBACHTE DEN EXPONENTIELLEN ABFALL DER SPANNUNG AM BILDSCHIRM. [-x-]
- A8: VERWENDE DIE CURSOR-FUNKTION DES OSZILLOSKOPS, UM  $V_0$ ,  $V(t)$  UND DIE ZEIT  $t$  ABZULESEN. BESTIMME INSbesondere DIE ZEIT  $t_{1/e}$ , BEI DER  $U_C(t) = V_0/e$ . [-x-]

### Referenzgrößen:

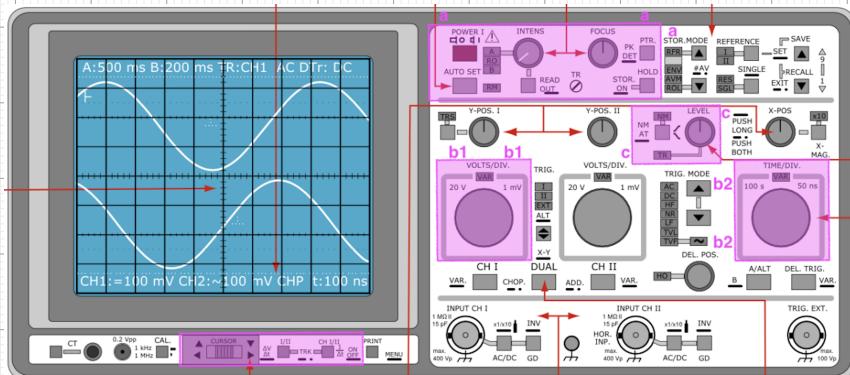
- $S_{\text{TKopf}}$  [TASTKOPF-EINSTELLUNG] 10x
- $V_0$  [ANFANGSSPANNUNG] 9 V BEI 200 mV
- $V(t)$  [SPANNUNG]: [ $\Delta = \text{DIV}/20$ ] — mV BEI 100 mV
- $t$  [ENTLADEZEIT]: [ $\Delta = \text{DIV}/20$ ] — ms BEI 200 ms

| Messreihe osz 1 |  | $i$ | $t$ [ms] | $\pm \Delta$ | $U_C$ [mV] | $\pm \Delta$ | $\ln(U_C)$ | $\pm \Delta$ |
|-----------------|--|-----|----------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
|                 |  | 1   | 200      | 10           | 487        | 5            | 6.188      | 1.606        |
|                 |  | 2   | 400      | 10           | 393        | 5            | 5.975      | 1.606        |
|                 |  | 3   | 600      | 10           | 296        | 5            | 5.689      | 1.606        |
|                 |  | 4   | 800      | 10           | 198        | 5            | 5.288      | 1.606        |
|                 |  | 5   | 1000     | 10           | 100        | 5            | 4.605      | 1.606        |
|                 |  | 6   | 1040     | 10           | 77.5       | 5            | 4.351      | 1.606        |
|                 |  | 7   | 1080     | 10           | 57.5       | 5            | 4.052      | 1.606        |
|                 |  | 8   | 1120     | 10           | 36.8       | 5            | 3.606      | 1.606        |
|                 |  | 9   | 1160     | 10           | 16.5       | 5            | 2.803      | 1.606        |
|                 |  | 10  | 1200     | 10           | 0          | 5            |            | 1.606        |
|                 |  | 11  | 440      | 10           | 375        | 5            | 5.927      | 1.606        |

| Messreihe L.M.B |  | von Anleitung: | zur          | Tast      | kopf         | einstellung | 1x               |
|-----------------|--|----------------|--------------|-----------|--------------|-------------|------------------|
| $i$             |  | $t$ [ms]       | $\pm \Delta$ | $U_C$ [V] | $\pm \Delta$ | $\ln(U_C)$  | $(\pm  \Delta )$ |
| 1               |  | 194            | 10           | 4.60      | 0.01         | 1.526       | 4.606            |
| 2               |  | 390            | 10           | 3.10      | 0.01         | 1.131       | 4.606            |
| 3               |  | 594            | 10           | 2.09      | 0.01         | 0.738       | 4.606            |
| 4               |  | 792            | 10           | 1.40      | 0.01         | 0.336       | 4.606            |
| 5               |  | 267            | 10           | 4.00      | 0.01         | 1.386       | 4.606            |
| 6               |  | 155            | 10           | 5.00      | 0.01         | 1.609       | 4.606            |
| 7               |  | 412            | 10           | 3.00      | 0.01         | 1.099       | 4.606            |
| 8               |  | 613            | 10           | 2.00      | 0.01         | 0.693       | 4.606            |
| 9               |  | 967            | 10           | 0.998     | 0.01         | -0.002      | 4.606            |

## 2.3 Durchführung zur Vierpol-Schaltung

### MESSGERÄTE UND ERSTMALIGE VERWENDUNG



**Versuchs Abbildung [V-OSZ-VA11]:** Das im Versuch verwendete Oszilloskop entspricht den Angaben auf Seite 63

Modellnummer: **[HM504-2]**

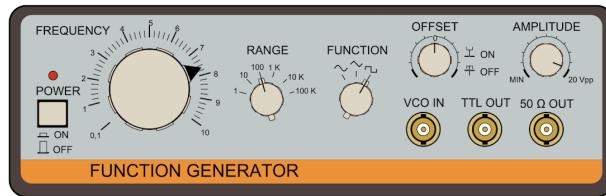
Hersteller und **[Datenblatt]:**

HAMAG

Nächster Prüftermin: **[Okt.**

**2025]**

Anzahl Kanäle: **[2]**



**Versuchs Abbildung [V-VPO-VA21]:** Funktionsgenerator

**Funktionsgenerator**

Modellnummer: **[TG120]**

Hersteller und **Datenblatt:**

Thurlby Thandar Instruments

Nächster Prüftermin: **[Okt.**

**2025]**

Frequenzbereich: **[0.2 Hz bis 20 MHz]**

### 2.3.1 Qualitative Untersuchung einzelner Schalelemente

#### Ziel

Beobachtung der frequenzabhängigen Größen Strom, Spannung und Phasenverschiebung an Widerstand, Kondensator und Spule.

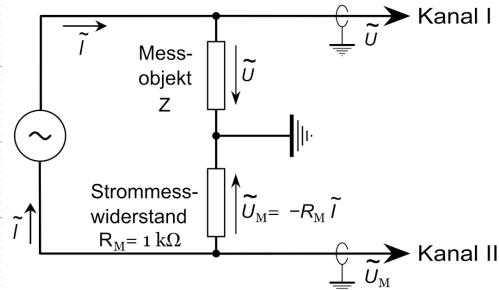
#### Methode

Messung von Strom- und Spannungsverläufen bei Variation der Frequenz und Vergleich mit den theoretischen Phasenbeziehungen.

## Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und iterative Prozesse

- A1: BAUE DIE MESSSCHALTUNG NACH VA22 AUF. [-x-]



**Versuchs Abbildung [V-VPO-VA22]: Widerstand-Messschaltung**

- A2: INVERTIERE EINEN KANAL AM OSZILLOSKOP ENTSPRECHEND DER SCHALTUNG MIT DER TASTE INV. [-x-]
- A3: NUTZE DEN INTERNEN LOW-PASS-FILTER DES FREQUENZZÄHLERS MIT DER TASTE LPF. ACHTE AUF DEN DISPLAYHINWEIS FILT. [-x-]
- A4: ERKENNE (QUALITATIV) SPANNUNG UND STROM UND DOKUMENTIERE DIE OSZILLOSKOPBILDER. [-x-]
- A5: BESTIMMME DIE PHASENVERSCHIEBUNG ZWISCHEN SPANNUNG UND STROM FÜR DEN VERBRAUCHER. [-x-]
- A6: TAUSCHE DEN WIDERSTAND GEGEN DEN KONDENSATOR. [-x-]
- A7: WIEDERHOLE DIE SCHRITTE 4 UND 5 FÜR DEN KONDENSATOR. [-x-]
- A8: TAUSCHE DEN KONDENSATOR GEGEN DIE SPULE. [-x-]
- A9: WIEDERHOLE DIE SCHRITTE 4 UND 5 FÜR DIE SPULE. [-x-]

**Resultierende Referenzgrößen:**

- |  |             |
|--|-------------|
| • $\varphi_R$ PHASENVERSCHIEBUNG WIDERSTAND  | $0^\circ$   |
| • $\varphi_C$ PHASENVERSCHIEBUNG KONDENSATOR | $-90^\circ$ |
| • $\varphi_L$ PHASENVERSCHIEBUNG SPULE       | $90^\circ$  |

**Beobachtung zum Amplitudenverhältnis bei Variation der Frequenz:** Hier wird zwischen Kanal Eins (Spannung) und Kanal Zwei (Strom) differenziert; außerdem wird die Beobachtung bauteilabhängig ausgeführt. - Widerstand: CHI- und CHII-Amplitude bleiben gleich. - Kondensator: CHI-Amplitude wird kleiner, CHII-Amplitude wird größer. - Spule: CHI-Amplitude wird größer, CHII-Amplitude wird kleiner.

**Beobachtung zur Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom:** Die Phasenverschiebung bleibt für alle Verbraucher bei Frequenzänderung gleich.

### 2.3.2 Frequenzverhalten eines RC-Hoch- und Tiefpassfilter

#### Ziel

Veranschaulichung der Funktionsweise von Hoch- und Tiefpassfiltern.

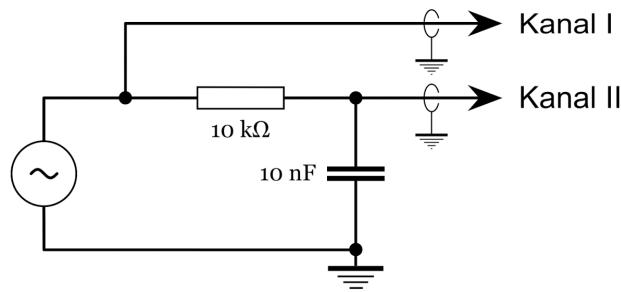
#### Methode

Untersuchung der Signalübertragung bei unterschiedlichen Frequenzen und Nachweis der Filterwirkung.

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und iterative Prozesse

- A1: BAUE DIE MESSSCHALTUNG NACH VA23 AUF. [-x-]



Versuchs Abbildung [V-VPO-VA23]  
RC-Tiefpass

- A2: STELLE DIE TIEFPASS-SCHALTUNG AUF. [-x-]
- A3: NUTZE DIE AUTOSET-TASTE AM OSZILLOSKOP, UM DIE SIGNALPEGEL ANZUPASSEN. [-x-]
- A4: VARIIERE DIE FREQUENZ ZWISCHEN 100 Hz UND 5 kHz IN GEEIGNETEN SCHRITTEN (NICHT ZWINGEND ÄQUIDISTANT). [-x-]
- A5: MESSE DIE AUSGANGSSPANNUNG DES CHI UND NOTIERE DIE AMPLITUDEN. [-x-]
- I1: MESSE FÜR DIE FREQUENZ DIE AUSGANGSSPANNUNG DES CHII UND NOTIERE DIE AMPLITUDEN. [-1-]
- A6: BEOBACHTE DIE PHASENVERSCHIEBUNG ZWISCHEN EINGANG UND AUSGANG BEI ÄNDERUNG DER FREQUENZ; ACHTE BESONDERS AUF DAS GRENZVERHALTEN. [-x-]
- A7: NOTIERE DIE DATEN DER VERWENDETEN BAUTEILE (R, C, EVTL. L). [-x-]
- A8: WIEDERHOLE DIE MESSUNGEN UND BEOBACHTUNGEN FÜR EINEN HOCHPASS. ÜBERLEGE GGF., WIE DIE TIEFPASS-SCHALTUNG ANGEPASST WERDEN MUSS. [-x-]

## Resultierende Referenzgrößen:

- $R$  WIDERSTAND  $(10,0 \pm 0,1) \text{ k}\Omega$
- $C$  KONDENSATOR  $10 \text{ nF}$
- $L$  SPULE  $0,116 \text{ H}$
- $\hat{U}_{1tp}$  AUSGANGSSPANNUNG KANAL 1 TIEFPASS  $(11,9 \pm 0,1) \text{ V BEI } 95 \text{ Hz}$
- $\hat{U}_{2tp}$  -"- :  $\forall \Delta = \text{DGT}/20$  KANAL 2 TIEFPASS  $[-] \text{ V BEI } [-] \text{ Hz}$
- $\hat{U}_{1tp}$  AUSGANGSSPANNUNG KANAL 1 TIEFPASS  $(11,9 \pm 0,1) \text{ V BEI } 4994 \text{ Hz}$
- $\hat{U}_{1hp}$  AUSGANGSSPANNUNG KANAL 1 HOCHPASS  $(11,9 \pm 0,1) \text{ V BEI } 95 \text{ Hz}$
- $\hat{U}_{2hp}$  AUSGANGSSPANNUNG KANAL 2 HOCHPASS  $[-] \text{ mV} \wedge \text{ V BEI } [-] \text{ Hz}$
- $\hat{U}_{1hp}$  AUSGANGSSPANNUNG KANAL 1 HOCHPASS  $(11,8 \pm 0,1) \text{ V BEI } 5034 \text{ Hz}$
- $|G|$  ÜBERTRAGUNGSVERHÄLTNISS  $= \hat{U}_2 \hat{U}_1^{-1}$

| Messreihe<br>$i$ | vpo 1<br>$f$ [Hz] | Tiefpass      |                 |              |       |               |
|------------------|-------------------|---------------|-----------------|--------------|-------|---------------|
|                  |                   | $U_{dgt}$ [V] | $\hat{U}_2$ [V] | $\pm \Delta$ | G [%] | $\varphi$ [°] |
| 0                | 95                | 2             | 11.9            | 0.1          | 100   |               |
| 1                | 399               | 2             | 11.5            | 0.1          | 96.6  | 0             |
| 2                | 699               | 2             | 11.0            | 0.1          | 92.4  |               |
| 3                | 999               | 2             | 10.0            | 0.1          | 84.0  |               |
| 4                | 1271              | 2             | 9.30            | 0.1          | 78.2  |               |
| 5                | 1414              | 2             | 8.82            | 0.1          | 74.1  |               |
| 6                | 1682              | 2             | 8.10            | 0.1          | 68.1  |               |
| 7                | 1902              | 2             | 7.50            | 0.1          | 63.0  |               |
| 8                | 2166              | 2             | 6.88            | 0.1          | 57.8  |               |
| 9                | 2469              | 2             | 6.36            | 0.1          | 53.4  |               |
| 10               | 2709              | 2             | 5.94            | 0.1          | 49.9  |               |
| 11               | 3098              | 2             | 5.38            | 0.1          | 45.2  |               |
| 12               | 3412              | 2             | 4.94            | 0.1          | 41.5  |               |
| 13               | 3608              | 2             | 4.68            | 0.1          | 39.3  |               |
| 14               | 4018              | 1             | 4.33            | 0.05         | 36.4  |               |
| 15               | 4488              | 1             | 3.93            | 0.05         | 33.0  |               |
| 16               | 4730              | 1             | 3.72            | 0.05         | 31.3  |               |
| 17               | 4999              | 0.5           | 3.58            | 0.03         | 30    | 90            |

| Messreihe | vpo 2         | Hochpass      |                 |             |      |                        |
|-----------|---------------|---------------|-----------------|-------------|------|------------------------|
| <i>i</i>  | <i>f</i> [Hz] | $U_{dgt}$ [V] | $\hat{U}_2$ [V] | $\pm\Delta$ | G    | $\varphi$ [ $^\circ$ ] |
| 0         | 95            | 0.5           | 692             | 0.03        | 5.8  |                        |
| 1         | 398           | 1             | 2.70            | 0.05        | 22.7 | 90                     |
| 2         | 699           | 1             | 4.65            | 0.05        | 39.1 |                        |
| 3         | 997           | 1             | 6.09            | 0.05        | 51.2 |                        |
| 4         | 1287          | 1             | 7.31            | 0.05        | 61.4 |                        |
| 5         | 1471          | 1             | 7.90            | 0.05        | 66.4 |                        |
| 6         | 1640          | 2             | 8.38            | 0.1         | 70.4 |                        |
| 7         | 1999          | 2             | 9.08            | 0.1         | 76.3 |                        |
| 8         | 2414          | 2             | 9.66            | 0.1         | 81.2 |                        |
| 9         | 2792          | 2             | 10.1            | 0.1         | 84.9 |                        |
| 10        | 3086          | 2             | 10.3            | 0.1         | 86.6 |                        |
| 11        | 3398          | 2             | 10.5            | 0.1         | 88.2 |                        |
| 12        | 3731          | 2             | 10.6            | 0.1         | 89.1 |                        |
| 13        | 4146          | 2             | 10.8            | 0.1         | 90.8 |                        |
| 14        | 4531          | 2             | 11.0            | 0.1         | 92.4 |                        |
| 15        | 4799          | 2             | 11.0            | 0.1         | 92.4 |                        |
| 16        | 5035          | 2             | 11.0            | 0.1         | 92.4 | 0                      |

### 2.3.3 Resonanzkurve eines Serienschwingkreis

#### Ziel

Quantitative Ermittlung der Resonanzkurve eines Serienschwingkreises.

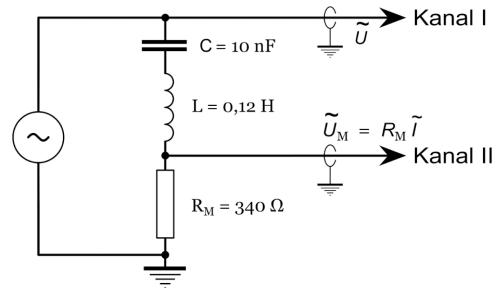
#### Methode

Aufzeichnung der Spannungs- oder Stromamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz und Bestimmung der Resonanzfrequenz sowie der Güte.

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: STELLE DIE SCHALTUNG NACH VA24 AUF. [-x-]



Versuchs Abbildung [V-VPO-VA24]  
Serienschwingkreis Messschaltung

- A2: VARIIERE DIE FREQUENZ VON 3 kHz BIS 6 kHz UND BEOBACHTE STROM- UND SPANNUNGSAMPLITUDE SOWIE DIE PHASENVERSCHIEBUNG. [-x-]

- A3: MESSE DIE SPANNUNGSAMPLITUDE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FREQUENZ. WÄHLE DIE MESSPUNKTE SORGFÄLTIG FÜR EINE QUALITATIV HOCHWERTIGE RESONANZKURVE. [-x-]
- A4: BESTIMME DIE RESONANZFREQUENZ MÖGLICHST GENAU. [-x-]
- A5: NOTIERE BEOBSACHTUNGEN ZUR SPANNUNGSAMPLITUDE DES FUNKTIONSGENERATORS IM RESONANZFALL. [-x-]
- A6: NOTIERE DIE BAUTEILDATEN VON SPULE UND KONDENSATOR. [-x-]
- A7: NOTIERE BEOBSACHTUNGEN ZUR FREQUENZABHÄNGIGEN PHASENVERSCHIEBUNG. [-x-]

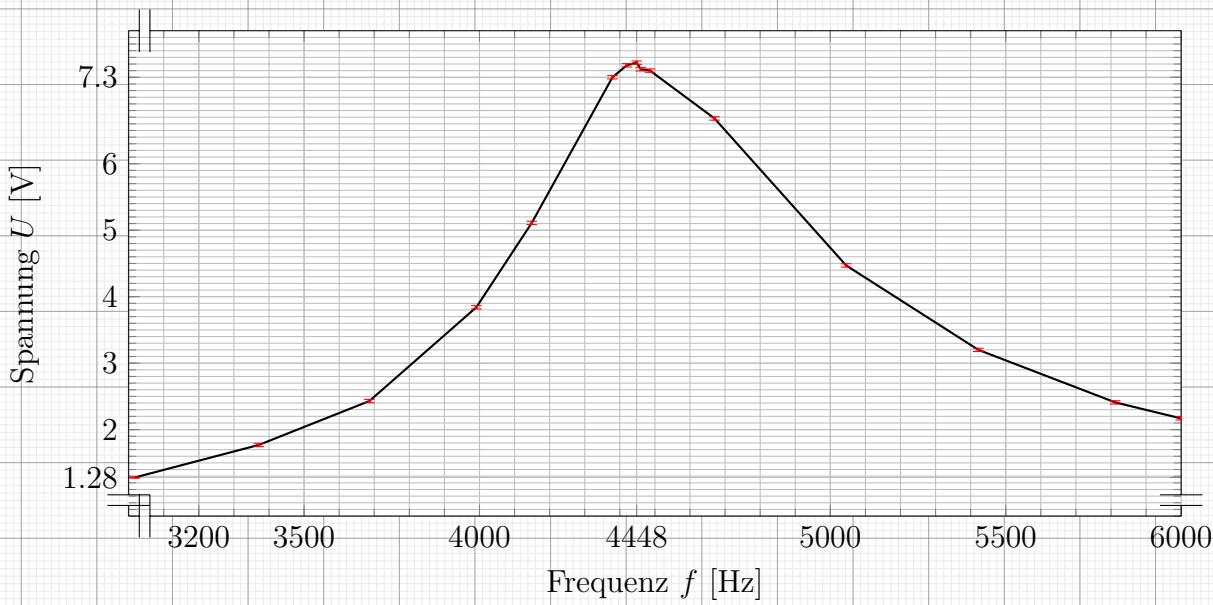
### Resultierende Referenzgrößen:

- $f$  FREQUENZ [—] Hz
- $f_{\text{res}}$  RESONANZFREQUENZ P.A. FEHLERFREI  $4448 \text{ Hz} < 448 \cdot 10^1 \text{ Hz}$
- $R$  WIDERSTAND:  $[\Delta = 1\%R]$   $(340 \pm 4) \Omega$
- $C$  KONDENSATOR:  $[\Delta = 5\%C]$   $(10,0 \pm 0,5) \text{ nF}$
- $L$  SPULE P.A. FEHLERFREI  $0,116 \text{ H}$

**Beobachtung zur frequenzabhängigen Phasenverschiebung** Die Phasenverschiebung bewegt sich entlang der Messreihe (frequenz)  $-90^\circ$  bis  $90^\circ$ .

**Beobachtung zur frequenzabhängigen Phasenverschiebung im Resonanzfall**  
Die Resonanzfrequenz wurde einerseits über das Maximum der folgenden Messreihe (3) ermittelt, auch abgelesen, der ungenauere Wert wurde in (3) ermittelt. Für Nötige Rechnungen wird im folgenden der ungenauere Wert (Curser) verwendet. Die Phasenverschiebung ist im Resonanzfall, wie augezeichnet, gleich Null.

| Messreihe | vpo 3    |                |                 |              |                        |  |
|-----------|----------|----------------|-----------------|--------------|------------------------|--|
| $i$       | $f$ [Hz] | $U_{dgt}$ [mV] | $\hat{U}_2$ [V] | $\pm \Delta$ | $\varphi$ [ $^\circ$ ] |  |
| 1         | 3017     | 200            | 1.28            | 0.010        | -90                    |  |
| 2         | 3371     | 500            | 1.77            | 0.025        |                        |  |
| 3         | 3686     | 500            | 2.43            | 0.025        |                        |  |
| 4         | 3991     | 500            | 3.84            | 0.025        |                        |  |
| 5         | 4149     | 500            | 5.11            | 0.025        |                        |  |
| 6         | 4379     | 500            | 7.30            | 0.025        |                        |  |
| 7         | 4420     | 500            | 7.48            | 0.025        |                        |  |
| 8         | 4448     | 500            | 7.52            | 0.025        | 0                      |  |
| 9         | 4460     | 500            | 7.42            | 0.025        |                        |  |
| 10        | 4486     | 500            | 7.40            | 0.025        |                        |  |
| 11        | 4670     | 500            | 6.68            | 0.025        |                        |  |
| 12        | 5045     | 500            | 4.47            | 0.025        |                        |  |
| 13        | 5422     | 500            | 3.20            | 0.025        |                        |  |
| 14        | 5812     | 500            | 2.41            | 0.025        |                        |  |
| 15        | 5999     | 500            | 2.17            | 0.025        | 90                     |  |



### 2.3.4 Differenzier- und Integrierschaltung

#### Ziel

Beobachtung der zeitlichen Spannungsverläufe von Vierpolen (Integrierer und Differenzierer).

#### Methode

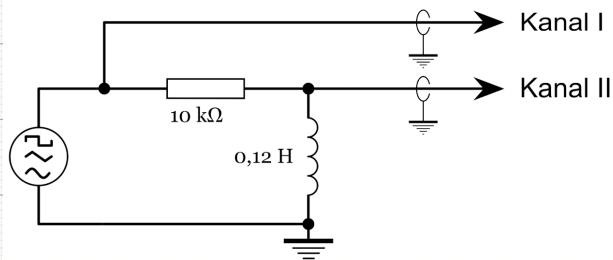
Einspeisung von Rechteck- und Sinussignalen und Analyse der Ausgangssignale zur Bestätigung des erwarteten Verhaltens.

#### Experiment

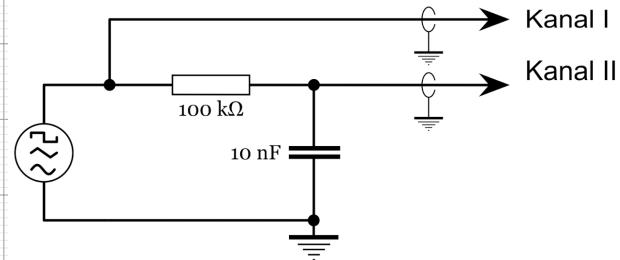
Arbeitsschritte [-x-] und iterative Prozesse

- A0: NOTIERE DIE ANGABEN ZU DEN GERÄTEN. VGL. S. 63

[-x-]



Versuchs Abbildung  
[V-VPO-VA25]  
Differenzierschaltung



Versuchs Abbildung  
[V-VPO-VA26]  
Integrierschaltung

- A1: ÜBERLEGE DIR VORAB DIE FORM DER AUSGANGSSPANNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VOM EINGANGSSIGNAL. WÄHLE DAZU SINUS-, DREIECK- UND RECHTECKSPANNUNG.

[-x-]

- A2: STELLE BEIM DIFFERENZIERER EINE FREQUENZ VON ETWA 500 Hz EIN.  
[-x-]
- A3: STELLE BEIM INTEGRIERER EINE FREQUENZ VON ETWA 5 kHz EIN. [-x-]
- A4: BETRACHTE DIE ZEITLICHEN VERLÄUFE DER AUSGANGSSPANNUNGEN FÜR DIE VERSCHIEDENEN EINGANGSSIGNALEN UND SKIZZIERE QUALITATIV DEINE BEOBSCHAUERUNGEN.  
[-x-]
- A5: ZOOPE MIT DEM OSZILLOSKOP IN BEREICHE, IN DENEN DER SPANNUNGSVERLAUF DES AUSGANGS VOM IDEALEN THEORETISCHEN VERLAUF ABWEICHT. SKIZZIERE DIESE BEREICHE UND ANALYSIERE MÖGLICHE URSAECHEN DER ABWEICHUNGEN UNTER EINBEZIEHUNG DER EINGANGSSPANNUNG.  
[-x-]

**Differenzierer-Verhalten:** Wie angenommen, wird aus einer Sinus-Eingangsfunktion eine Cosinus-Funktion auf dem Oszilloskop angezeigt. Eine Rechteckfunktion am Eingang wird zu einer nahezu geraden Linie mit Störungs-Peaks an den Übergangspunkten der Eingangs-Funktion. Eine Dreiecksfunktion wird zur Rechteckfunktion. **Integrierer-Verhalten:**

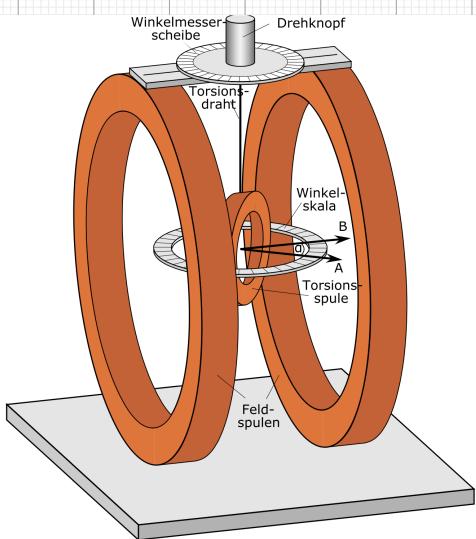
- Sinus  $\Rightarrow$  -Cosinus
- Rechteckfunktion  $\Rightarrow$  Dreiecksform
- Dreiecksform  $\Rightarrow$  periodische Parabel-Folge

## 2.4 Durchführung zum Magnet Feld

|            |   |
|------------|---|
|            | <b>Helmholtzspulenpaar</b><br>Erzeugt ein homogenes<br>Magnetfeld im Versuchsfeld —<br>Gerätefehler:<br>Hersteller: [UNI] Durchmesser:<br>[317mm] Windungszahl:<br>[528wdg] |
| MESSGERÄTE |   |

**Netzgerät**  
Versorgt den Versuchsaufbau mit  
geregelter Spannung —  
Gerätefehler:

Modellnummer: [ DC LAB  
**Power Supply LABPS23023** ]  
Hersteller und Datenblatt:  
[Velleman] Max.  
Ausgangsspannung: [35 V] Max.  
Ausgangsstrom: [6 A]



[V-MAG-VA14]:  
Helmholzspulenpaar

### Magnet XY-Schreiber

Registriert zeitliche  
Magnetfeldänderungen in  
zwei Richtungen —  
Gerätefehler:

Modellnummer: [ ]

Hersteller und  
Datenblatt: [Geitmann  
Messtechnik]

### Vorbemerkung zu Netzteil und Funktionsgenerator

Vor dem Unterbrechen des Stromkreises an der Helmholtzspule (z. B. durch Ausschalten des Netzteils oder Funktionsgenerators) sollte der eingestellte Feldstrom stets langsam auf null heruntergelegt werden. Abruptes Abschalten kann am Helmholtz-Spulenpaar hohe Induktionsspannungen erzeugen und empfindliche Elektronik in den Spannungsversorgungen beschädigen.

### Einstellungen am Schreiber für definierte Anfangsbedingungen:

- **X-Achse:** Taste CAL/VAR: CAL, Taste 0/M: 0, Taste mV/V: mV
- **Y-Achse:** Taste CAL/VAR: CAL, Taste 0/M: 0, Taste mV/V: mV
- **Takt/Zeit:** 1 s/cm
- **Motor:** Standby
- **Pen/Stift:** up

## Funktionsgenerator

Erzeugt sinus-, rechteck- oder  
dreieckförmige Signale —

Gerätefehler:

Modellnummer: [ ] Hersteller und

Datenblatt: [**Scientific**]

Frequenzbereich: [1 Hz **bis**

100 kHz] Amplitude: [0 V **bis**

10 V]

## Multimeter

Zur Messung von Spannung,  
Strom und Widerstand —

Gerätefehler:

Modellnummer: [**MM 1-3**]

Hersteller und Datenblatt:

[**Benning**] Relevanter Fehler:  
[ $\pm 1\% + 3dgt$ ]

## iPad mit Phynox

Erfassung von Messdaten über  
Smartphone-/Tablet-Sensoren —

Gerätefehler:

Hersteller: [**Apple und RWTH**

**Aachen**] Gerätmodell und

Softwareversion: [**14.4 ios18.5**]

App-Version: [**1.2.0**] Sensoren  
genutzt: [**Ja**]

## 2.4.1 Eigenregie-Teilversuch: Smartphoneexperiment zur Bestimmung des Magnetfelds einer Leiterschleife (Durchführung vorab zu Hause)

### Ziel

Einführung in die Untersuchung von Magnetfeldern durch Messung des Magnetfelds einer Leiterschleife sowie der Inklination des Erdmagnetfeldes.

### Methode

Nutzung der Sensoren eines Smartphones in Kombination mit der Phyphox-App zur Datenerfassung.

### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: STARTE DIE PHYPHOX-APP UND AKTIVIERE DEN MAGNETFELDSENSOR.  
[-x-]
- A2: KALIBRIERE DEN SENSOR DURCH AXIALE ROTATION, NOTIERE DIE ANFANGSWERTE.  
[-x-]
- A3: VERBINDE KABEL UND ZELLE IN EINER SCHLEIFENKONSTRUKTION MIT EINER WINDUNG UND  $R_0$ .  
[-x-]
- A4: BEWEGE DEN SENSOR UND FINDE SEINE EXAKTE, UNGEFÄHRE POSITION AM MESSGERÄT.  
[-x-]
- I1: VARIIERE  $r$  FÜNFMAL UND NOTIERE  $B_z$ .  
[-1-]
- A5: NOTIERE DAS INDUZIERTE MAGNETFELD.  
[-x-]
- A6: MISS DAS MAGNETFELD IN ABHÄNGIGKEIT VON DER POSITION DER LEITERSCHLEIFE.  
[-x-]

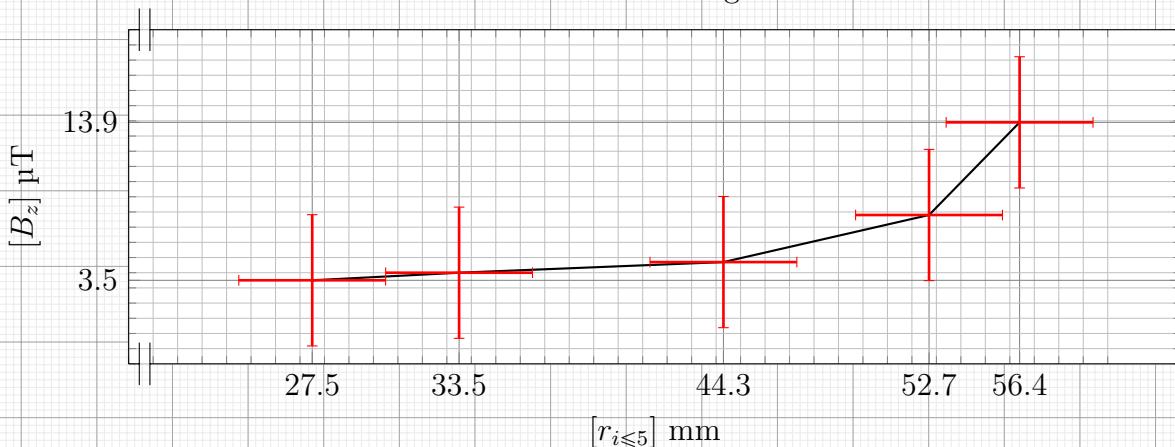
Resultierende Referenzgrößen:

- $r_0$  ANFANGSRADIUS DER LEITERSCHLEIFE  $(27,5 \pm 3,0) \text{ mm}$
- $B_{x,y,z}$  ANFANGSMAGNETFELDSTÄRKE  $3.15_x \wedge 9.45_y \wedge -42.91_z \text{ mT}$
- $\bar{B}_z \pm \sigma_{Bz}$  MAGNETFELDFEHLER  $(6,78 \pm 4,32) \text{ mT}$

**Sensorposition:** Rechts oder links oben, nicht sehr genau, aber mit gefundener Stelle messbar.

| Messreihe mag 1 |  | $r_i$ | $\pm\Delta$ | $\Delta B_z$ |
|-----------------|--|-------|-------------|--------------|
| $i$             |  |       |             |              |
| 1               |  | 27.5  | 3           | 3.5          |
| 2               |  | 33.5  | 3           | 4.0          |
| 3               |  | 44.3  | 3           | 4.7          |
| 4               |  | 52.7  | 3           | 7.8          |
| 5               |  | 56.4  | 3           | 13.9         |

## Radius-Fluss-Diagramm



### 2.4.2 Sichtbarmachen der Magnetfeldlinien mit Hilfe von Eisenspänen

#### Ziel

*Qualitative Darstellung von Magnetfeldlinien.*

#### Methode

*Streuen beweglicher Eisenspäne in eine Ebene parallel zur Feldspulenachse und Beobachtung ihrer Ausrichtung entlang der Feldlinien.*

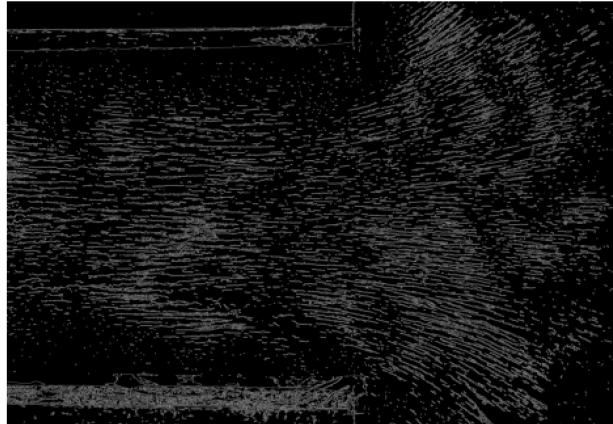
#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: SCHEIDE EIN SCHREIBPAPIER ENTSPRECHEND DES VORLIEGENDEN ALUMINIUMBLECHS AUS UND KLEBE ES ANSCHLIESSEND AUF. [-x-]
- A2: FÜGE DAS BEKLEBTE BLECH IN DIE HALTERUNG DES SPULENPAARS EIN. [-x-]
- A3: STREUE EISENPARTIKEL GANZFLÄCHIG AUF DAS BLATT. [-x-]
- A4: SCHALTE DAS NETZGERÄT MIT  $I_0$  EIN. [-x-]
- A5: VERBINDE DAS SPULENPAAR MIT DEM NETZGERÄT. [-x-]
- A6: ERHÖHE DEN SPANNUNGSREGLER AUF DEN MAXIMALWERT. [-x-]
- A7: BEOBACHTE DIE ANZEIGEN UND NOTIERE DIE WERTE. [-x-]
- A8: ERHÖHE DEN STROMREGLER AUF DEN MAXIMALWERT. [-x-]
- A9: RICHTETE DIE PARTIKEL DURCH LANGSAMES KLOPFEN MIT DEM FELD AUS. [-x-]
- A10: REDUZIERE DEN STROM WIEDER AUF  $I_0$ . [-x-]
- A11: FOTOGRAFIERE DEN FELDLINIENVERLAUF, ERGÄNZTE DIE SKIZZE UM DAS RESTFELD. [-x-]

## Resultierende Referenzgrößen:

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| • $I$ EINGESTELLTER STROM   | 1,92 A      |
| • $U$ EINGESTELLTE SPANNUNG | 32,2 V      |
| • ANHANGSKENNUNG            | 0080002242  |
| • ANHANGSMASKE              | 0080002242C |



### 2.4.3 Drehmoment des Feldes auf eine stromdurchflossene Spule

#### Ziel

Untersuchung des Drehmoments, das ein Magnetfeld auf eine stromdurchflossene Spule ausübt, in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Spulenachse und Feldrichtung.

#### Methode

Variation des Winkels und Beobachtung der Auslenkung der Spule.

#### Experiment: Arbeitsschritte [-x-] und iterative Prozesse

- A1: BRINGE DIE WINKELSKALA AN DAS ZENTRIERTE SPULENPAAR AN. [-x-]
- A2: BAUE DIE TORSIONSSPULE EIN. [-x-]
- A3: VERBINDE DIE TORSIONSSPULE MIT DEN STROMZUFÜHRUNGSBUCHSEN. [-x-]
- A4: SCHLIESSE DEN STROMKREIS DURCH VERBINDUNG DES ZWEITEN AUSGANGS DES NETZGERÄTS MIT DEN KABELN. [-x-]
- AA: BEACHTE DIE ANSCHLUSSLEITUNGEN UND MINIMIERE IHRE STÖRUNG DER TORSIONSSPULE. [-x-]
- A5: POSITIONIERE DIE WINKELSKALA ZENTRIERT UM DIE TORSIONSSPULE UND FIXIERE SIE MIT DER KLEMMSCHRAUBE. [-x-]
- A6: RICHTE DIE ACHSE DER TORSIONSSPULE SENKRECHT ZUR ACHSE DES SPULENPAARS AUS. [-x-]

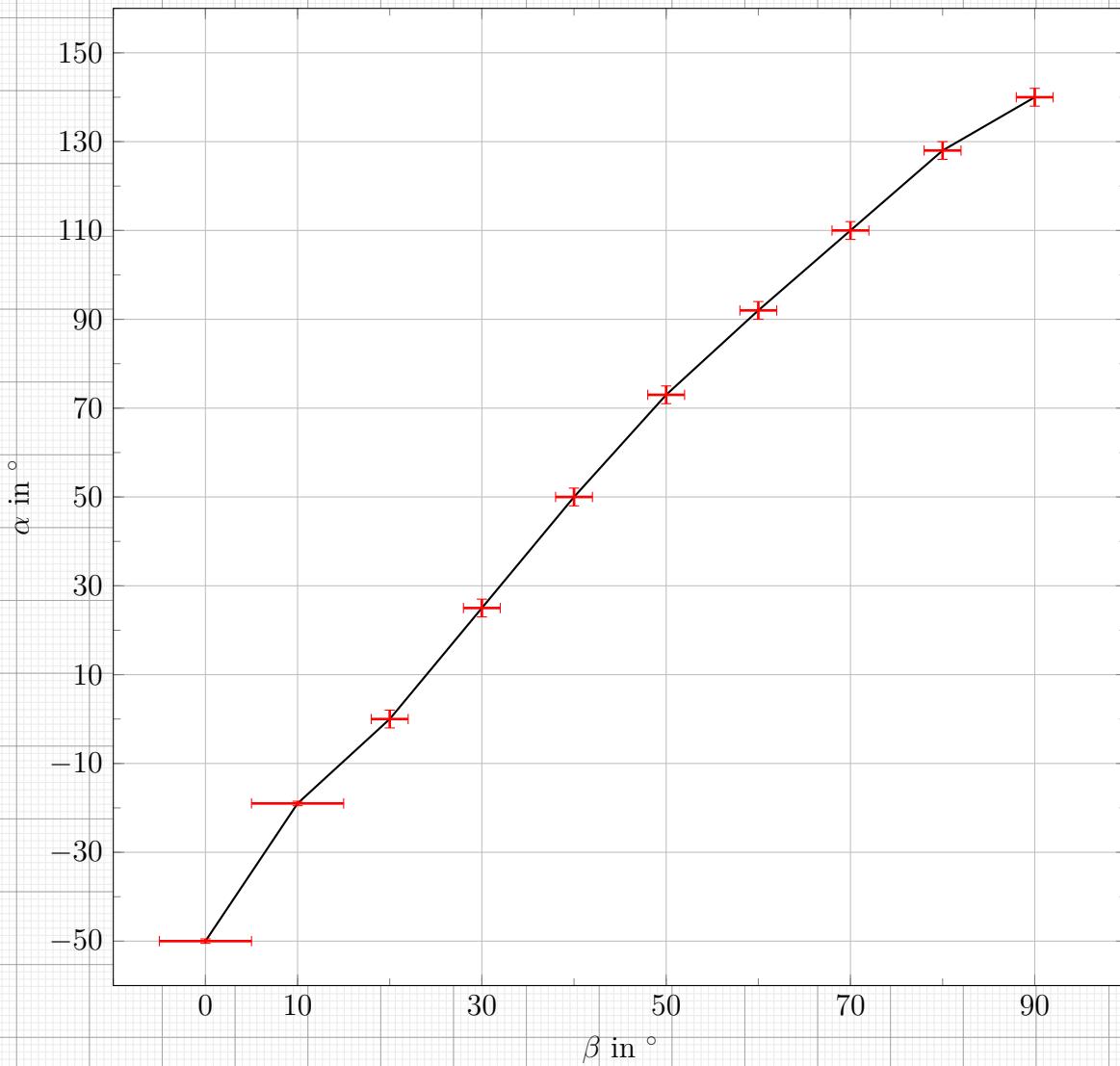
- A7: STELLE FELD- UND TORSIONSSSTROM AUF  $I_{\text{MAX}}$  (ABSCHÄTZEN MIT EINGEBAUTEM STROMMESSGERÄT). [-x-]
- A8: VERDREHE DIE TORSIONSSPULE UM DEN MAXIMALEN WINKEL  $\beta_{\text{MAX}}$ . [-x-]
- A9: HALTE DIE STRÖME KONSTANT; ABWEICHUNGEN FÜHREN GGF. ZU WIEDERHOLUNG VON A4–A9. [-x-]
- A10: ÖFFNE DEN STROMKREIS DER TORSIONSSPULE, SCHALTE DEN STROM AUS. [-x-]
- A11: RICHTE DEN FLÄCHENVEKTOR DER TORSIONSSPULE MÖGLICHST GENAU AUF DIE FELDRICHTUNG DES HELMHOLTZ-SPULENPAARS AUS. [-x-]
- A12: STELLE DIE ROTATIONSFREIHEIT BEIM WIEDEREINSCHALTEN SICHER, WIEDERHOLE A12 FALLS NÖTIG. [-x-]
- A13: SCHALTE FÜR DIE MESSREIHE ALLE STRÖME EIN. [-x-]
- I1: VARIIERE  $\beta$  IN ÄQUIDISTANTEN SCHRITTEN. [-1-]
- A14: NOTIERE DIE DREHKNOPFANFANGSSTELLUNG  $\alpha_0$ . [-x-]
- I2: NOTIERE DIE DREHKNOPFSTELLUNG  $\alpha_i$  NACH AUSLENKUNG. [-2-]
- A15: SCHÄTZE DIE ABLESEFEHLER. [-x-]
- A16: STELLE STROM UND SPANNUNG WIEDER AUF NULL ZURÜCK (SIEHE GERÄTE). [-x-]

### Resultierende Referenzgrößen:

|  |        |
|--|--------|
| • $I_{\text{MAX}}$ GROBER STROMMAXIMALWERT                   | 1,87 A |
| • $\beta_{\text{MAX}}$ MAXIMALE AUSLENKUNG DER TORSIONSSPULE | 90°    |
| • $\Delta\beta$ ÄQUIDISTANTE AUSLENKUNGSSCHRITTE             | 10°    |
| • $\beta_i$ AUSLENKUNG DER TORSIONSSPULE                     | [—] °  |
| • $\alpha_0$ DREHKNOPFSTELLUNG IN NULLAGE                    | 0°     |
| • $\alpha_i$ DREHKNOPFSTELLUNG NACH AUSLENKUNG               | [—] °  |

| Messreihe mag 2 |  | $\beta_i$ | $\delta\beta_i$ | $\alpha_i$ | $\delta\alpha_i$ |
|-----------------|--|-----------|-----------------|------------|------------------|
| $i$             |  |           |                 |            |                  |
| 1               |  | 0         | 5               | -50        | 0.5              |
| 2               |  | 10        | 5               | -19        | 0.5              |
| 3               |  | 20        | 2               | 0          | 2                |
| 4               |  | 30        | 2               | 25         | 2                |
| 5               |  | 40        | 2               | 50         | 2                |
| 6               |  | 50        | 2               | 73         | 2                |
| 7               |  | 60        | 2               | 92         | 2                |
| 8               |  | 70        | 2               | 110        | 2                |
| 9               |  | 80        | 2               | 128        | 2                |
| 10              |  | 90        | 2               | 140        | 2                |

# Magnetauslenkungs-Diagramm



## 2.4.4 Induktion durch Drehen einer Spule in einem Magnetfeld

### Ziel

Nachweis der Induktion einer Spannung durch Bewegung einer Spule in einem konstanten Magnetfeld.

### Methode

Drehung einer Spule, Registrierung des zeitlichen Verlaufs der induzierten Spannung und Bestimmung der Feldstärke aus Messwerten und Spulengeometrie.

### Experiment: Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: STELLE GEMÄSS 79 DEN SCHREIBER AUF DIE ANFANGSBEDINGUNG.  
(AA) [-x-]
- AA: BEACHE, DASS BEIM VERKABELN DES SCHREIBERS DER STANDBY-MODUS GEWÄHLT WERDEN MUSS. [—]

- A2: VERBINDE EIN MULTIMETER MIT MESSEINSTELLUNG I. [-x-]
- A3: MONTIERE DIE MOTORGETRIEBENE INDUKTIONSSPULE. [-x-]
- A4: SCHLIESSE DIE SPULE AN DIE Y-ABLENKUNG DES SCHREIBERS AN. [-x-]
- A5: SCHALTE DEN MOTOR EIN UND MINIMIERE KABELVERDRILLUNG. [-x-]
- A6: SCHALTE DAS NETZGERÄT GEgebenENFALLS WIEDER EIN UND STELLE DIE SPANNUNG AUF  $U_0$  EIN. [-x-]
- A7: ZEICHNE MIT DEM SCHREIBER EINE NULLLINIE FÜR DIE INDUIZIERTE SPANNUNG. [-x-]
- A8: ZEICHNE DIE INDUIZIERTE SPANNUNG BEI LAUFENDEM MOTOR MIT DEM ABLENKFAKTOR  $1\text{ s}/\text{cm}$ . [-x-]
- A9: NOTIERE DIE SCHREIBER-EINSTELLUNG FÜR DIE T- UND Y-ACHSE. [-x-]
- A10: MESSE ALLE FÜR DIE BERECHNUNG DER MAGNETISCHEN FLUSSDICHTE RELEVANTEN GRÖSSEN. [-x-]
- A11: REGLE NACH (GERÄTE) STROM UND SPANNUNG WIEDER AUF NULL. [-x-]

#### Resultierende Referenzgrößen:

|                                      |                                       |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| • $I_{\text{MULT}}$ MULTIMETER STROM | 1,218 A                               |
| • $U_0$ SPANNUNGSANFANGSEINSTELLUNG  | 21,5 V                                |
| • SCHREIBEREMPINDLICHKEIT IN Y       | 0,1 mV/cm                             |
| • SCHREIBEREMPINDLICHKEIT IN T       | 1 s/cm                                |
| • MOTORFREQUENZ                      | 0,231 Hz                              |
| • MOTOR INNENWINDUNGEN               | 82800WDG MIT A = 23,5 cm <sup>2</sup> |
| • HELMHOLTZSPULEN RADIUS             | 158,5 mm                              |
| • ANHANGSKENNUNG                     | 0080002244                            |

#### 2.4.5 Induktion durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld

#### Ziel

Untersuchung der Induktion in einer stationären Spule durch ein zeitlich variables Magnetfeld. Überprüfung des Induktionsgesetzes.

#### Methode

Registrierung des zeitlichen Verlaufs der Feldstärke und der induzierten Spannung, Nachweis der Proportionalität der Induktionsspannung zur negativen Zeitableitung der Feldstärke.

# Experiment: Induktion einer Spannung in einer unbewegten Spule durch ein zeitlich variables Feld

**Ziel:** Registrierung des zeitlichen Verlaufs der Feldstärke und der induzierten Spannung. Überprüfung des Induktionsgesetzes.

## Vorbereitung der Apparatur

- A1: VERBINDE DEN FUNKTIONSGENERATOR MIT DER HELMHOLTZSPULENPAAR. [-x-]
- A2: SCHALTE DEN SCHREIBER IN DEN STANDBY-MODUS. [-x-]
- A3: BRINGE DEN FLÄCHENVEKTOR DER INDUKTIONSSPULE (UMLAUFRICHTUNG BEACHTEN) DURCH VORSICHTIGES DREHEN DER MOTORWELLE IN ÜBEREINSTIMMUNG MIT DER FELDRICHTUNG. [-x-]
- A4: SCHALTE DEN FUNKTIONSGENERATOR EIN UND WÄHLEN SIE DIE DREIECKSFUNKTION. [-x-]
- A5: STELLE DIE FREQUENZ DER DREIECKSFUNKTION SO EIN, DASS DIE PERIODENDAUER  $T \approx 20\text{s}$  BETRÄGT. [-x-]
- A6: VERBINDE DEN Y-EINGANG DES SCHREIBERS MIT DER FELDSPULE, SODASS SPÄTER AUS DEM PLOT DER FELDSTROM BESTIMMT WERDEN KANN. [-x-]
- A7: PRÜFE, OB DIE PERIODENDAUER DER GEWÜNSCHTEN ZEIT ENTSPRICHT. [-x-]
- A8: WÄHLEN SIE ALS ABLENKFAKTOREN FÜR DEN Y-EINGANG  $20\text{mV/cm}$ . [-x-]
- A9: STELLE DIE AMPLITUDE DER DREIECKSFUNKTION SO EIN, DASS DER SCHREIBER ETWAS WENIGER ALS DIE HALBE BLATTHÖHE AUSNUTZT. [-x-]
- A10: VERWENDE DIE ZEITABLENKUNG DES SCHREIBERS: TASTER XY/YT AUF YT, REZIPROKE GESCHWINDIGKEIT AUF  $1\text{s/cm}$ , START MIT TASTER START. [-x-]
- A11: SYNCHRONISATION VON FUNKTIONSGENERATOR UND SCHREIBER MANUELL:
  1. TASTE SWEEP AM GENERATOR SO OFT DRÜCKEN, BIS "READY" ERSCHEINT (KEIN SIGNAL AM AUSGANG).
  2. TASTE SWEEP AM GENERATOR UND TASTE START AM SCHREIBER GLEICHZEITIG DRÜCKEN.[-x-]
- A12: STARTE DEN FELDSTROM UND ZEICHNE SIE IHN MIT DEM SCHREIBER IN DER OBEREN BLATTHÄLFTE AUF. [-x-]
- A13: ZEICHNE DIE NULLLINIE FÜR DEN FELDSTROM AUF. [-x-]
- A14: ZEICHNE DIE INDUKTIONSSPANNUNG IN DER UNTEREN BLATTHÄLFTE AUF. [-x-]
- A15: ZEICHNE DIE NULLLINIE FÜR DIE INDUKTIONSSPANNUNG AUF. [-x-]

- I1: ZEICHNE AUF DEMSELBEN BLATT VIER WEITERE VERLÄUFE VON FELDSTROM UND INDUIZIERTER SPANNUNG AUF, INDEM SIE DIE AMPLITUDE DES FELDSTROMS IN ÄQUIDISTANTEN SCHRITTEN REDUZIEREN.  
DOKUMENTIEREN SIE IHRE VORGEHENSWEISE ZUR MINIMIERUNG SYSTEMATISCHER FEHLER. [-x-]
- A16: NOTIERE DIE SCHREIBEREINSTELLUNGEN FÜR Y- UND T-ACHSE. [-x-]

## 2.5 Durchführung der Phänomene aus der Wärmelehre

### MESSGERÄTE UND ERSTMALIGE VERWENDUNG

#### Versuchshinweis

- Die Angaben der zu verwendenden Massen für Wasser und die Temperaturangaben sind Richtwerte (z. B. um ein Überlaufen zu verhindern). Für die Auswertung müssen jedoch stets die tatsächlich gemessenen Werte protokolliert werden!
- Der Tauchheizereinsatz und der Rührfisch müssen sich bei allen Versuchen im Kalorimeter befinden (auch wenn sie nicht benötigt werden), damit das Kalorimeter stets denselben Wasserwert hat.
- Temperaturen möglichst zeitnah zum Mischprozess messen, da sie sich schnell ändern. Andererseits bei allen Messungen warten, bis sich die Temperaturanzeige einigermaßen stabilisiert hat (Trägheit des Thermofühlers).
- Magnetrührer muss während der Versuche in Betrieb sein (ca. 400 U/min). Vor jedem Versuch prüfen, ob sich der Rührfisch im Kalorimeter dreht.
- Das Manometer ist so konstruiert, dass es bei Luftdruck null anzeigen würde. Die Messwerte sind in der Auswertung entsprechend zu korrigieren.
- Beim Umfüllen von flüssigem Stickstoff ( $T \approx -196^\circ\text{C}$ ) stets Gesichts- und Handschutz tragen, langsam und kontrolliert gießen, für gute Belüftung sorgen und nur zugelassene Kryo-Gefäße verwenden.

#### Verwendungshinweis

#### Kalorimeter

Hersteller: [Uni]  
NTC Fehler: [3%o +  
1°C]

- Bestimmen Sie Massen immer vordem einzutauchen, Trocken.
- Füllen Sie das Kalorimetergefäß mit 0,80 kg kaltem Wasser. → Die Füllhöhe einschließlich Probekörper entspricht damit der Hersteller-Wasserwertbestimmung.
- Heizen Sie die Probekörper im Temperierbad auf ca.  $80^\circ\text{C}$  auf. → Bei Erreichen der Endtemperatur  $\Theta_s$  messen und Stabilität prüfen. → Danach Probekörper noch etwas im Bad belassen, bis vollständige Temperaturan- gleichung erfolgt ist.

#### Verwendungshinweis

#### Kältebad

Hersteller: [Uni]

- Kältebad mit flüssigem Stickstoff nur in zugelassenen Dewargefäßen ansetzen; Schutzbrille, Kryohandschuhe und Schürze tragen, langsames Eingießen zur Vermeidung von Spritzern beachten.

## Tischmultimeter

Hersteller und Datenblatt:

**Keithley**

Modell: **177 Microvolt DMM**

(**4½-digit**)

Max. Messbereich: 20 mV –

1000 V, 20  $\mu$ A – 2 A, 20  $\Omega$  – 20 M $\Omega$

Funktionen: AC True RMS,

Optionen: Batteriepack 6 h,

BCD-Ausgang, GPIB

## Verwendungshinweis

**Thermosäule Teilversuch [ ]**

- Thermosäule nur an den vorgesehenen Kontakten berühren; keine direkte Erwärmung durch offene Flammen, vor Feuchtigkeit schützen und beim Anschluss auf richtige Polung achten.

## 2.5.1 Erster Teilversuch: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern

**Ziel:** Bestimmung der Wärmekapazität verschiedener Körper und Vergleich mit der Theorie von Dulong und Petit.

**Methode:** Durchführung kalorimetrischer Messungen.

### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und iterative Prozesse

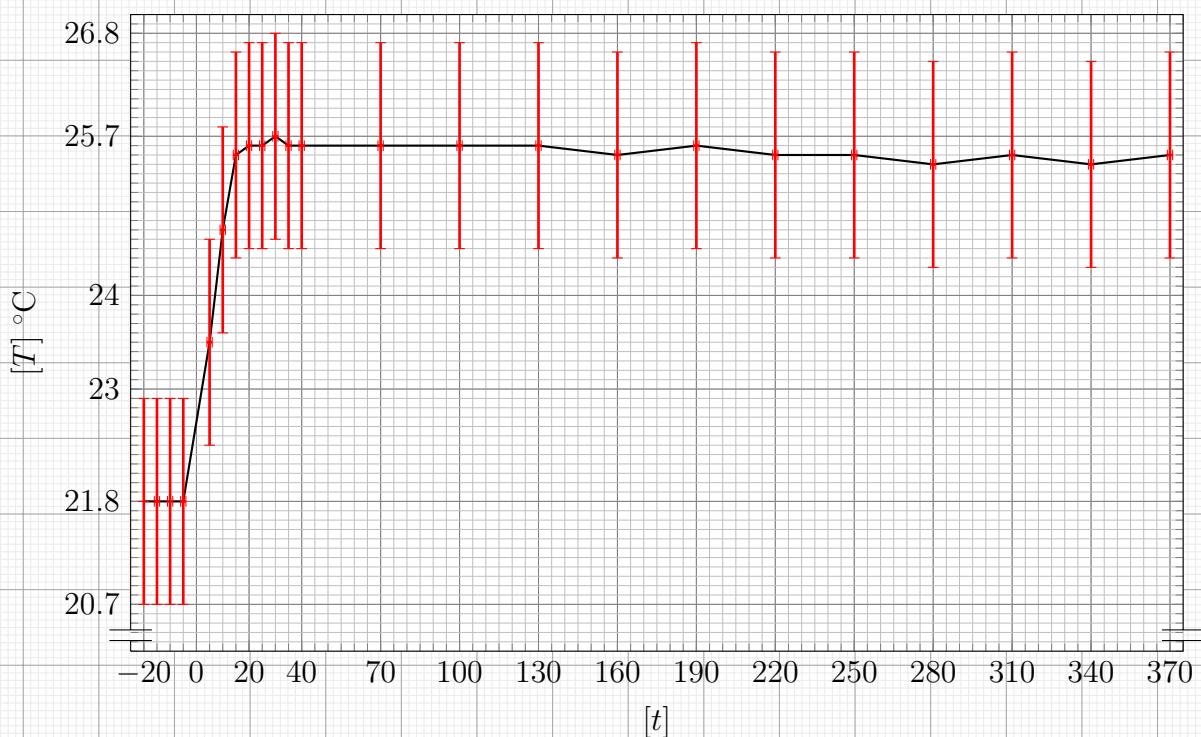
- A1: PROBENVORBEREITUNG: AUSWAHL UND REINIGUNG DER FESTKÖRPER. [-x-]
- A2: KALORIMETERVORBEREITUNG: BEFÜLLEN UND TEMPERATUR MESSEN. [-x-]
- A3: ERWÄRME DEN PROBEKÖRPER IM TEMPERIERBAD AUF  $T_e$ . [-x-]
- A4: FÜHRE VOR DEM KALORIMETERKONTAKT EINE MESSUNG DER PROBEKÖRPER-TEMPERATUR  $T_{pk}$  DURCH. NUTZE DAFÜR DEN KALORIMETER-SENSOR. [-x-]
- A5: SETZE DEN SENSOR WIEDER IN DAS KALORIMETER EIN UND PROTOKOLLIERE DEN OUTPUT  $T_{kmPb}$ . [-x-]
- A6: BEGINNE JETZT BEI  $t = -20\text{ s}$  MIT DER TEMPERATURAUFZEICHNUNG, MESSE MÖGLICHST WIE IN DER TABELLE VORGEGEBEN, UND NOTIERE DIE TATSÄCHLICHEN MESSZEITEN SOWIE  $T_{kmPb}$ . [-x-]
- I1: MESSE  $T_{kmPb}$ . [-1-]
- A7: SETZE BEI  $t = 0\text{ s}$  DEN AM DECKEL DES KALORIMETERS EINGEHÄNGTEN PROBEKÖRPER IN DAS KALORIMETER EIN UND PROTOKOLLIERE WEITERHIN  $T_{kmPb}$ . [-x-]
- I2: MESSE  $T_{kmPb}$ . [-2-]

Resultierende Referenzgrößen:

- $T_e$  PROBEKÖRPER ANFANGSTEMPERATUR, P.A. FEHLERFREI  $80\text{ }^\circ\text{C}$
- $m_{Pb}$  PROBEKÖRPER-MASSE:  $[\Delta = 0.13\forall < 600\text{ g}]$   $(1931,70 \pm 0,13)\text{ g}$
- $m_{kalW}$  KALORIMETER-FÜLLMASSE  $(800,10 \pm 0,13)\text{ g}$
- $T_{pk}$  PROBEKÖRPER NACH WÄRMEBAD:  $[\Delta = \theta \cdot 3\% + 1\text{ }^\circ\text{C}]$   $(68,0 \pm 1,2)\text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{kmPb}$  KALORIMETER-TEMPERATUR ZUM PROBEKÖRPER  $[=]\text{ }^\circ\text{C}$
- $t_{mu}$  MESSUHRSCHEITTE (P.A. EXACT)  $[=]\text{ s}$

| Messreihe apw 2 |  | $i$ | $t_{mu}$ | $\pm \Delta$ | $T_{kmPb}$ | $\pm \Delta$ |
|-----------------|--|-----|----------|--------------|------------|--------------|
|                 |  | 1   | -20      | 0            | 21.8       | 1.1          |
|                 |  | 2   | -15      | 1            | 21.8       | 1.1          |
|                 |  | 3   | -10      | 1            | 21.8       | 1.1          |
|                 |  | 4   | -5       | 1            | 21.8       | 1.1          |
|                 |  | 5   | 0        |              |            |              |
|                 |  | 6   | 5        | 1            | 23.5       | 1.1          |
|                 |  | 7   | 10       | 1            | 24.7       | 1.1          |
|                 |  | 8   | 15       | 1            | 25.5       | 1.1          |
|                 |  | 9   | 20       | 1            | 25.6       | 1.1          |
|                 |  | 10  | 25       | 1            | 25.6       | 1.1          |
|                 |  | 11  | 30       | 1            | 25.7       | 1.1          |
|                 |  | 12  | 35       | 1            | 25.6       | 1.1          |
|                 |  | 13  | 40       | 1            | 25.6       | 1.1          |
|                 |  | 14  | 70       | 1            | 25.6       | 1.1          |
|                 |  | 15  | 100      | 1            | 25.6       | 1.1          |
|                 |  | 16  | 130      | 1            | 25.6       | 1.1          |
|                 |  | 17  | 160      | 1            | 25.5       | 1.1          |
|                 |  | 18  | 190      | 1            | 25.6       | 1.1          |
|                 |  | 19  | 220      | 1            | 25.5       | 1.1          |
|                 |  | 20  | 250      | 1            | 25.5       | 1.1          |
|                 |  | 21  | 280      | 1            | 25.4       | 1.1          |
|                 |  | 22  | 310      | 1            | 25.5       | 1.1          |
|                 |  | 23  | 340      | 1            | 25.4       | 1.1          |
|                 |  | 24  | 370      | 1            | 25.5       | 1.1          |

Temperatur-Zeit-Diagramm



## 2.5.2 Zweiter Teilversuch: Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern

**Ziel:** Nachweis der Grenze der Dulong-Petitschen Regel bei tiefen Temperaturen.

**Methode:** Abkühlung der Proben mit flüssigem Stickstoff und Messung der Wärmekapazität.

### Experiment

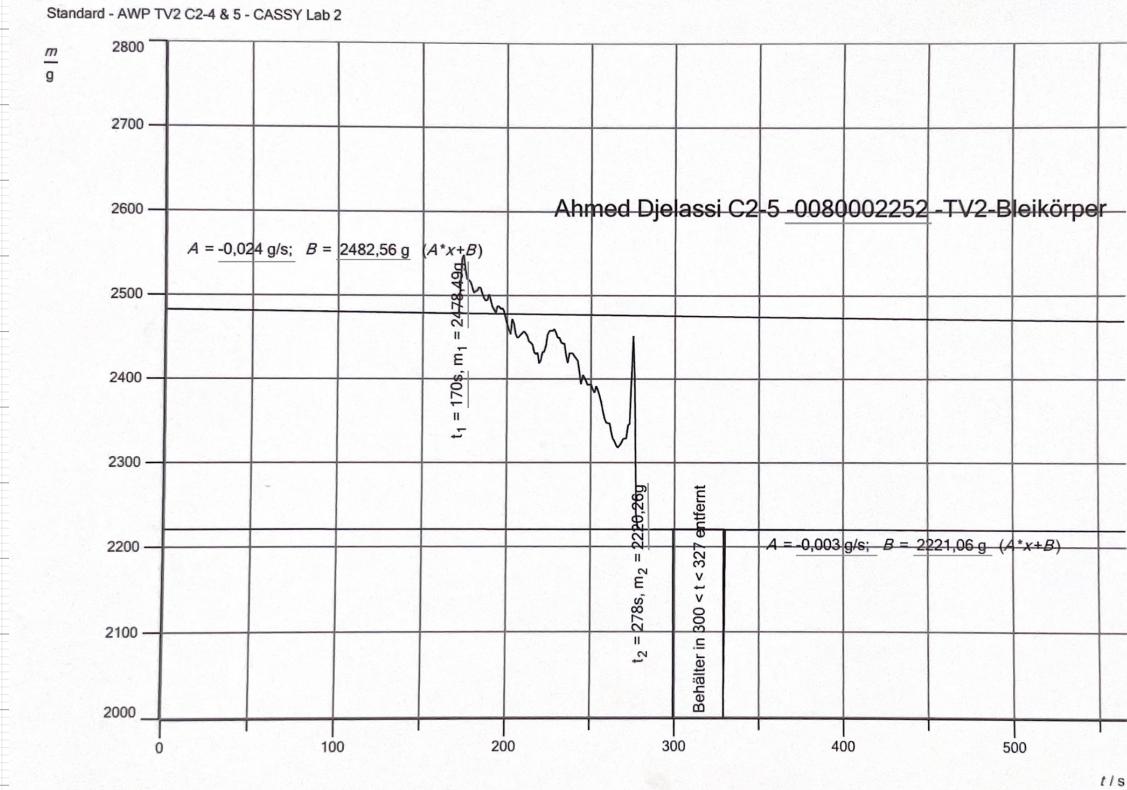
Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: BEREITE DAS KALORIEMETER NEU NACH DEN GERÄTEN VOR, STELLE DIESESMALE  $T_{km2}$  EIN [-x-]
- A2: MACH DICH MIT DER MESOFTWARE BEKANNT "CASSY LAB 2". [-x-]
- A3: STELLE DIE AUFNAHMEWIEDERHOLUNG UND DIE DATENÜBERTRAGUNGSRATE EIN. [-x-]
- A4: FÜLLE DAS DEWARGEFÄSS BIS ZU 80% MIT FLÜSSIGEN STICKSTOFF BEI  $T_{sN}$  [-x-]
- A5: STARTE DIE MESSUNG IN CASSY. [-x-]
- A6: HAT DER FLÜSSEIGE STICKSTOFF AUFGEHÖRT ZU SIEDEN, ATME DURCH UND HÄNGE DEN PROBEKÖRPER IN DAS KALORIEMETER GEFÄSS BEACHTE: SICHERHEITSHINWEIS! [-x-]
- A7: BESTIMME PASSIV ÜBER CASSY DIE VERDAMPFUNGSRATE. [-x-]
- A8: BEENDE DIE DATENAUFNAHME UND WÄHLE ÜBER "ANPASSUNG DURCHFÜHREN/ AUSGLEICHSGERADE" DIE OPTION ZUR ANZEIGUNG DER MITTLEREN STEIGUNG DER VERDAMPFUNGSRATE, NOTIERE DIE WERTE FÜR DEN DIAGRAMM ABSCHNITT VOR- UND NACH DEM ABKÜHLPROZESS. [-x-]
- A9: LESE AUS DEM AUSZUGEBENDEN DIAGRAMM NUN DIE STEIGUNGEN AM PC AB. [-x-]
- A10: WARTE BIS DAS EIS SCHMILZT UND LESE  $T_{km,min}$  VOM KALORIEMETER AB. [-x-]

**Resultierende Referenzgrößen:**

- $T_{km2}$  KALORIEMETERTEMPERATUR EINSTELLUNG. P.A. FEHLERFREI  $50^\circ\text{C}$
- $T_{sN}$  SIEDETEMPERATUR, FLÜSSIGER STICKSTOFF. LITERATURWERT.  $-196^\circ\text{C}$
- $t_{cassy}$  AUFNAHMEWIEDERHOLUNGSDAUER. BEDIENWERT.  $1\text{ s}$
- $r_{cassy}$  ÜBERTRAGUNGSRATE. BEDIENWERT.  $9,600 \text{ kBAUD}$
- $m_{Pb}$  MASSE DES BLEIKÖRPERS:  $[\Delta = 1 \cdot dgt(\text{g})]$   $(1915,66 \pm 0,01) \text{ g}$
- $T_{km2}$  KALORIEMETERTEMPERATUR VOR DER MESSREIHE. P.A. FEHLERFREI  $43,9^\circ\text{C}$

- $T_{km,min}$  KOLORIEMETERTEMPERATUR TIEF. P.A. FEHLERFREI  $28,8^{\circ}\text{C}$
- $T_{Raum2}$  RAUMTEMPERATUR:  $[\theta \cdot 3\% + 1,0^{\circ}\text{C}]$   $(21,30 \pm 1,07)^{\circ}\text{C}$
- $mv_{cassyPb}$  CASSY-AUSGABE STEIGUNG VOR DER ABKÜHLUNG.  $-0,024 \text{ g/s}$
- $mn_{cassyPb}$  CASSY-AUSGABE STEIGUNG NACH DER ABKÜHLUNG.  $-0,003 \text{ g/s}$
- ANHANGSKENNUNG  $0080002252$



### 2.5.3 Dritter Teilversuch: Gefriervorgang von Wasser

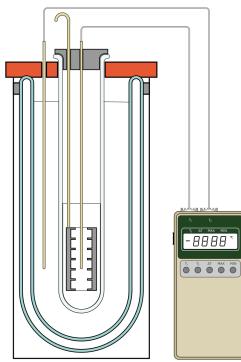
**Ziel:** Untersuchung des Phasenübergangs beim Gefrieren von Wasser.

**Methode:** Abkühlung unter den Schmelzpunkt und Aufnahme eines Temperatur-Zeit-Diagramms.

### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: BAUE DEN VERSUCH NACH ABBILDUNG 10 AUF. VERWENDE EIS-WASSER ALS KÄLTEMISCHUNG. [-x-]



[V-APW-VA10]: Geschilderter Aufbau zur Abkühlung von Wasser.

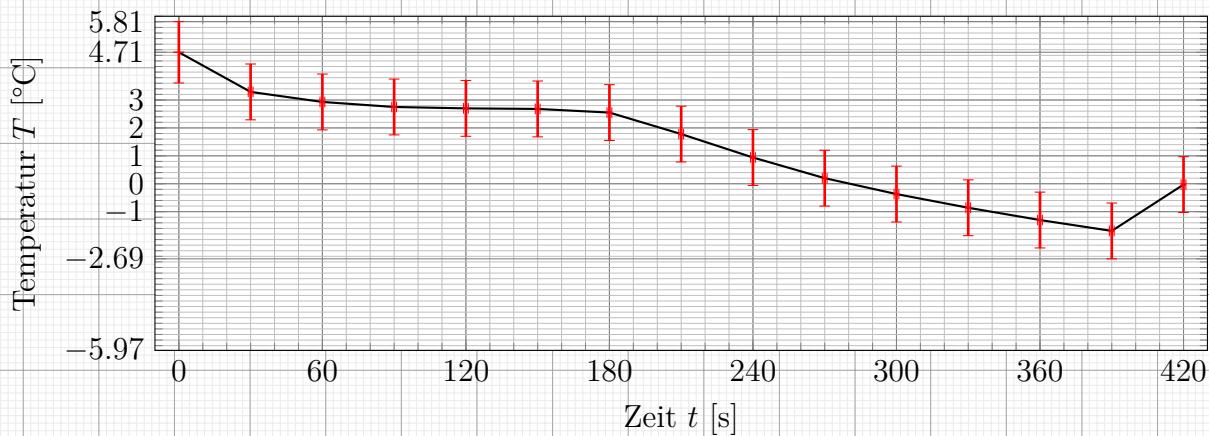
- A2: MACHE DICH MIT DEM NTC VERTRAUT. ACHTE DARAUF DAS KEIN WASSER IN DAS MESSGERÄT KOMMT. VORALLEM KEIN LEITENDES. [-x-]
- A3: NOTIERE EINE VON 0 ABWEICHENDE ANFANGSTEMPERATUREN. [-x-]
- A4: FÜGE GEZIELT NaCl (KOCHSALZ) HINZU UND ERREICHE SO  $T_{gefV}$  [-x-]
- A5: GEBE IN DIE, VORHER ZU REINIGENDE REAGENZRÖHRE  $V_w$  UND SETZE SIE IN DAS KÄLTEBAD. [-x-]
- A6: UNTERKÜHLUNG AUFHEBEN. [-x-]
- A7: BESCHREIBE DEINE BEOBSCHAUUNG UND SKIZZIERE DEN TEMPERATURVERLAUF, NOTIERE DEN NIEDRIGSTEN UNTERKÜHLUNGSWERT.  $T_{unt}$  [-x-]

**Resultierende Referenzgrößen:**

- $V_w$  DESTILLIERTES WASSERVOLUMEN P.A.  $30 \text{ cm}^3$
- $T_{gefV}$  TEMPERATUR AUSSEN WÄHREND DES GEFRIERVORGANGS  $-5,97^\circ\text{C}$
- $T_{unt}$  NIEDRIGSTER UNTERKÜHLUNGSWERT  $-1,69^\circ\text{C}$
- $T_{dlW}$  TEMPERATUR DER DESTL. WASSER PROBE  $[-]^\circ\text{C}$
- $t_{unt}$  VERSUCHSDAUER  $[-] \text{ s}$

| Messreihe apw 3 |  | $i$ | $t_{unt}$ | $\pm\Delta$ | $T_{dw}$ | $\pm\Delta$ |
|-----------------|--|-----|-----------|-------------|----------|-------------|
|                 |  | 1   | 0         | 0           | 4.71     | 1.1         |
|                 |  | 2   | 30        | 1           | 3.29     | 1           |
|                 |  | 3   | 60        | 1           | 2.93     | 1           |
|                 |  | 4   | 90        | 1           | 2.75     | 1           |
|                 |  | 5   | 120       | 1           | 2.70     | 1           |
|                 |  | 6   | 150       | 1           | 2.68     | 1           |
|                 |  | 7   | 180       | 1           | 2.55     | 1           |
|                 |  | 8   | 210       | 1           | 1.78     | 1           |
|                 |  | 9   | 240       | 1           | 0.94     | 1           |
|                 |  | 10  | 270       | 1           | 0.20     | 1           |
|                 |  | 11  | 300       | 1           | -0.37    | 1           |
|                 |  | 12  | 330       | 1           | -0.86    | 1           |
|                 |  | 13  | 360       | 1           | -1.30    | 1           |
|                 |  | 14  | 390       | 1           | -1.69    | 1           |
|                 |  | 15  | 420       | 1           | -0.03    | 1           |
|                 |  | 16  | 441       |             |          |             |

Temperatur über Zeit



Unterkühlung aufgehoben im Zeitraum  $390 \leq t \leq 420$  s

#### 2.5.4 Vierter Teilversuch: Dampfdruckkurve von Wasser

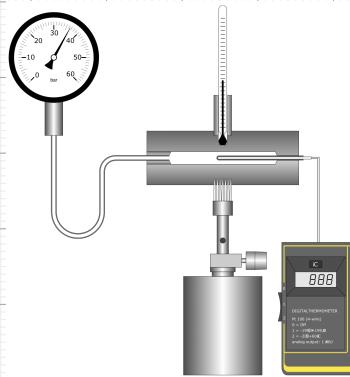
**Ziel:** Überprüfung der Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks von Wasser.

**Methode:** Messung des Dampfdrucks in einem geschlossenen Gefäß und Vergleich mit der theoretischen Exponentialabhängigkeit.

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: MACHE DICH MIT DEM AUFBAU BEKANNT. [-x-]



**[V-APW-VA11]:** Geschilderter Aufbau zum Erwärmen eines evakuierten Wasservolumen.

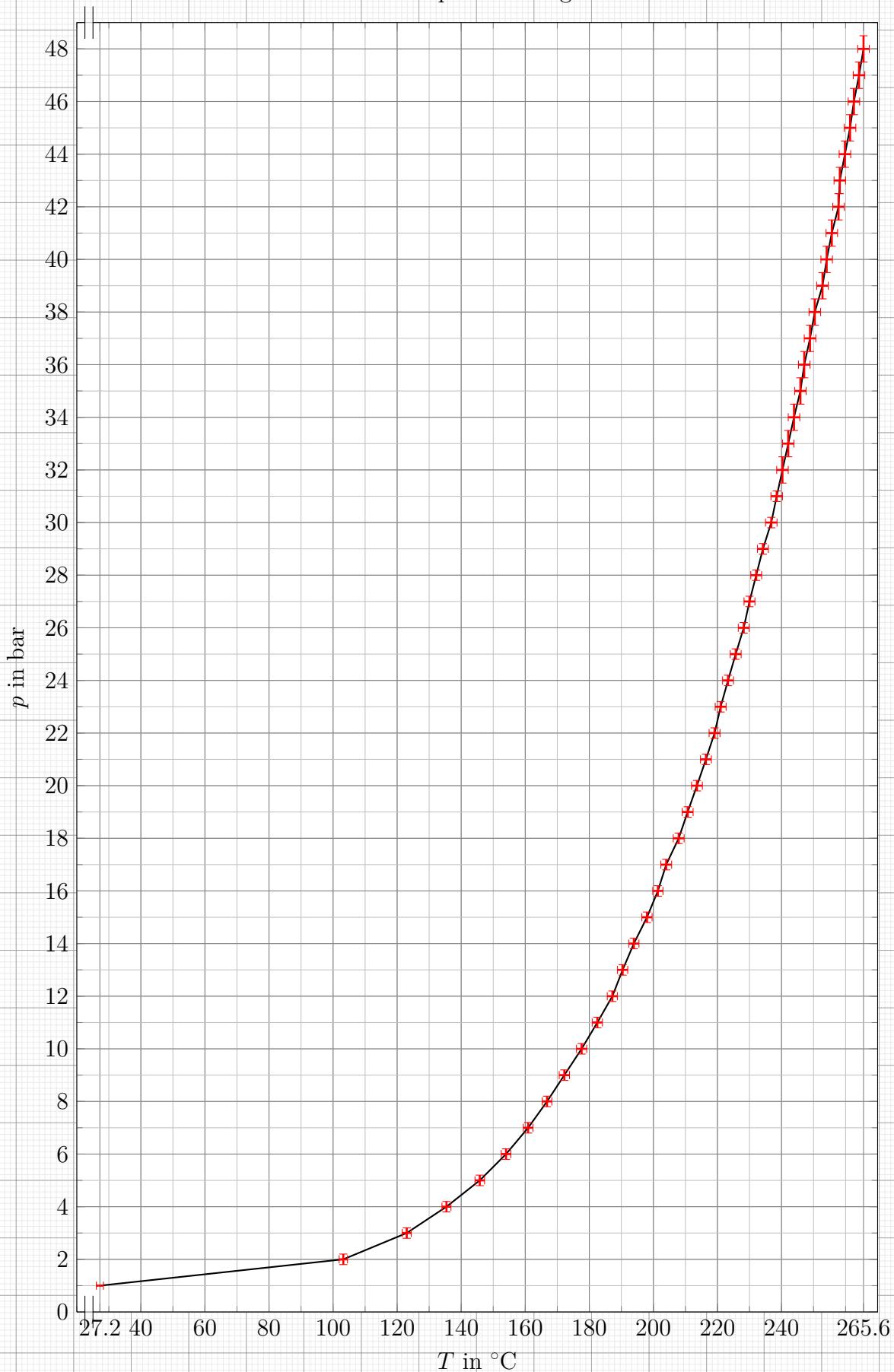
- A2: WASSER IN GESCHLOSSENEM GEFÄSS ERHITZEN [-x-]
- I1: ZEICHEN  $T_G$  UND  $\Delta p_G$  AUF [-x-]

**Resultierende Referenzgrößen:**

- $p_G$  GEFÄSSDRUCK [—] bar
- $\Delta p_0$  DRUCK MESSGERÄT ANFANGSWERT 1 ATM
- $T_G$  GEFÄSSTEMPERATUR [—] °C

| Messreihe apw 4 |  | $T_G$ | $\pm\Delta$ | $p_G$ | $\pm\Delta$ |
|-----------------|--|-------|-------------|-------|-------------|
| $i$             |  |       |             |       |             |
| 0               |  | 27.2  | 1.1         | 1     |             |
| 1               |  | 103.2 | 1.3         | 2     | 0.2         |
| 2               |  | 123.0 | 1.4         | 3     | 0.2         |
| 3               |  | 135.4 | 1.4         | 4     | 0.2         |
| 4               |  | 145.8 | 1.5         | 5     | 0.2         |
| 5               |  | 154.0 | 1.5         | 6     | 0.2         |
| 6               |  | 160.9 | 1.5         | 7     | 0.2         |
| 7               |  | 166.8 | 1.5         | 8     | 0.2         |
| 8               |  | 172.2 | 1.6         | 9     | 0.2         |
| 9               |  | 177.6 | 1.6         | 10    | 0.2         |
| 10              |  | 182.5 | 1.6         | 11    | 0.2         |
| 11              |  | 187.2 | 1.6         | 12    | 0.2         |
| 12              |  | 190.4 | 1.6         | 13    | 0.2         |
| 13              |  | 193.9 | 1.6         | 14    | 0.2         |
| 14              |  | 198.0 | 1.6         | 15    | 0.2         |
| 15              |  | 201.4 | 1.6         | 16    | 0.2         |
| 16              |  | 204.0 | 1.7         | 17    | 0.2         |
| 17              |  | 207.9 | 1.7         | 18    | 0.2         |
| 18              |  | 210.7 | 1.7         | 19    | 0.2         |
| 19              |  | 213.6 | 1.7         | 20    | 0.2         |
| 20              |  | 216.4 | 1.7         | 21    | 0.2         |
| 21              |  | 219.1 | 1.7         | 22    | 0.2         |
| 22              |  | 221.0 | 1.7         | 23    | 0.2         |
| 23              |  | 223.3 | 1.7         | 24    | 0.2         |
| 24              |  | 225.7 | 1.7         | 25    | 0.2         |
| 25              |  | 228.2 | 1.7         | 26    | 0.2         |
| 26              |  | 230.0 | 1.7         | 27    | 0.2         |
| 27              |  | 232.1 | 1.7         | 28    | 0.2         |
| 28              |  | 234.2 | 1.7         | 29    | 0.2         |
| 29              |  | 236.8 | 1.8         | 30    | 0.2         |
| 30              |  | 238.5 | 1.8         | 31    | 0.2         |
| 31              |  | 240.3 | 1.8         | 32    | 0.5         |
| 32              |  | 242.1 | 1.8         | 33    | 0.5         |
| 33              |  | 243.9 | 1.8         | 34    | 0.5         |
| 34              |  | 245.9 | 1.8         | 35    | 0.5         |
| 35              |  | 247.1 | 1.8         | 36    | 0.5         |
| 36              |  | 248.9 | 1.8         | 37    | 0.5         |
| 37              |  | 250.4 | 1.8         | 38    | 0.5         |
| 38              |  | 252.8 | 1.8         | 39    | 0.5         |
| 39              |  | 254.1 | 1.8         | 40    | 0.5         |
| 40              |  | 255.7 | 1.8         | 41    | 0.5         |
| 41              |  | 257.8 | 1.8         | 42    | 0.5         |
| 42              |  | 258.2 | 1.8         | 43    | 0.5         |
| 43              |  | 259.8 | 1.8         | 44    | 0.5         |
| 44              |  | 261.4 | 1.8         | 45    | 0.5         |
| 45              |  | 262.6 | 1.8         | 46    | 0.5         |
| 46              |  | 264.2 | 1.8         | 47    | 0.5         |
| 47              |  | 265.6 | 1.8         | 48    | 0.5         |

### Druck-Temperatur-Diagramm



Druckablesefehler geschätzt und an die zunehmende Änderungsgeschwindigkeit angepasst.

## 2.5.5 Fünfter Teilversuch: Strahlung eines Schwarzen Strahlers

**Ziel:** Bestätigung des Stefan-Boltzmann-Gesetzes.

**Methode:** Messung der Abstrahlungsleistung eines Schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur.

### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

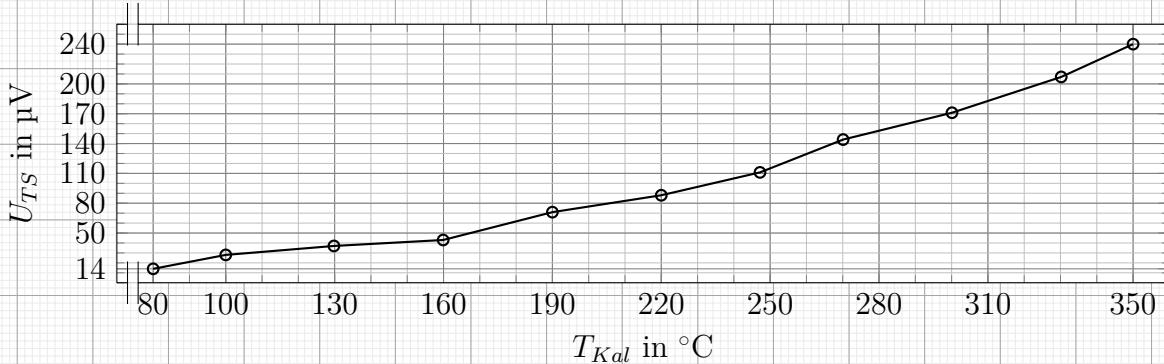
- A1: SCHWARZER STRAHLER CIRCA ZEHN MINUTEN AUF  $T_{kal,1}$  AUFHEIZEN.  
[-x-]
- A2: JUSTIERE DEN VERSUCHSAUFBAU SO DAS DIE THERMOSÄULE AUF DIE SCHWARZE FLÄCHE GERICHTET DES KALIBRATORS IST.  
[-x-]
- I1: ENTFERNE DAS SCHUTZBLECH DER THERMOSÄULE  
[-1-]
- I2: GLEICHE DIE ANZEIGE DES TISCHMULTIMETERS AUF 0,000 AB.  
[-2-]
- I2: STELLE  $T_{kal,i+1}$  ein.  
[-3-]

Resultierende Referenzgrößen:

- $T_{Raum1}$  RAUMTEMPERATUR  $(22,70 \pm 1,07)^\circ\text{C}$
- $T_{kal}$  TEMPERATUR DES KALIBRATORS  $[\text{---}]^\circ\text{C}$
- $U_{TS}$  AUSGANGSSPANNUNG DER THERMOSÄULE P.A. FEHLERFREI  $[\text{---}] \mu\text{V}$

| Messreihe apw 1 |     |           |          |
|-----------------|-----|-----------|----------|
|                 | $i$ | $T_{Kal}$ | $U_{TS}$ |
|                 | 1   | 80.0      | 14       |
|                 | 2   | 100.0     | 28       |
|                 | 3   | 129.8     | 37       |
|                 | 4   | 159.9     | 43       |
|                 | 5   | 190.0     | 71       |
|                 | 6   | 220.0     | 88       |
|                 | 7   | 247.2     | 111      |
|                 | 8   | 270.1     | 144      |
|                 | 9   | 300.1     | 171      |
|                 | 10  | 330.2     | 207      |
|                 | 11  | 350.0     | 240      |

Temperatur-Spannung-Diagramm



## 2.6 Durchführung der Thermodynamischen Prozesse

### MESSGERÄTE UND ERSTMALIGE VERWENDUNG

- **Temperierbad mit verdichtetem Manometer:** Dient zur dynamischen Anpassung und thermischen Kopplung der inneren Kolbenenergie.
- **Hg-Barometer:** Zur Messung des Atmosphärendrucks mittels Quecksilbersäule.

#### 2.6.1 Isotherme Expansion

##### Ziel

*Bestätigung des Gesetzes von Boyle-Mariotte*

##### Methode

*Beobachtung der Expansion entlang der Isobaren.*

*Messung des Drucks mit konstanter Teilchenzahl und der Temperatur als funktion vom Volumen.*

##### Relevante Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

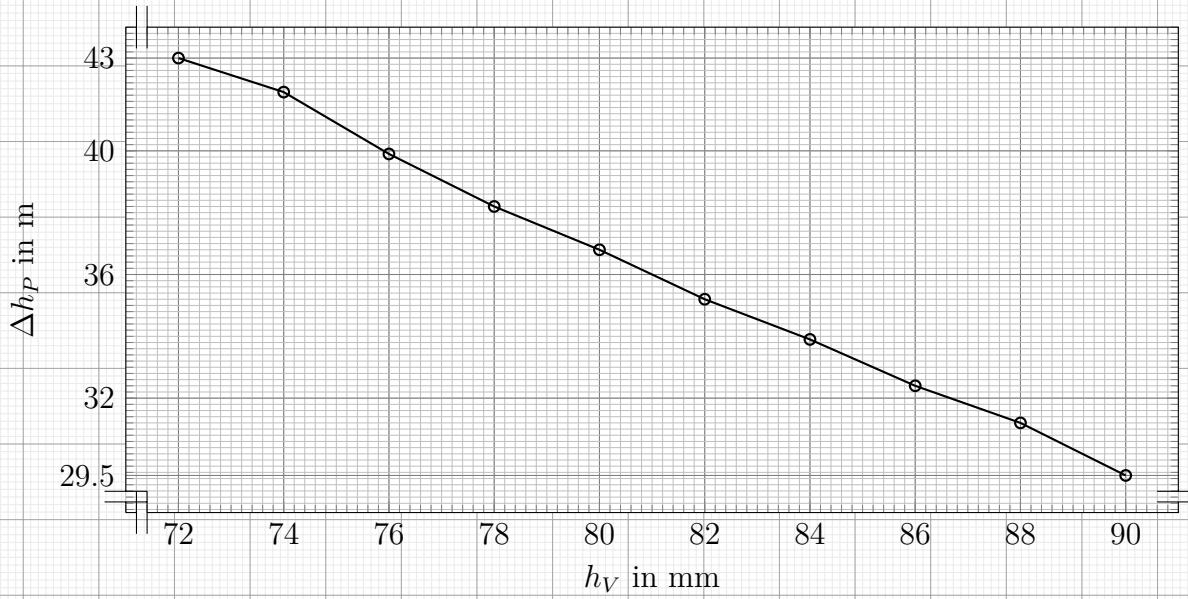
- A1: HEIZE DAS TEMPERIERBAD AUF  $T_{einl}$  UND NOTIERE FALLS ABWEICHEND, INKL. GRUND. [-x-]
- A2: ÖFFNE DIE BELÜFTUNGSKLAPPE DES QUECKSILBERMANOMETERS. [-x-]
- A3: STELLE LUFTDICHTEN THERMISCHENKONTAKT HER, ACHTE AUF ZIRKULATIVE TURBOLENZ. [-x-]
- A4: SETZE DIE AUSGANGSPOSITION DES KOLBENS AUF  $X$ . [-x-]
- A5: BRINGE BEIDE KOLBEN AUF EINEN GLEICHSTAND UND MINIMIEREN SCHÄDLICHES VOLUMEN. [-x-]
- A6: LESE DIE HÖHENPOSITIONEN DER KOLBEN AB UND NOTIERE. [-x-]
- A7: BESTIMME DEN ATMOSPHÄRENDRUCK MIT DEM QUECKSILBERSÄUREBAROMETER [-x-]
- A8: SOBALD  $T = \text{KONSTANT}$ , SPERRE DIE LUFTMENGE IM ZYLINDER AB, WIEDERHOLE BIS HIERHIN WENN DIE TEILCHENZAHL GESTÖRT WIRD. [-x-]
- I1: ITTERIERE  $X$  ÜBER  $\Delta X$  BIS  $\Delta X_{end}$ . [-1-]
- I2: REJUSTIERE DIE QUECKSILBERSÄULE AUF  $x$ . [-2-]
- I3: ENTNEHME DIE DRUCKDIFFERENZ AUS DER SKALA. [-3-]

## Referenzgrößen:

|  |                    |
|--|--------------------|
| • $T_{\text{EIN1}}$ EINSTELLUNGSTEMPERATUR DES TEMPERIERBADS | 90 °C              |
| • $X$ KOLBEN ANFANGSPOSITION, LINKS                          | 7,2 cm             |
| • $\Delta X$ KOLBEN SCHRITTE.                                | 2 mm               |
| • $\Delta X_{\text{end}}$ KOLBEN ENDPOSITION, LINKS.         | 90 mm              |
| • $x_R$ KOLBEN NACH GLEICHSTELLUNG, RECHTS                   | 43 cmHG            |
| • $p_{\text{ATM}}$ ATMOSPHÄRENDRUCK, QUECKSILBERBAROMETER    | (725,4 ± 0,1) mmHG |
| • $h_{V,i}$ AUFZUZEICHNENDE VOLUMENZYLINDER HÖHE             | [—] mmHG           |
| • $\Delta h_{P,i}$ AUFZUZEICHNENDE DRUCKZYLINDER HÖHE        | [—] mmHG           |

| Messreihe tep 1 |       |              |
|-----------------|-------|--------------|
| $i$             | $h_V$ | $\Delta h_P$ |
| 0               | 72    | 43           |
| 1               | 74    | 41.9         |
| 2               | 76    | 39.9         |
| 3               | 78    | 38.2         |
| 4               | 80    | 36.8         |
| 5               | 82    | 35.2         |
| 6               | 84    | 33.9         |
| 7               | 86    | 32.4         |
| 8               | 88    | 31.2         |
| 9               | 90    | 29.5         |

Höhe (Volumen) – Höhe (Druck) -Diagramm



### 2.6.2 Isochore Zustandänderung

#### Ziel

Bestätigung des Gesetzes von Amontons.

## Methode

Messung des Drucks als funktion der Temperatur mit konstanten Volumen und Teilchenzahl.

## Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: ÜBERNEHME DEN AUFBAU AUS TV1, NOTIERE ANFANGSBEDINGUNGEN, SIEHE REFERENZGRÖSSE TV1 UND 2. [-x-]
- I1: SENKE DIE TEMPERATUR IN  $\Delta T_V$  SCHRITTEN, ERREICHE  $T_{end}$ . [-1-]

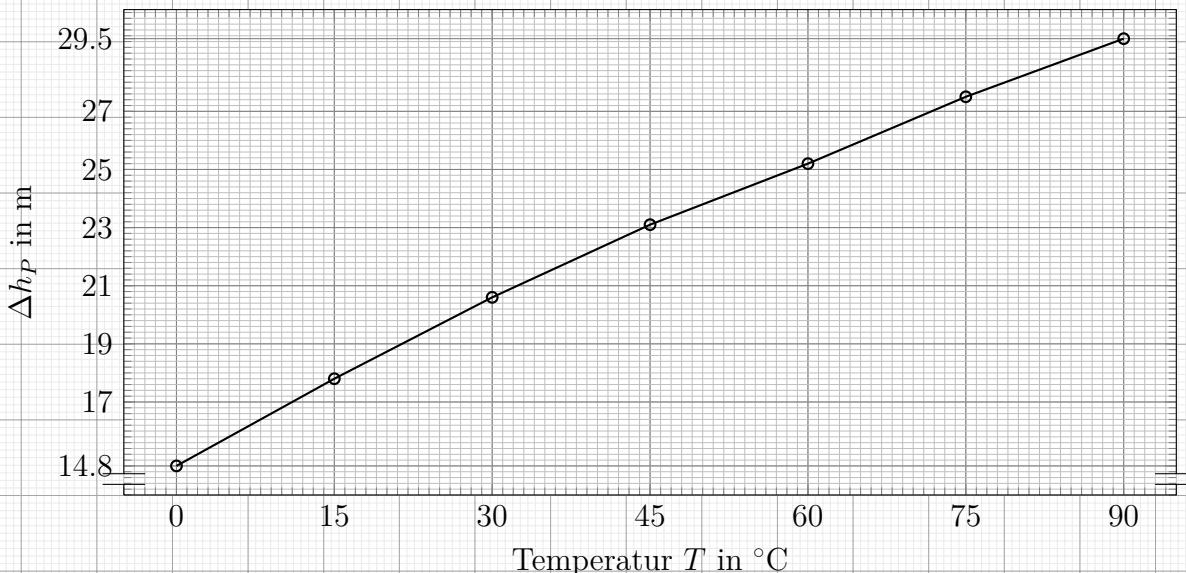
## Referenzwerte

- |  |          |
|--|----------|
| • $\Delta T_V$ ÄQUIDISTANTE TEMPERATUR SCHRITTE. | 15 °C    |
| • $T_{end}$ ZIELTEMPERATUR.                      | 0 °C     |
| • X FESTE KOLBEN POSITION.                       | 9,0 cm   |
| • $\Delta T_{ein,i}$ TATSÄCHLICHE TEMPERATUR.    | [—] °C   |
| • $\Delta h_p$ DRUCKDIFFERENZ ÜBER HÖHENSKALA.   | [—] mmHg |

## Versuchsübernahme Bedingungen

| Messreihe tep 2 |           |              |
|-----------------|-----------|--------------|
| $i$             | $T_{ein}$ | $\Delta h_p$ |
| 0               | 90        | 29.5         |
| 1               | 75        | 27.5         |
| 2               | 60        | 25.2         |
| 3               | 45        | 23.1         |
| 4               | 30        | 20.6         |
| 5               | 15        | 17.8         |
| 6               | 0         | 14.8         |

Temperatur- Höhe(Druck) -Diagramm



## 2.6.3 Isotherme Kompression

### Ziel

Bestätigung des Gesetzes von Boyle-Mariotte, und summierung des Kreisprozesses.

### Methode

Beobachtung der Kompression entlang der Isobaren.

Messung des Drucks mit konstanter Teilchenzahl und der Temperatur als funktion vom Volumen.

### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: FÜHRE EIN ISOHERME KOMPRESSION X BIS ZUR EIGENGLICHSTELLUNG DER HG-SÄULEN. [-x-]

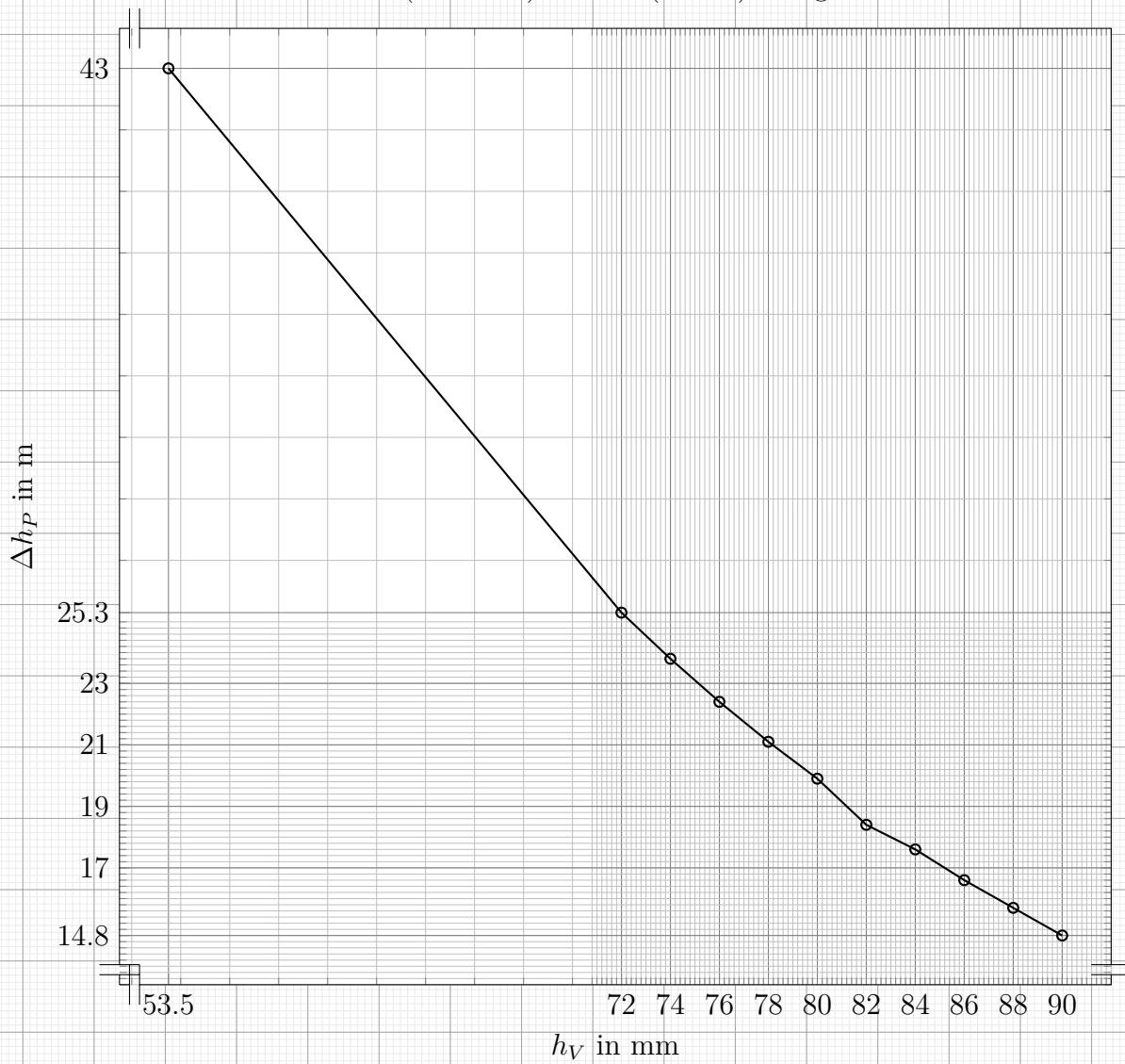
### Referenzwerte

- $T_{ein2}$  KONSTANTE VERSUCHSTEMPERATUR.  $0^{\circ}\text{C}$
- $X$  ANFANGS KOLBEN POSITION, AUS DEN LETZTEN TEILVERUSCHEN.  $9,0 \text{ cm}$
- $\Delta X$  KOLBEN SCHRITTE.  $2 \text{ mm}$

Hg-säulen gleichstand bei  $i = 10$

| i  | Messreihe | tep   | 3            |
|----|-----------|-------|--------------|
|    |           | $h_V$ | $\Delta h_P$ |
| 0  |           | 90    | 14.8         |
| 1  |           | 88    | 15.7         |
| 2  |           | 86    | 16.6         |
| 3  |           | 84    | 17.6         |
| 4  |           | 82    | 18.4         |
| 5  |           | 80    | 19.9         |
| 6  |           | 78    | 21.1         |
| 7  |           | 76    | 22.4         |
| 8  |           | 74    | 23.8         |
| 9  |           | 72    | 25.3         |
| 10 |           | 53.5  | 43           |

## Höhe (Volumen) – Höhe (Druck) -Diagramm



### 2.6.4 Isobare Zustandänderung

#### Ziel

Bestätigung des Gesetzes von Amontons. Extrapolation des Absoluten Nullpunkts.

#### Methode

Messung des Drucks als funktion der Temperatur mit konstanten Volumen und Teilchenzahl.

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

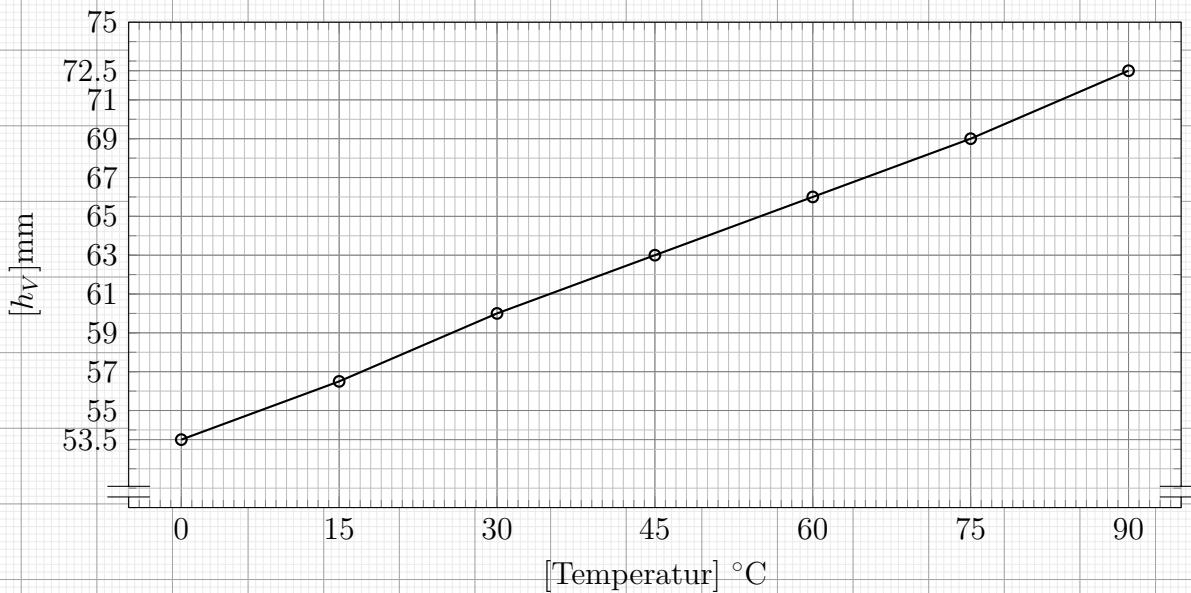
- A1: ERHÖHE DIE BAD TEMPERATUR IN  $\Delta T_V$  SCHRITTE BIS  $T_{EIN1}$  [-x-]

## Referenzwerte

- $\Delta T_V$  ÄQUIDISTANTE TEMPERATUR SCHRITTE.  $15^\circ\text{C}$
- $T_{\text{EIN}1}$  EINSTELLUNGSTEMPERATUR DES TEMPERIERBADS  $90^\circ\text{C}$
- $X_{\text{end}}$  ERWARTETE KOLBEN ENDPOSITION  $7,2 \text{ cm}$

| Messreihe tep 4 |     |              |
|-----------------|-----|--------------|
| $i$             | $T$ | $\Delta h_P$ |
| 0               | 0   | 53.5         |
| 1               | 15  | 56.5         |
| 2               | 30  | 60           |
| 3               | 45  | 63           |
| 4               | 60  | 66           |
| 5               | 75  | 69           |
| 6               | 90  | 72.5         |

$h_V$ - $\Delta h_P$ -Diagramm



### 2.6.5 Adiabatische Zustandänderung

#### Ziel

Bestimmung des Adiabatenexponenten von Luft.

#### Methode

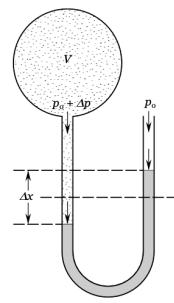
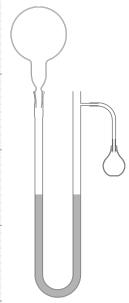
Messung der Schwingungsdauer innerhalb einer wasser säule in einem U-Rohr mit eingeschlossener Luftmembranen.

#### Experiment

Arbeitsschritte [-x-] und Iterative Prozesse

- A1: MACH DICH MIT DEM AUFBAU NACH 16 UND 17 BEKANNT.  
[V-TEP-VA16]:

[-x-]



- A2: VERSETZE DIE WASSERSÄULE OHNE AUFGESETZTEN KOLBEN IN SCHWINGUNG.

[-x-]

- I1: MESSE DIE SCHWINGUNGSDAUER AB DER ZWEITEN AMBLITUDE.

[-x-]

- I2: WIEDERHOLE FÜNF MAL.

[-x-]

- A4: VERSETZE DIE WASSERSÄULE MIT AUFGESETZTEN KOLBEN IN SCHWINGUNG.

[-x-]

- I3: MESSE DIE SCHWINGUNGSDAUER AB DER ZWEITEN AMBLITUDE.

[-x-]

- I4: WIEDERHOLE FÜNF MAL.

[-x-]

- A5: WIEGE DEN KOLBEN MIT UND OHNE WASSER.

[-x-]

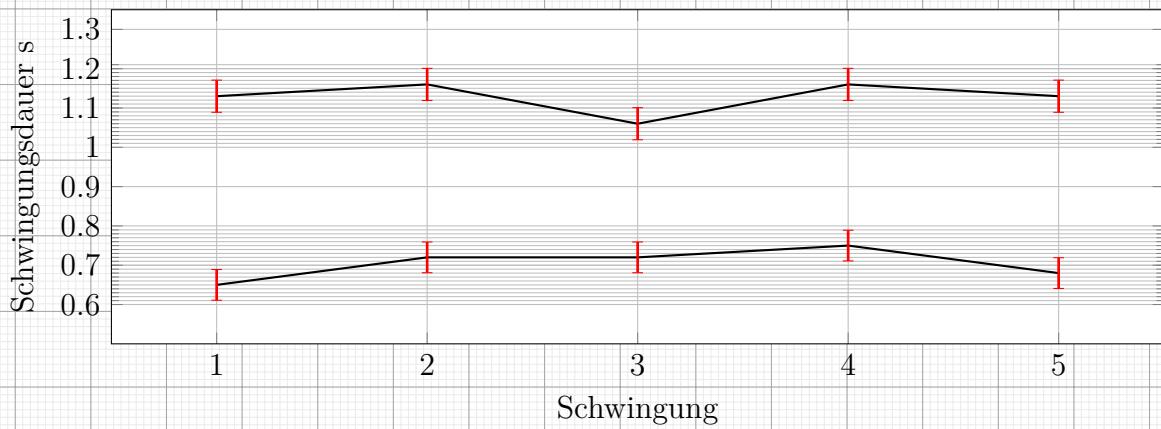
- A6: SUMMIERE DIE ÜBERIGEN TEILE DES GESAMTVOLUMENS.

[-x-]

## Referenzwerte

- $T_{ok,i}$  WASSERSÄULENSCHWINGUNGSDAUER OHNE DÄMPFUNGSKOLBEN. s
- $T_{mk,i}$  WASSERSÄULENSCHWINGUNGSDAUER MIT DÄMPFUNGSKOLBEN. s
- $m_K$  DÄMPFUNGSKOLBEN LEERGEWICHT.  $(259,16 \pm 0,03)$  g
- $m_K$  DÄMPFUNGSKOLBEN VOLLGEWICHT (WASSER).  $(1367,00 \pm 0,13)$  g
- $d_{UR}$  U-ROHR DURCHMESSER  $(18 \pm 1)$  mm
- $d_t$  U-ROHR LUFTSÄULENTIEFE  $(197 \pm 1)$  mm

| Messreihe tep 5 |  | $T_{ok}$ | $\pm\sigma_{ok}$ | $T_{mk}$ | $\pm\sigma_{mk}$ |
|-----------------|--|----------|------------------|----------|------------------|
| i               |  |          |                  |          |                  |
| 1               |  | 1.13     | 0.0409           | 0.65     | 0.0391           |
| 2               |  | 1.16     | 0.0409           | 0.72     | 0.0391           |
| 3               |  | 1.06     | 0.0409           | 0.72     | 0.0391           |
| 4               |  | 1.16     | 0.0409           | 0.75     | 0.0391           |
| 5               |  | 1.13     | 0.0409           | 0.68     | 0.0391           |



### 3 Auswertung

#### 3.1 Auswertung zum 25.08.2025

#### Elektrische Stromkreise

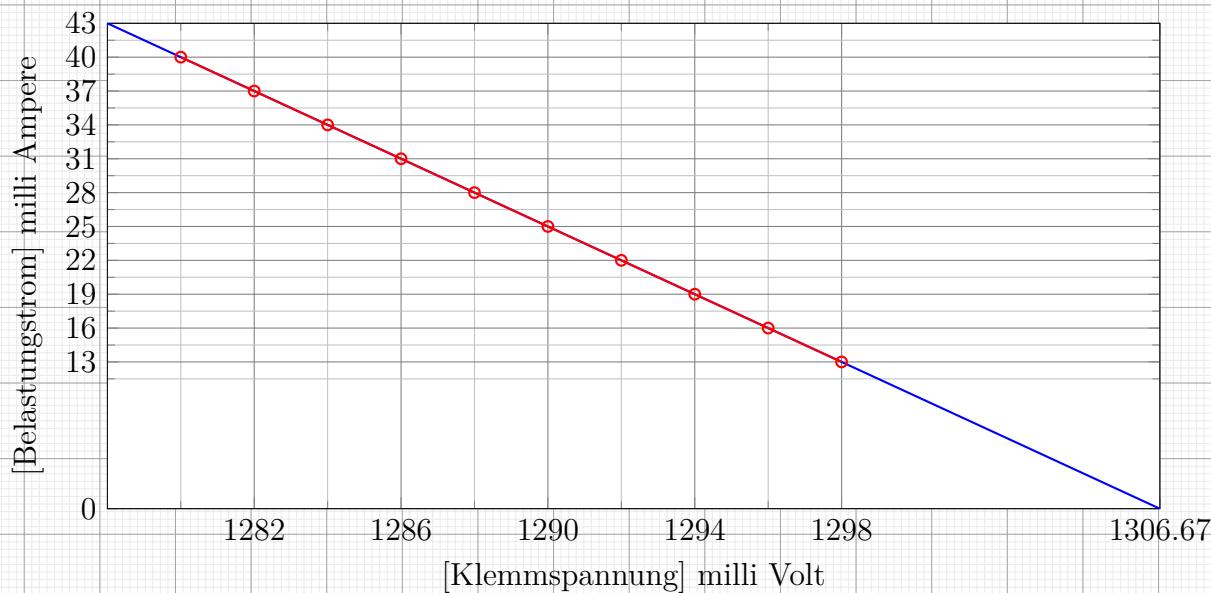
| Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München<br>Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2<br>Blockpraktikum vom 11. Aug. bis 9. Sept. 2025 |                         |                  |   |
|---|-------------------------|------------------|---|
| Versuch:  | Elektrische Stromkreise | Gruppe:          | C2-5                                    |
| Vorname 1:  | Ahmed                   | Name 1:          | Djelassi                                |
| Vorname 2:  | -----                   | Name 2:          | -----                                   |
| Mit Abgabe der Auswertung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!   |                         |                  |   |
| Die Abgabe ist vor dem Einreichen auf eine saubere äußere Form und Struktur zu kontrollieren.<br>Bei ungenügender äußerer Form erfolgt zunächst keine Korrektur!  |                         |                  | OK? <input checked="" type="checkbox"/> |
|   |                         | 1. Abgabe        | 2. Abgabe                               |
| Alle Teilversuche vollständig ausgewertet?  |                         | Ja               | Nein                                    |
| Wurden immer korrekte Formeln angegeben und eigene Werte eingesetzt?  |                         | Ja               | Nein                                    |
| Wurde immer eine Fehlerrechnung durchgeführt?   |                         | Ja               | Nein                                    |
| Sind Endergebnisse immer angegeben und korrekt gerundet?  |                         | Ja               | Nein                                    |
| Wurde immer eine aussagekräftige Diskussion geführt?  |                         | Ja               | Nein                                    |
| Wurden alle Diagramme mit geeignetem Maßstab und Titel eingeklebt?  |                         | Ja               | Nein                                    |
| Enthalten die Diagramme alle Messwerte, Beschriftungen u. Konstruktionen?   |                         | Ja               | Nein                                    |
| Sind ausgefülltes Deckblatt, Vorbereitung und Messprotokoll in der Abgabe enthalten   |                         | Ja               | Nein                                    |
| Auswertung erhalten am:   |                         | 01.09.2025 10:00 |   |
| Auswertung zurückgegeben am:  |                         |                  |   |
| Nacharbeit notwendig bis:   |                         | nicht möglich    |   |
| Abzug 0,2 Punkte pro Nacharbeit/angefangene 3 Tage Verspätung:  |                         | -0,2             | -0,2                                    |
| Wird eine der obigen Fragen bei der ersten Abgabe mit Nein beantwortet ist eine Nacharbeit erforderlich!  |                         |                  |   |
| Punkte:   |                         | Datum, Abtestat: |   |

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

### 3.1.1 Belastungabhängigkeit zweier Spannungsquellen

| Messreihe esk 1 |            |
|-----------------|------------|
| $I_{Bel}$       | $U_{Mult}$ |
| 13              | 1298       |
| 16              | 1296       |
| 19              | 1294       |
| 22              | 1292       |
| 25              | 1290       |
| 28              | 1288       |
| 31              | 1286       |
| 34              | 1284       |
| 37              | 1282       |
| 40              | 1280       |

$U_{Mult}$ - $I_{Bel}$ -Diagramm



Zum Innenwiderstand der galvanischen Zelle:

$$R_{\text{Kalk}} \stackrel{\text{Betrug}}{=} \left| \frac{x_i - x_I}{y_i - y_I} \right| = \left| \frac{1282 \text{ V} - 1298 \text{ V}}{37 \text{ A} - 13 \text{ A}} \right| = \left| \frac{-16}{24} \right| = \frac{2 \text{ k}\Omega}{3} \quad (1)$$

Diskutieren Sie den Unterschied zwischen Anfangs- und Endwert:

Der Anfangswert bei  $I_{Bel} \approx 40 \text{ mA}$  impliziert einen hohen **Stromfluss** durch die galvanische Zelle. Dadurch entsteht ein größerer **Spannungsabfall** am **Innenwiderstand**, sodass die gemessene **Klemmenspannung**  $U_{Mult}$  deutlich niedriger ist. Bei  $I_{Bel} = 0$  fließt kein **Strom**, der **Innenwiderstand** verursacht keinen Spannungsabfall, und die **Spannung** erreicht ihren maximalen Wert. Dies zeigt die durch das **Ohmsche Gesetz** erkannte Proportionalität.

Bei einem **Stromfluss** von  $0 \text{ A}$  kann daher auch von der **Leerlaufspannung** gesprochen werden. Es ist jedoch anzumerken, dass der errechnete **Widerstand** ein **serielles Phänomen** darstellt und nicht ausschließlich den **Innenwiderstand** der Zelle umfasst, weshalb die **Spannung** auch im direkten Vergleich abweicht.

Aus dem am Ende gemessenen Wert ergibt sich, dass die **Leerlaufspannung** durch die **Belastung** kleiner geworden ist. Nach genügend langer Wartezeit würde sich wieder der ursprüngliche Wert einstellen. Durch den **Stromfluss** wird das **chemische Gleichgewicht** an den **Elektroden** gestört und stellt sich nur langsam wieder ein. [V-ESK s.28]

|  |         |
|--|---------|
| $U_{\text{unkontaktiert}}$ [LADESTAND] VOR DEM EXPERIMENT            | 1,378 V |
| $U_{\text{naExp}}$ [LADESTAND, LEERLAUFSPANNUNG] NACH DEM EXPERIMENT | 1,315 V |
| $U_{\text{exa}}$ [EXTRAPOLIERTER LADESTAND]                          | 1,306 V |

### Revision der Messgeräte und -methoden:

Die Messungen wurden mit zwei **Multimetern** bei unterschiedlichen Einstellungen durchgeführt. Die Wahl des **Messbereiches** beeinflusst direkt die **Auflösung** und **Genauigkeit** der Messung. Für kleine **Ströme** und **Spannungen** wurde ein niedriger Bereich gewählt, um eine ausreichende **Messauflösung** zu erhalten. Messabweichungen können durch **Kabelwiderstände**, **Kontaktwiderstände** und die **Genauigkeit** der **Geräte** selbst entstehen. Eine regelmäßige **Kalibrierung** und Überprüfung der **Nullpunkte** ist daher notwendig, um verlässliche und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

### Vergleich Galvanische Zelle und Labor-Netzgerät:

Die **galvanische Zelle** zeigt bei **Belastung** einen **Spannungsabfall** aufgrund ihres **Innenwiderstandes**. Im Gegensatz dazu liefert das **Labor-Netzgerät** eine nahezu **konstante Spannung**, da es über eine **aktive Regelung** verfügt und der **Innenwiderstand** vernachlässigbar klein ist. Der Vergleich verdeutlicht den Unterschied zwischen **realen Quellen** mit begrenztem **Stromliefervermögen** und idealisierten, geregelten **Netzgeräten**. Messungen mit der **galvanischen Zelle** sind daher stark **stromabhängig**, während das **Netzgerät** stabile **Spannungen** unabhängig vom **Strom** liefert.

Für kleine **Potentiometerstellungen** (also kleine äußere **Widerstände**) gilt dies ebenfalls: Die **Stromaufnahme** steigt, wodurch der **Spannungsabfall** an der **Zelle** größer wird und die gemessene **Spannung** entsprechend sinkt. Der Effekt ist besonders deutlich, wenn der **Innenwiderstand** der **Zelle** im Vergleich zum äußeren **Widerstand** nicht vernachlässigbar ist. Für netzgerät gilt  $R_{\text{last}} \gg R_{\text{innen}} \Rightarrow$  praktisch keine Spannungveränderung. Wie oben angedeutet.

Messreihe esk 2

| <i>i</i> | <i>U<sub>Mult</sub></i> | <i>I<sub>Mult</sub></i> | <i>I<sub>Zang</sub></i> |
|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1        | 10,01                   | 096,6                   | 0,092                   |
| 2        | 10,01                   | 126,5                   | 0,120                   |
| 3        | 10,01                   | 156,4                   | 0,150                   |
| 4        | 10,01                   | 186,6                   | 0,180                   |
| 5        | 10,01                   | 216,1                   | 0,208                   |
| 6        | 10,00                   | 00,24                   | 0,234                   |
| 7        | 10,00                   | 00,27                   | 0,273                   |
| 8        | 10,00                   | 00,31                   | 0,301                   |
| 9        | 09,99                   | 00,35                   | 0,345                   |
| 10       | 09,99                   | 00,39                   | 0,379                   |
| 11       | 09,95                   | 00,43                   | 0,418                   |
| 12       | 05,02                   | 00,43                   | 0,424                   |
| 13       | 00,06                   | 00,43                   | 0,425                   |
| 14       | 09,98                   | 00,42                   | 0,413                   |

**Vergleich Stromzange und Multimeter zur Strommessung:**

Obwohl das Multimeter in den ersten fünf Iterationen durch die gezielte Bereichseinstellung genauere Messwerte liefern konnte, zeigt die Stromzange eine konstante Anzeige und Genauigkeit. Für den letzten Messwert werden im Folgenden die Fehler verglichen; Der direkte Vergleich liefert eine Genauigkeit von 26,7 % und 18,3 % (in dieser Reihenfolge). Daraus folgt das Multimeter ist genauer.

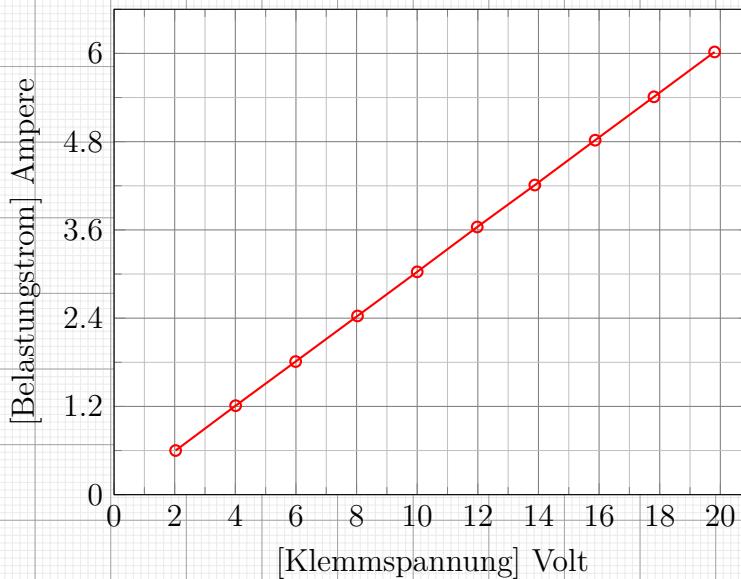
$$\Delta I_{Zang} = (2,5\% \cdot 0,413 \text{ A}) + (100 \cdot 0,001 \text{ A}) = 0,1103 \text{ A} + 0,100 \text{ A} = 0,12 \text{ A}$$

$$\Delta I_{Mult} = (1,6\% \cdot 0,42 \text{ A}) + (7 \cdot 0,01 \text{ A}) = 0,0067 \text{ A} + 0,07 \text{ A} = 0,08 \text{ A}$$

### 3.1.2 Zum Ohmischen Gesetz

| Messreihe esk 3 |     |            |            |
|-----------------|-----|------------|------------|
|                 | $i$ | $I_{Mult}$ | $U_{Mult}$ |
| 1               |     | 00.60      | 02.03      |
| 2               |     | 01.21      | 04.01      |
| 3               |     | 01.81      | 05.99      |
| 4               |     | 02.43      | 08.03      |
| 5               |     | 03.03      | 10.00      |
| 6               |     | 03.64      | 11.98      |
| 7               |     | 04.21      | 13.88      |
| 8               |     | 04.82      | 15.87      |
| 9               |     | 05.41      | 17.81      |
| 10              |     | 06.02      | 19.81      |

$U_{Mult}$ - $I_{Bel}$ -Diagramm



Widerstandsrevision:

$R_{\text{ablese}} \text{ AUS TABELLE ABGELESENER WIDERSTAND} \quad (3,30 \pm 0,04) \text{ k}\Omega$

$R_{\text{Mult}} \text{ MULTIMETER-MESSUNG} \quad (3,28 \pm 0,12) \text{ k}\Omega$

$R_{\text{Kalk}} \text{ BERECHNETER WIDERSTAND} \quad 3,280 \text{ k}\Omega$

$$\Delta R_{\text{Mult}} = R_{\text{Mult}} \cdot 0,01 + s \cdot dgt = 3,28 \cdot 0,01 \text{ k}\Omega + 8 \cdot 0,01 \text{ k}\Omega = 0.113 \text{ k}\Omega \quad (2)$$

$$R_{\text{Kalk}} = \frac{x_i - x_I}{y_i - y_I} = \frac{2,03 \text{ V} - 19,81 \text{ V}}{0,60 \text{ A} - 6,02 \text{ A}} = \frac{17,78}{5,42} = 3,28 \text{ k}\Omega \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \Delta R_{\text{Kalk}} &= \frac{\Delta x_i - \Delta x_I}{\Delta y_i - \Delta y_I} \\
 &= \frac{\underbrace{0,058\,27\,\text{V}}_{2,03 \cdot 0,9\% + 4 \cdot 0,01} - \underbrace{0,218\,29\,\text{V}}_{19,81 \cdot 0,9\% + 4 \cdot 0,01}}{\underbrace{0,0796\,\text{A}}_{0,60 \cdot 1,6\% + 7 \cdot 0,01} - \underbrace{0,166\,32\,\text{A}}_{6,02 \cdot 1,6\% + 7 \cdot 0,01}} \\
 &= \frac{-0,160\,02\,\text{V}}{-0,086\,72\,\text{A}} \approx 1,85\,\Omega
 \end{aligned} \tag{4}$$

Daraus folgt der Extrapolierte Widerstand mit fehler  $(3300 \pm 1,9)\Omega$

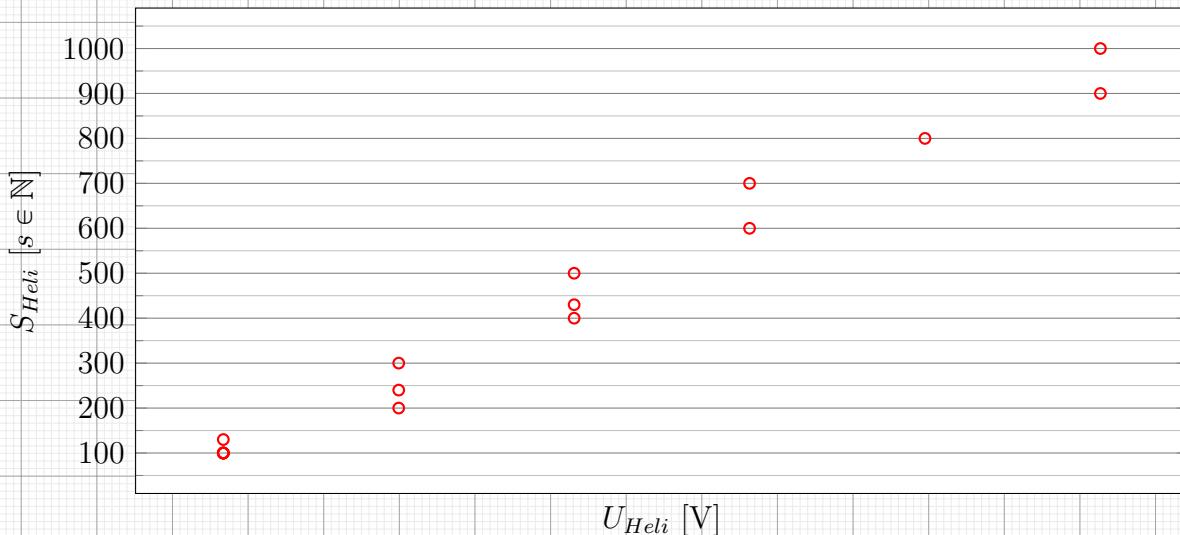
## Zum Widerstand

Es fällt auf, dass der mit dem **Multimeter** bestimmte **Wert** eine etwa viermal höhere **Fehlerangabe** besitzt als der abgelesene **Tabellenwert** und somit deutlich ungenauer ist. Die Ursache liegt sowohl in der **Gerätespezifikation** (Messbereichsgenauigkeit, Zählerschritte) als auch in **Fertigungstoleranzen** der **Bauteile**. Die **rechnerische Bestimmung** des **Widerstandes** über die **Steigung** der **Messgeraden** liefert hingegen den **präzisesten Wert**, da hierbei viele **Einzelmessungen** iterativ in die Berechnung eingehen und zufällige **Messfehler** geglättet werden.

### 3.1.3 Spannungsabfall und Potentiometer

| Messreihe esk 4 |                |          |
|-----------------|----------------|----------|
| $i$             | $U_{\Delta L}$ | $L$      |
| 1               | 0.05           | 100.0001 |
| 2               | 0.05           | 100.0002 |
| 3               | 0.05           | 100.0003 |
| 4               | 0.05           | 100.0004 |
| 5               | 0.05           | 100.0005 |
| 6               | 0.06           | 300      |
| 7               | 0.06           | 240      |
| 8               | 0.05           | 130      |
| 9               | 0.07           | 400      |
| 10              | 0.07           | 430      |
| 11              | 0.08           | 700      |
| 12              | 0.09           | 800      |
| 13              | 0.10           | 900      |
| 14              | 0.06           | 200      |
| 15              | 0.07           | 500      |
| 16              | 0.08           | 600      |
| 17              | 0.10           | 1000     |

Spannung-Skala-Diagramm



Diskutieren Sie Ihr Ergebnis zu Spannungsabfall am stromdurchflossenen Draht:

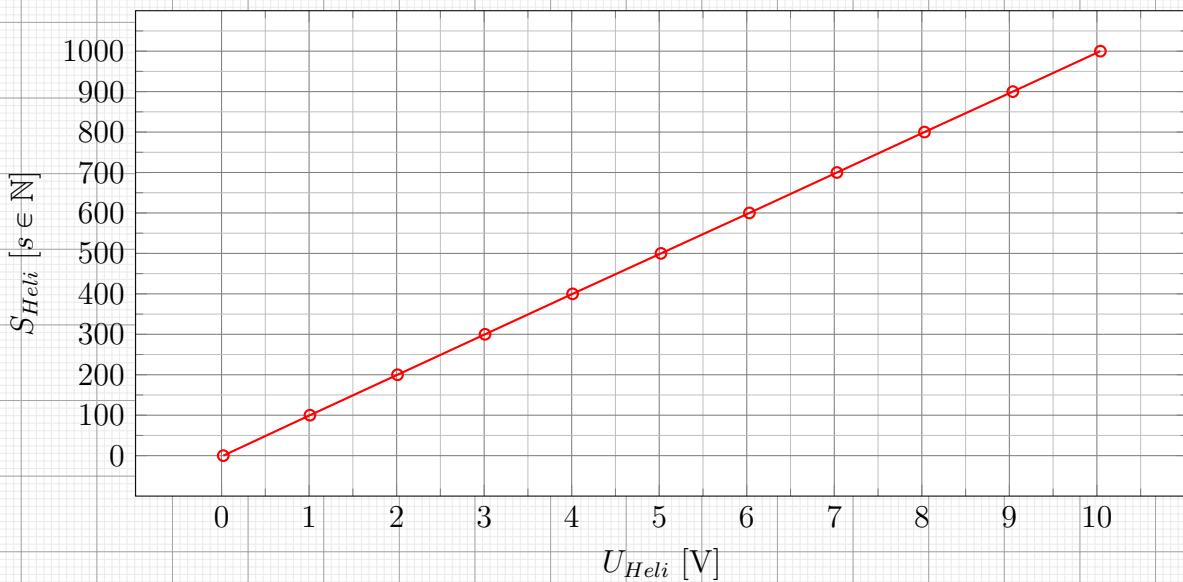
Der gemessene **Spannungsabfall**  $U_{\Delta L}$  entlang des Drahtes zeigt, dass die **Spannung** mit zunehmendem **Stromfluss** steigt. Die Messpunkte (indexiert durch  $i$ ) verteilen sich annähernd linear, was darauf hinweist, dass der Draht homogen ist und der **Widerstand** proportional zur Drahtlänge konstant bleibt. Kleinere Abweichungen werden auf **Kontaktwiderstände** oder minimale Unterschiede im Drahtdurchmesser zurückgeführt.

## Wie verhält sich der Spannungsabfall an unterschiedlichen Drahtlängen?

Die Daten zeigen eindeutig, dass der **Spannungsabfall** mit zunehmender **Drahtlänge  $L$**  steigt. Dabei gilt ( $R = \rho \cdot L/A$ ). Daraus folgt, dass bei gleichem **Strom** der **Spannungsabfall  $U$**  =  $R \cdot I$  linear mit der Drahtlänge zunimmt. Die Messung bestätigt somit das erwartete Verhalten und die Homogenität des Drahtmaterials.

| Messreihe esk 5 |            |            |
|-----------------|------------|------------|
| $i$             | $U_{Heli}$ | $S_{Heli}$ |
| 0               | 00.02      | 0          |
| 1               | 01.01      | 100        |
| 2               | 02.01      | 200        |
| 3               | 03.01      | 300        |
| 4               | 04.01      | 400        |
| 5               | 05.02      | 500        |
| 6               | 06.03      | 600        |
| 7               | 07.03      | 700        |
| 8               | 08.03      | 800        |
| 9               | 09.04      | 900        |
| 10              | 10.04      | 1000       |

Spannung-Skala-Diagramm



Diskutieren Sie das Verhalten des Graphens im Vergleich zu Teilversuch 3a:

Im Vergleich zu Teilversuch 3a (Belastung der galvanischen Zelle) zeigt sich ein ähnliches Grundprinzip: Ein **Stromfluss** erzeugt einen messbaren **Spannungsabfall**. Allerdings ist der Effekt beim Draht linear und vorhersehbar, da es sich um ein ohmsches Element handelt, während beim galvanischen Teilversuch 3a auch **chemische Effekte** und **Innenwiderstände der Quelle** die **Spannung** beeinflussen. Die Messreihe am Draht bestätigt somit das Ohmsche Gesetz in Reinform, während die galvanische Zelle zusätzliche **nichtlineare Redox-Effekte** aufweist.

### 3.1.4 Spannungsmessung durch Kompensation

Referenzgrößen:

- NETZGERÄTSPANNUNG  $U_{NG}$  2 V
- KOMPENSIERTER NETZGERÄTWERT  $S_{HNG}$  [H-POTI SKALA]  
 $492 \leq S_{HNG} \leq 493 \text{ s}$

Referenzgrößen der galvanischen Zelle:

- MULTIMETER GEMESSENE ZELLSPANNUNG  $U_{gZ}$  1,348 V
- BERECHNETE ZELLSPANNUNG  $U_{KagZ}$  1,347 V
- $U_{uk}$  UNKONTAKTIERTER [LADESTAND] VOR DEM EXPERIMENT (V1) 1,378 V
- $U_N$  SPANNUNGSNORMAL OUTPUT 1,0000 V
- KOMPENSIERTER WERT  $S_{HgZ}$  [ZELLWIDERSTAND WENDELPOENTIOMETER]  
 $663 \leq S_{HgZ} \leq 664 \text{ s}$
- SKALENBEREICH DES HELIPOTS:  $0 \leq S_{Heli} \leq 1000 \text{ s}$

Berechnen Sie die Spannung des Netzgerätes:

Die Spannung  $U_{NG}$  wird über die **Kompensation am Helipotentiometer** ermittelt. Dabei wurde das Spannungsnormal verwendet. Dazu wird die Schleiferposition so eingestellt, dass die abgegriffene Spannung mit der Referenzspannung übereinstimmt.

$$U_{NG} = U_N \cdot \frac{R_0}{R} = 1,0000 \text{ V} \cdot \frac{1000}{492} \approx 2,03 \text{ V}$$

mit ( $\Delta U_N = 0,0001 \text{ V}$ )

$$\Delta U_{NG} = U_{NG} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta U_N}{U_N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2}$$

Die Differenz von 30 mV wird auf die unbekannte Anzeigequalität des Netzgeräts und der Einstellungsfeinheit des Drehreglers zurückgeschlossen.

Berechnen Sie die Spannung der galvanischen Zelle:

Die Zellspannung  $U_{KagZ}$  kann analog über die Kompensation am Helipotentiometer ermittelt werden. Mit  $S_{HgZ}$  ergibt sich eine Spannung von 1,347 V. Dies entspricht dem Leerlaufwert der Zelle, da bei der Kompensationsmessung kein Strom fließt.

$$\begin{aligned} U_{KagZ} &= U_{NG} \cdot \frac{S_{HgZ}}{S_{max}} \\ &= 2 \text{ V} \cdot \frac{663.5}{1000} \\ &\approx 1.327 \text{ V} \end{aligned} \tag{5}$$

Mit  $U_{gZ}$  als gemessenen Referenzwert kann die Berechnung auf 1 mV bestätigt werden.

## Zu den Fehlern:

Für die Ableseunsicherheit  $\Delta S$  gilt:

$$\Delta U_{KagZ} = U_{KagZ} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta S_{HgZ}}{S_{HgZ}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{HNG}}{S_{HNG}}\right)^2}$$

Mit  $\Delta S_{HgZ} = \Delta S_{HNG} = 0.5$  s folgt:

$$\Delta U_{KagZ} \approx 1.327 \text{ V} \cdot \sqrt{\left(\frac{0.5}{663.5}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{492.5}\right)^2} \approx 1.7 \text{ mV}$$

Mit Spannungsnormal unsicherheit

$$\Delta U_{KagZ,N} \approx \sqrt{(1.7)^2 + (0.1)^2} \approx 1.70 \text{ mV}$$

$$U_{KagZ} = 1.327 \pm 0.0017 \text{ V}$$

Der mögliche Messfehler des Spannungsnormals liegt im Bereich von  $\pm 0.1$  mV. Wie gezeigt liegt das vielmals unter dem Fehler der Ablese und ist damit vernachlässigbar.

## Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem aus Teilversuch 1:

Der Multimeterwert  $U_{gZ} = 1,348$  V verträgt sich mit dem aus Teilversuch 1 gemessenen Wert, von 1,378 V, der Spannungsunterschied von 30 mV wird auf die Chemische Unruhe im laufe des Versuchstags sowie auf Messungenauigkeiten oder minimale Temperatur-, Kontaktunterschiede zurückgeführt vgl. **nichtlineare**

**Redox-Effekte.** Der berechnete Wert liegt im Bereich des im ersten Teilversuch nach dem Experiment gemessenen Wertes und ähnelt auch dem extrapolierten Wert. Aufgrund dieser Nähe kann logisch auf eine Spannungsrelaxation nach dem ersten Teilversuch geschlossen werden, was eine hochplausible Erklärung darstellt.

## Begründen Sie, warum die Spannung als Leerlaufspannung bezeichnet werden kann:

Da während der Kompensationsmessung kein Strom durch die galvanische Zelle fließt, tritt kein Spannungsabfall am Innenwiderstand auf. Die gemessene Spannung entspricht somit der **Leerlaufspannung**, die den maximal möglichen Wert der Zellspannung darstellt.

### 3.1.5 Bestätigung der Kirchoffschen Sätze

\*Im folgenden wird auf die Konstantz der Ströme entlage eines ungeteilten leiters bezogen.

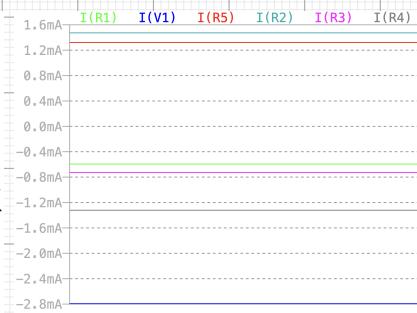
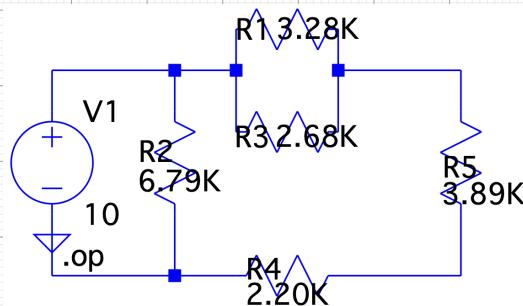
| Mre. esk 6 $\mu$ | $i$ | $I_{Mult}$ |
|------------------|-----|------------|
| 1                |     | 2.80       |
| 2                |     | 1.47       |
| 3                |     | 0.59       |
| 4                |     | 0.59       |
| 5                |     | 2.20       |
| 6                |     | 0.59       |
| 7                |     | 1.37       |
| 8                |     | 1.32       |
| 9                |     | 1.32       |
| 10               |     | 2.80       |
| 11               |     | 1.47       |
| 12               |     | 1.47       |

#### Bauteilpolung

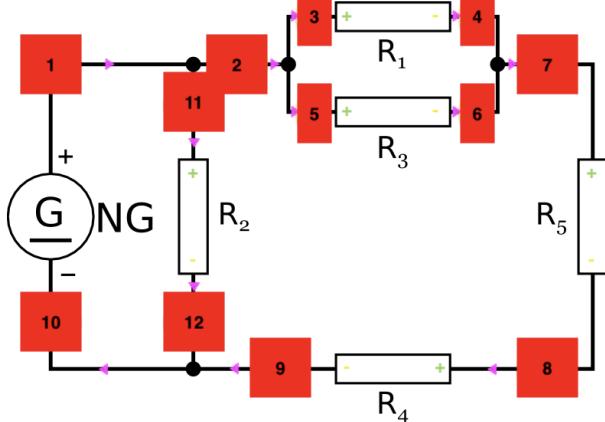
- $NG : U_{NG} = 10 \text{ V}$
- $R_1 = 3,28\text{k}\Omega : U_1 = -1.96\text{V} \wedge \Delta U \approx 0,22 \approx 0,3 \text{ V}$
- $R_2 = 6,79\text{k}\Omega : U_2 = 10.03\text{V} \wedge \Delta \approx 0,94 \approx 1 \text{ V}$
- $R_3 = 2,68\text{k}\Omega : U_3 = -1.96\text{V} \wedge \Delta \approx 0,22 \approx 0,3 \text{ V}$
- $R_4 = 2,20\text{k}\Omega : U_4 = 2.90\text{V} \wedge \Delta \approx 0,30 \approx 0,3 \text{ V}$
- $R_5 = 3,89\text{k}\Omega : U_5 = 5.16\text{V} \wedge \Delta \approx 0,50 \approx 0,5 \text{ V}$

#### $R_i$ Multimeter Messungen

Fehler nach Mult Datenbl.:  $U \cdot 9\% + 4 \cdot 0,01 = \Delta U$



Stromfehlerrechnung nach  
Multimeter Fehler Tabelle. :



Kirschhofftestschaltung

$$\Delta I_1 = 2.80 \cdot 0,01 \text{ mA} + 5 \cdot 0,01 \text{ mA} = 0.08 \text{ mA} \quad (6)$$

$$\Delta I_2 = 1.47 \cdot 0,01 \text{ mA} + 5 \cdot 0,01 \text{ mA} = 0.07 \text{ mA} \quad (7)$$

$$\Delta I_3 = 0.59 \cdot 0,01 \text{ mA} + 5 \cdot 0,01 \text{ mA} = 0.06 \text{ mA} \quad (8)$$

$$\Delta I_5 = 2.20 \cdot 0,01 \text{ mA} + 5 \cdot 0,01 \text{ mA} = 0.08 \text{ mA} \quad (9)$$

$$\Delta I_7 = 1.37 \cdot 0,01 \text{ mA} + 5 \cdot 0,01 \text{ mA} = 0.07 \text{ mA} \quad (10)$$

$$\Delta I_9 = 1.32 \cdot 0,01 \text{ mA} + 5 \cdot 0,01 \text{ mA} = 0.07 \text{ mA} \quad (11)$$

Kirchhoffschen Sätze explizit für alle Knoten und Maschen.:

$$U_{rk} = R_k I_{rk} \quad (k \in \{1, 2, 3, 4, 5\})$$

## Überprüfung der Kirchhoffschen Sätze und erweiterte Diskussion anhand der Messdaten.:

Ziel dieser Untersuchung ist die Bestätigung der Kirchhoffschen Knoten- und Maschensätze (KCL, KVL).

Experimentelle Messdaten Die Ströme wurden in einem realen Aufbau gemessen.

| Messreihe esk 6 | Fehler in $\mu$ |             |
|-----------------|-----------------|-------------|
| $i$             | $I_{Mult}$      | Fehler ung. |
| 1               | 2.80            |             |
| 2               | 1.47            |             |
| 3               | 0.59            |             |
| 4               | 0.59            |             |
| 5               | 2.20            |             |
| 6               | 0.59            |             |
| 7               | 1.37            |             |
| 8               | 1.32            |             |
| 9               | 1.32            |             |
| 10              | 2.80            |             |
| 11              | 1.47            |             |
| 12              | 1.47            |             |

Problemstellung: Die experimentellen Daten zeigen Abweichungen in der Größenordnung von  $\pm 0.1$  bis  $0.2$  mA. Beim Aufstellen der Kirchhoffschen Sätze traten Schwierigkeiten auf:

- Unsicherheit bei den Vorzeichenkonventionen der Ströme.
- Überbestimmte Knotengleichungen mit teilweise widersprüchlichen Resultaten.
- Die Maschenanalyse ergab teils inkonsistente Werte.

Dies deutete darauf hin, dass eine Simulation zur Klärung der Stromrichtungen sinnvoll ist.

### Simulation mit LTspice

Die Schaltung wurde in LTspice nachgebaut mit folgenden Parametern:

$$U_{NG} = 10 \text{ V}, \quad R_1 = 3.28 \text{k}\Omega \quad R_2 = 6.79 \text{k}\Omega \quad R_3 = 2.68 \text{k}\Omega \quad R_4 = 2.20 \text{k}\Omega \quad R_5 = 3.89 \text{k}\Omega$$

Die oben abgebildete Simulation ergab folgende Ströme:

$$I_1 = -0.611 \text{mA} \quad I_2 = +1.468 \text{mA} \quad (12)$$

$$I_3 = -0.730 \text{mA} \quad I_4 = -1.323 \text{mA} \quad (13)$$

$$I_5 = +1.307 \text{mA} \quad (14)$$

Negative Vorzeichen bedeuten, dass die Stromrichtung in LTspice entgegen der Bauteilreferenz verläuft.

Überprüfung der Kirchhoffschen Knotensätze

**Knoten A (1,3,5):**

$$I_1 + I_3 - I_5 = 0.611 + 0.730 - 1.307 = 0.034 \approx 0 \quad (15)$$

**Knoten B (2,4,N):**

$$I_2 - I_4 = 1.468 - 1.323 = 0.145 \approx 0 \quad (16)$$

## Knoten C (2,1+3,N):

$$I_2 - (I_1 + I_3) = 1.468 - (0.611 + 0.730) = 0.127 \approx 0 \quad (17)$$

Alle KCL-Gleichungen sind innerhalb von  $\pm 0.15$  mA erfüllt.

Überprüfung der Kirchhoffschen Maschensätze (KVL)

## Gegebene Widerstandsspannungen aus LTspice:

$$U_{NG} = +10,00V$$

$$U_1 = -2,00V$$

$$U_2 = +9,96V$$

$$U_3 = -1,96V$$

$$U_4 = -2,91V$$

$$U_5 = +5,08V$$

### Masche 1: (GN, 2)

Vorzeichen gewählt:  $+U_{NG} - U_2$

$$\sum U = +U_{NG} - U_2 = 10.00 - 9.96 = +0.04 V$$

**Residuum:** 0.04 V  $\approx 0$

### Masche 2: (2, 3, 5, 4)

Vorzeichen gewählt:  $+U_2 + U_3 - U_5 + U_4$

$$\sum U = 9.96 + (-1.96) - 5.08 + (-2.91) = 0.01 V$$

**Residuum:** 0.01 V

### Masche 3: (2, 1, 5, 4)

Vorzeichen gewählt:  $+U_2 + U_1 - U_5 + U_4$

$$\sum U = 9.96 + (-2.00) - 5.08 + (-2.91) = -0.03 V$$

**Residuum:** 0.03 V

### Masche 4: (1, 3)

Vorzeichen gewählt:  $+U_1 - U_3$

$$\sum U = -2.00 - (-1.96) = -0.04 V$$

**Residuum:** 0.04 V

### Masche 5: (GN, 1, 5, 4)

Vorzeichen gewählt:  $+U_{NG} + U_1 - U_5 + U_4$

$$\sum U = 10.00 + (-2.00) - 5.08 + (-2.91) = 0.01 \text{ V}$$

**Residuum:** 0.01 V

### Masche 6: (GN, 3, 5, 4)

Vorzeichen gewählt:  $+U_{NG} + U_3 - U_5 + U_4$

$$\sum U = 10.00 + (-1.96) - 5.08 + (-2.91) = 0.05 \text{ V}$$

**Residuum:** 0.05 V

### Interpretation:

- Alle simulierten Maschen erfüllen die Kirchhoffsschen Spannungsregeln (KVL) innerhalb von wenigen 0,01–0,05 V.
- Kleine Residuen werden vernachlässigt, und auf beispielsweise den innenwiderstand ders Leiters zurückgeschlossen
- Die korrekte Wahl der Maschenrichtung und der Vorzeichen für Spannungsabfälle ist entscheidend, besonders bei der Quelle  $U_{NG}$ .

| A  | B       | C  | D      | E               | F               |
|----|---------|----|--------|-----------------|-----------------|
| i  | IM (mA) | FI | UM (V) | $I_s$ (LTspice) | $U_s$ (LTspice) |
| 1  | 2.80    | 78 | -1.96  | -0.611          | -2.00           |
| 2  | 1.47    | 65 | 10.03  | +1.468          | +9.96           |
| 3  | 0.59    | 56 | -1.96  | -0.730          | -1.96           |
| 4  | 0.59    | 56 | 2.90   | -1.323          | -2.91           |
| 5  | 2.20    | 72 | 5.16   | +1.307          | +5.08           |
| 6  | 0.59    | 56 |        |                 |                 |
| 7  | 1.37    | 64 |        |                 |                 |
| 8  | 1.32    | 63 |        |                 |                 |
| 9  | 1.32    | 63 |        |                 |                 |
| 10 | 2.80    | 78 |        |                 |                 |
| 11 | 1.47    | 65 |        |                 |                 |
| 12 | 1.47    | 65 |        |                 |                 |

**Mess- und Simulationsdaten an verschiedenen Schaltungspunkten**

### Legende:

- A: Laufindex  $i$  (Messpunkt)
- B: Experimentelle Strommessung  $I_M$  (in mA)
- C: Fehlerrechnung zu den Mesströmen
- D: Experimentelle Spannungsmessung  $U_M$  (in V)
- E: Simulationsströme  $I_s$  aus LTspice
- F: Knotenspannungen  $U_s$  aus LTspice

# Überprüfung der Simulations Sätze mit den Messdaten

## Knoten 1:

$$I_1 = I_2 + I_{11} = 2.80 - 1.47 - 1.47 = -0,14 \text{ mA} \quad (18)$$

Mit  $\Delta I$  aus der FI Messreihe 6:

$$\Delta I_{K1} \approx \sqrt{(78)^2 + (65)^2 + (65)^2} \approx 120 \mu\text{A}$$

$$I_{K1} = -140 \pm 120 \mu\text{A} \approx 0$$

Die Knotensumme  $I_{K1}$  verträgt sich im Rahmen der zweifachen Unsicherheit mit dem gesuchten Equilibrium

**Knoten 2:** Anstatt  $I_5$  wurde  $I_6$  genommen das Strom Konstantz entlang  $R_3$  gilt.

$$I_2 - I_3 - I_6 = 1,47 - 0,59 - 0,59 = -0,29 \text{ mA} \quad (19)$$

Mit  $\Delta I$  aus der FI Messreihe 6:

$$\Delta I_{K2} \approx \sqrt{(65)^2 + (56)^2 + (56)^2} \approx 103 \mu\text{A}$$

$$I_{K2} = -290 \pm 110 \mu\text{A} \approx 0$$

Die Knotensumme  $I_{K2}$  verträgt sich im Rahmen der dreifachen Unsicherheit mit dem gesuchten Equilibrium

## Knoten 3:

$$I_6 + I_4 - I_7 = 0.59 + 0.59 - 1.37 = -0,19 \text{ mA} \quad (20)$$

Mit  $\Delta I$  aus der FI Messreihe 6:

$$\Delta I_{K3} \approx \sqrt{(56)^2 + (56)^2 + (64)^2} \approx 102 \mu\text{A}$$

$$I_{K3} = -190 \pm 110 \mu\text{A} \approx 0$$

Die Knotensumme  $I_{K3}$  verträgt sich im Rahmen der zweifachen Unsicherheit mit dem gesuchten Equilibrium

## Knoten 4:

$$I_9 + I_{12} - I_{10} = 1.32 + 1.47 - 2.79 = 0 \text{ mA} \quad (21)$$

Mit  $\Delta I$  aus der FI Messreihe 6:

$$\Delta I_{K4} \approx \sqrt{63^2 + (65)^2 + (78)^2} \approx 120 \mu\text{A}$$

$$I_{K4} = 0 \pm 120 \mu\text{A} = 0$$

Die Knotensumme  $I_{K4}$  entspricht dem gesuchten Equilibrium

**Masche 1:**

$$\sum U = +U_{NG} - U_2 = 10,00 - 10,03 = -0,03 \text{ V} \quad (22)$$

Mit dem Multimeterfehler im Auflösungsbereich bis zu 20,00 V und einen angenommen fehlerfreies Labornetzgerät lässt dich der Fehler von  $U_2$  reduzieren.

$$\Delta U_{M1} = \Delta U_2 = 10,03 \cdot 9\% + 4 \cdot 0,01 \approx 0,94 \text{ V}$$

$$U_{M1} = -0,03 \pm 1 \text{ V} = 0$$

Die Maschensumme  $U_{M1}$  verträgt sich im Rahmen der Unsicherheit mit dem gesuchten Equilibrium

**Masche 2:**

$$\sum U = +U_2 + U_3 - U_5 + U_4 = 10,03 + (-1,96) - 5,16 + 2,90 = 5,81 \text{ V} \quad (23)$$

$$= 10,03 + (-1,96) - 5,16 + -2,90 = 0,01 \text{ V} \quad (24)$$

$$\Delta U_{M2} = \sqrt{0,94^2 + 0,22^2 + 0,50^2 + 0,30^2} \text{ V} \approx 1,11 \text{ V}$$

$$U_{M2} = 0,01 \pm 1,2 \text{ V} \approx 0$$

Die Maschensumme  $U_{M2}$  verträgt sich im Rahmen der Unsicherheit mit dem gesuchten Equilibrium

**Masche 3:**

$$\sum U = +U_2 + U_1 - U_5 + U_4 = 10,03 + (-1,96) - 5,16 + 2,90 = 5,81 \text{ V} \quad (25)$$

$$= 10,03 + (-1,96) - 5,16 + -2,90 = 0,01 \text{ V} \quad (26)$$

$$\Delta U_{M3} = \sqrt{0,94^2 + 0,22^2 + 0,30^2 + 0,50^2} \text{ V} \approx 1,2 \text{ V}$$

$$U_{M3} = 0,01 \pm 1,2 \text{ V} \approx 0$$

Die Maschensumme  $U_{M3}$  verträgt sich im Rahmen der Unsicherheit mit dem gesuchten Equilibrium

**Masche 4:**

$$\sum U = +U_1 - U_3 = -1,96 - (-1,96) = 0 \text{ V} \quad (27)$$

$$\Delta U_{M4} = \sqrt{0,22^2 + 0,22^2} \text{ V} \approx 0,4 \text{ V}$$

$$U_{M4} = 0 \pm 0,4 \text{ V} = 0$$

Die Maschensumme  $U_{M4}$  entspricht dem gesuchten Equilibrium

### Masche 5:

$$\sum U = +U_{NG} + U_1 - U_5 + U_4 = 10.00 + (-1.96) - 5.16 + \textcolor{red}{2.90} = 5,78 \text{ V} \quad (28)$$

$$= 10.00 + (-1.96) - 5.16 + \textcolor{green}{-2.90} = -0,02 \text{ V} \quad (29)$$

$$\Delta U_{M5} = \sqrt{0,22^2 + 0,50^2 + 0,30^2} \text{ V} \approx 0,62 \text{ V}$$

$$U_{M5} = -0,02 \pm 0,7 \text{ V} \approx 0$$

Die Maschensumme  $U_{M5}$  verträgt sich im Rahmen der Unsicherheit mit dem gesuchten Equilibrium

### Masche 6:

$$\sum U = +U_{NG} + U_3 - U_5 + U_4 = 10.00 + (-1.96) - 5.16 + \textcolor{red}{2.90} = 5,78 \text{ V} \quad (30)$$

$$= 10.00 + (-1.96) - 5.16 + \textcolor{green}{-2.90} = -0,02 \text{ V} \quad (31)$$

$$\Delta U_{M6} = \sqrt{0,22^2 + 0,50^2 + 0,30^2} \text{ V} \approx 0,62 \text{ V}$$

$$U_{M6} = -0,02 \pm 0,7 \text{ V} \approx 0$$

Die Maschensumme  $U_{M6}$  verträgt sich im Rahmen der Unsicherheit mit dem gesuchten Equilibrium

Fazit Die Kombination aus experimentellen Messdaten und Simulation zeigt Folgendes:

- Die Kirchhoffsche Knotenregel (KCL) wird sehr gut erfüllt.
- Die Überprüfung der Kirchhoffschen Maschenregel (KVL) deutet auf eine mögliche Polungsabweichung am Bauteil  $R_4$  hin, ansonsten ist die Übereinstimmung sehr gut. Der hier **rot markierte** Wert sollte am Versuchsaufbau mit entgegengesetzter Polung gemessen werden, das Ergebnis liefert dann eine vollständige Erfüllung der KVL. Der **grün markierte** Wert ist frei erfunden und hat zur Annahme, dass die Messung auch diesen hat ausgeben können!
- Die Simulation liefert konsistente Ergebnisse, die als Referenz für die experimentellen Daten genutzt werden können.
- Abweichungen im Bereich von 10 mA lassen sich auf Messtoleranzen zurückführen.
- Damit ist die KVL für alle untersuchten Maschen theoretisch experimentell und simulativ bestätigt.

**Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München**  
**Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2**  
**Blockpraktikum vom 11. Aug. bis 9. Sept. 2025**

|  |  |                         |  |                  |                 |                  |                                     |
|--|--|-------------------------|--|------------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|
| <b>Versuch:</b>  | <b>Wechselspannungen und aperiodische Vorgänge</b> |                         |  | <b>Gruppe:</b>   | <b>C2-5</b>     |                  |                                     |
| <b>Vorname 1:</b>  | <b>Ahmed</b>                                       |                         |  | <b>Name 1:</b>   | <b>Djelassi</b> |                  |                                     |
| <b>Vorname 2:</b>  | -----  |                         |  | <b>Name 2:</b>   | -----           |                  |                                     |
| Mit Abgabe der Auswertung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!  |  |                         |  |                  |                 |                  |                                     |
| Die Abgabe ist vor dem Einreichen auf eine saubere äußere Form und Struktur zu kontrollieren.<br>Bei ungenügender äußerer Form erfolgt zunächst keine Korrektur! |  |                         |  |                  |                 | <b>OK?</b>       | <input checked="" type="checkbox"/> |
|  |  |                         |  | <b>1. Abgabe</b> |                 | <b>2. Abgabe</b> |                                     |
| Alle Teilversuche vollständig ausgewertet?   |  |                         |  | Ja               | Nein            | Ja               | Nein                                |
| Wurden immer korrekte Formeln angegeben und eigene Werte eingesetzt?   |  |                         |  | Ja               | Nein            | Ja               | Nein                                |
| Wurde immer eine Fehlerrechnung durchgeführt?  |  |                         |  | Ja               | Nein            | Ja               | Nein                                |
| Sind Endergebnisse immer angegeben und korrekt gerundet?   |  |                         |  | Ja               | Nein            | Ja               | Nein                                |
| Wurde immer eine aussagekräftige Diskussion geführt?   |  |                         |  | Ja               | Nein            | Ja               | Nein                                |
| Wurden alle Diagramme mit geeignetem Maßstab und Titel eingeklebt?   |  |                         |  | Ja               | Nein            | Ja               | Nein                                |
| Enthalten die Diagramme alle Messwerte, Beschriftungen u. Konstruktionen?  |  |                         |  | Ja               | Nein            | Ja               | Nein                                |
| Sind ausgefülltes Deckblatt, Vorbereitung und Messprotokoll in der Abgabe enthalten  |  |                         |  | Ja               | Nein            | Ja               | Nein                                |
| Auswertung erhalten am:  |  |                         |  |                  |                 |                  |                                     |
| Auswertung zurückgegeben am:   |  |                         |  |                  |                 |                  |                                     |
| Nacharbeit notwendig bis:  |  |                         |  |                  |                 | nicht möglich    |                                     |
| Abzug 0,2 Punkte pro Nacharbeit/angefangene 3 Tage Verspätung:   |  |                         |  | -0,2             | -0,2            | -0,2             | -0,2                                |
| Wird eine der obigen Fragen bei der ersten Abgabe mit Nein beantwortet ist eine Nacharbeit erforderlich!   |  |                         |  |                  |                 |                  |                                     |
| <b>Punkte:</b>   |  | <b>Datum, Abtestat:</b> |  |                  |                 |                  |                                     |

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

### 3.2.1 Basiselemente des Oszilloskops

#### Specifications

##### Vertical Deflection

**Operating modes:** Channel I or II separate both Channels (alternated or chopped)

**Chopper frequency:** approx. 0.5MHz

**Sum or Difference:** from CH I and CH II

**Invert:** CH I and CH II

**XY-Mode:** via channel I (Y) and channel II(X)

**Frequency range:** DC to 150MHz (-3dB)

**Rise time:** <2.3ns

**Overshoot:** ≤1%

**Deflection coefficient:** 14 calibrated positions from **1mV/div** to **20V/div** in 1-2-5 sequence, variable 2.5:1 to min. **50V/div**.

##### Accuracy in calibrated positions

**1mV/div - 2mV/div:** ±5% (DC-10MHz(-3dB))

**5mV/div - 20V/div:** ±3%

**Input impedance:**  $1M\Omega$  II 15pF

**Input coupling:** DC-AC-GD (ground)

**Input voltage:** max. 400V (DC + peak AC)

**Delay line:** approx. 70ns

##### Triggering

**Automatic (peak to peak):** 20Hz-250MHz ( $\geq 0.5$ div.)

**Normal with level control:** DC-250MHz ( $\geq 0.5$ div.)

**Indicator for trigger action:** LED

**Slope:** positive or negative

**Sources:** Channel I or II, line and external

**ALT. Triggering:** CH I/CH II ( $\geq 0.8$ div.)

**Coupling:** AC (10 - 250MHz)

DC (0 - 250MHz)

HF (50kHz - 250MHz)

LF (0 - 1.5kHz)

**NR (Noise reject):** 0 - 50MHz ( $\geq 0.8$ div.)

**Triggering time base B:** normal with level control and slope selection (0 - 250 MHz)

**External:**  $\geq 0.3V_{pp}$  (0 - 250MHz)

**Active TV Sync. Separator:** field & line, + / -

#### Horizontal Deflection

##### Analog Time Base:

Accuracy in calibr. position **3%**; 1-2-5 sequence

**A:** 0.5s-50ns/div.

**B:** 20ms-50ns/div.

**Operating modes:** A or B, alternate A/B

**Variable:** 2.5:1 up to 1.25s/div.

**X-MAG. x10** ( $\pm 5\%$ ) max. 5ns/div.

**Holdoff time:** variable to approx. 10.1

**Bandwidth X-amplifier:** 0 - 3MHz (-3dB)

**X-Y phase shift:**  $<3^\circ$  below 220kHz

##### Digital Time Base:

**Accuracy:** **3%**; 1-2-5 sequence

**A:** 100s-0.1μs/div.

**Peak detect:** 100s - 5μs/div.

**B:** 20ms-0.1μs/div.

**Peak detect:** 20ms - 5μs/div.

**Operating modes:** A or B, alternate A/B

**X-MAG. x10** ( $\pm 5\%$ ): 10ns/div.

**Bandwidth X-Amplifier:** 0 - 20MHz (-3dB)

**X-Y phase shift:**  $<3^\circ$  below 20MHz

**Input X-amplifier:** via Channel II

**Sensitivity:** see CH II

#### Digital Storage

**Operating modes:** Refresh, Roll, Single, XY

Peak Detect, Average (2 to 512), Envelope

**Dot Join function:** automatically

**Acquisition (real time)**

**8 bit flash A/D** max. 200MSa/s

**Peak detect:** 5ns

**Display refresh rate:** max. 180/s

**Memory & display:** 2k x 8bit per channel

**Reference memory:** 2 waveforms 2k x 8bit

**Saved in:** (EEPROM).

**Resolution (samples/div.):** X 200/div.

Y 25/div.

XY 25 x 25/div.

**Pre-/Post Trigger:** 25,50,75,100,-25,-50,-75%

#### Operation / Control

**Manual:** front panel switches

**Auto Set:** signal related automatic parameter selection

**Save & Recall:** 9 user defined parameter settings

##### Readout & Cursor (analog/digital)

Display of parameter settings and other functions on the screen. Trigger point indication.

Cursor measurement of  $\Delta U$ ,  $\Delta t$  or  $1/\Delta t$  (frequency), separate or in tracking mode.

**Readout intensity:** separately adjustable.

##### Interface

**PC remote control:** built in RS232 interface

**Option:** HO79-6 Multifunction-Interface

IEEE-Bus, RS232, and Centronics

**Output formats (HO79-6):** PCL, Post Script

HPGL, EPSON

Opto interface

HZ70

#### Component Tester

**Test voltage:** max.  $7V_{rms}$  (o/c).

**Test current:** max.  $7mA_{rms}$  (s/c)

**Test frequency:** approx. 50Hz

One test lead is grounded (Safety Earth)

#### General Information

**CRT:** D14-375GY, 8x10cm internal graticule

**Acceleration voltage:** approx. 14kV

**Trace rotation:** adjustable on front panel

**Calibrator:**  $0.2V \pm 1\%, \approx 1kHz/1MHz$  (tr <4ns)

**Line voltage:** 100-240V AC  $\pm 10\%$ , 50/60Hz

**Power consumption:** approx. 47 Watt at 50Hz

**Min./Max. ambient temperature:**  $0^\circ C...+40^\circ C$

**Protective system:** Safety class I (IEC1010-1)

**Weight:** approx. 6.5kg (12.4lbs)

**Color:** technico-brown

**Cabinet:** W 285, H 125, D 380 mm

7/00

Datenblatt Hyperlink bei den Herstellerangaben.

**Annahme:** Oszilloskop wurde aus einem kalibrierten Zustand genutzt.

#### Beschreiben Sie kurz zum Oszilloskops.:

Die Basisbedienelemente des Oszilloskops lassen sich grob in **Positionseinstellungen** und **Ablenkfaktoren** unterteilen. Mit den Positionseinstellungen kann die Kurve sowohl **vertikal** als auch **horizontal** verschoben werden, um den gewünschten Ausschnitt der Schwingung auf dem Bildschirm sichtbar zu machen. Die Ablenkfaktoren bestimmen die Skalierung: **Volts/Div** legt die Amplitude pro Kästchen auf der y-Achse fest, während **Time/Div** die zeitliche Ausdehnung pro Kästchen auf der x-Achse definiert. Damit können Schwingungen in Höhe und Breite gezielt dargestellt werden.

#### Erklären Sie die Funktions- und Wirkungsweise des Triggers in wenigen Sätzen.:

Der **Trigger** sorgt dafür, dass das Oszilloskop eine periodische Schwingung stabil und nicht wandernd“ anzeigt. Er legt den Zeitpunkt fest, zu dem die Ablenkung des Elektronenstrahls startet. Durch die Wahl einer **ansteigenden** oder **fallenden** **Flanke** kann definiert werden, an welchem Punkt der Schwingung die Darstellung beginnt. Im **Normal-Modus** wird nur dann ausgelöst, wenn die eingestellte Bedingung erfüllt ist, während im **Auto-Modus** auch ohne Signal ein Bild erzeugt wird. Dadurch erhält man ein ruhiges, reproduzierbares Signal auf dem Bildschirm.

## **Referenzgrößen:**

Die wichtigsten Referenzgrößen beim Messen am Oszilloskop sind damit:

- **Amplitude (U)** – eingestellt über Volts/Div.
- **Zeitbasis (t)** – eingestellt über Time/Div.
- **Trigger-Bedingung** – bestimmt Stabilität und Startpunkt der Kurve.

### 3.2.2 Messen einer Amplitude

Referenzgrößen:

|  |                |
|--|----------------|
| • $F_{Mult}$ [FREQUENZBEREICH] DES MULTIMETERS         | 45 Hz – 400 Hz |
| • $f_{func}$ FUNKTIONSGENERATOR [EINSTELLUNGSFREQUENZ] | 228 Hz         |
| • $U_{Mult}$ MULTIMETER [EFFEKTIVWERT]                 | 8,347 V        |
| • $2\hat{U}_{osz}$ (DOPPELTE) AMPLITUDE                | 24,0 V BEI 5 V |
| • $\Delta 2\hat{U}_{osz}$ OSZILLOSKOP MESSFEHLER       | 250 mV         |
| • $U_{eff,osz}$ OSZILLOSKOP [EFFEKTIVWERT]             | 8,485 V        |

Fehlerberechnung

$$\Delta U_{Mult} = U \cdot p\% + 3dgt = 8,347 \text{ V} \cdot 1\% + 3 \cdot 0.001 \approx 0,08647 \text{ V} = 0,09 \text{ V} \quad (32)$$

$$\Delta 2\hat{U}_{osz} = \frac{\text{div}}{20} = \frac{5 \text{ V}}{20} = 0,25 \text{ V} \quad (33)$$

$$\Delta U_{eff,osz} = \Delta 2\hat{U}_{osz} \cdot 2^{-1,5} \approx 0,08838 \text{ V} = 0,09 \text{ V} \quad (34)$$

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| • $U_{MULT}$ MULTIMETER [EFFEKTIVWERT]     | $(8,35 \pm 0,09) \text{ V}$ |
| • $2\hat{U}_{osz}$ (DOPPELTE) AMPLITUDE    | $(24,0 \pm 0,8) \text{ V}$  |
| • $U_{EFF,OSZ}$ OSZILLOSKOP [EFFEKTIVWERT] | $(8,48 \pm 0,09) \text{ V}$ |

Der Oszilloskop Effektivwert  $(8,48 \pm 0,09) \text{ V}$  entspricht im Rahmen der Unsicherheit der Multimetermessung  $(8,35 \pm 0,09) \text{ V}$ .

### 3.2.3 Messen einer Phasendifferenz

Berechnen Sie aus Ihren Messwerten jeweils die Phasendifferenzen der beiden angewendeten Methoden und vergleichen Sie die Ergebnisse.:

Referenzgrößen (bei angenommener Unvollständigkeit nicht berücksichtigt):

- $T_s$  [PERIODENDAUER] DER SCHWINGUNG 4,56 s BEI 1 ms
- $f_s$  [FREQUENZ] DES SCHWINGUNGSZÄHLERS 222 Hz
- $f_s$  [FREQUENZ] DER SCHWINGUNG 220 Hz BEI 1 ms
- $\Delta t_\varphi$  [PERIODENVERSCHIEBUNG] 908 ms BEI 1 ms
- $\Delta V_{X,\varphi}$  [SPANNUNGSVERSCHIEBUNG] 2,55 V BEI 500 mV

Übernommene Daten einer Kommilitonin (p.A., gleiche Bedingungen):

übermittelt am 06.09.25 — Begleitete Auswertung zum 09.09.25

- $f_1$  [FREQUENZ]  $(396 \pm 4)$  Hz
- $T_1$  REZIPROKE [FREQUENZ]:  $[\Delta T = \frac{1}{2}(f_{+\Delta}^{-1} - f_{-\Delta}^{-1})]$   $(2525 \pm 26)$   $\mu$ s
- $f_2$  [FREQUENZ]  $(395 \pm 4)$  Hz
- $T_2$  REZIPROKE [FREQUENZ]  $(2525 \pm 26)$   $\mu$ s
- $\Delta t_1$  [PERIODENVERSCHIEBUNG]  $(986 \pm 10)$   $\mu$ s
- $\Delta t_2$  [PERIODENVERSCHIEBUNG]  $(336 \pm 10)$   $\mu$ s
- $\hat{U}_{x,1}$  DOPPELTE [SPANNUNGSAMPLITUDE]  $(2,69 \pm 0,04)$  V
- $\hat{U}_{x,2}$  DOPPELTE [SPANNUNGSAMPLITUDE]  $(2,76 \pm 0,04)$  V
- $U_{x,1}$  [SPANNUNGSVERSCHIEBUNG]  $(1,71 \pm 0,04)$  V
- $U_{x,2}$  [SPANNUNGSVERSCHIEBUNG]  $(1,84 \pm 0,04)$  V

$$\Delta\varphi_{1:y-t} = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 2\pi \frac{(986 \pm 10) \mu\text{s}}{(2525 \pm 26) \mu\text{s}} = (2,45 \pm 0,06) \text{ rad} \Rightarrow \frac{\pi}{2} < \varphi_1 < \pi \quad (35)$$

$$\Delta\varphi_{2:y-t} = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 2\pi \frac{(336 \pm 10) \mu\text{s}}{(2525 \pm 26) \mu\text{s}} = (0,76 \pm 0,04) \text{ rad} \Rightarrow 0 < \varphi_2 < \frac{\pi}{2} \quad (36)$$

Ergebniss entsprach dem Erwartungsbereich. Fehler analog zu  $T$ .

$$: \Delta\Delta\varphi_{i:x-y} =$$

$$= \sqrt{((\partial_{\Delta U_{x,i}} \Delta\varphi_{i:x-y}) \Delta\Delta U_{x,i})^2 + ((\partial_{\hat{U}_{x,i}} \Delta\varphi_{i:x-y}) \hat{U}_{x,i})^2} \quad (37)$$

$$\Delta\varphi_{1:x-y} = \pi - \arcsin \frac{U_x}{\hat{U}_x} = \pi - \arcsin \frac{(1,71 \pm 0,04) \text{ V}}{(2,69 \pm 0,04) \text{ V}} = (2,453 \pm 0,023) \text{ rad} \quad (38)$$

$$\Delta\varphi_{2:x-y} = \pi - \arcsin \frac{U_x}{\hat{U}_x} = \pi - \arcsin \frac{(1,84 \pm 0,04) \text{ V}}{(2,76 \pm 0,04) \text{ V}} = (0,730 \pm 0,024) \text{ rad} \quad (39)$$

Die aus den y-t- und x-y-Aufzeichnungen von E.U. ermittelten Werte ergeben im Rahmen der Messgenauigkeit übereinstimmende Verschiebungswerte.

• G1-4A — 25.08.25

EDDA UTZ

### 3.2.4 Betrachten des Auf- und Entladevorgangs eines Kondensators

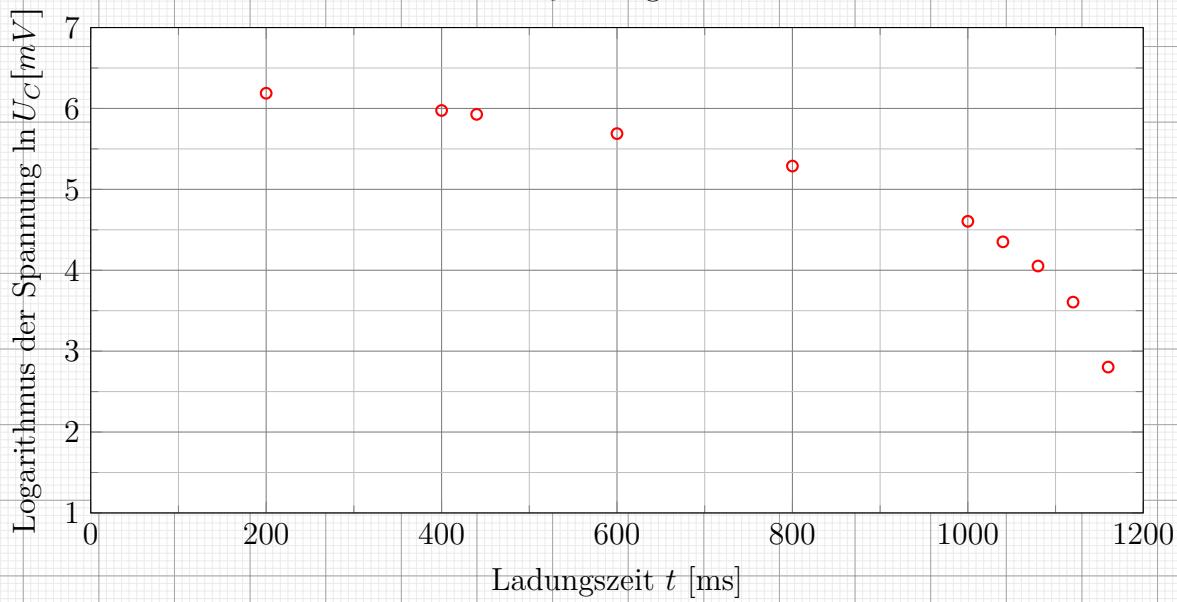
Erklären Sie jeweils inklusive physikalischer Begründung den Einfluss der Veränderung des Widerstandes und der Verdopplung der Kapazität auf die Kurve.:

Nach dem Tausch von R wird durch den Variablen Widerstand die Relaxationszeit verändert und zeigt damit die durch die Rechtecksfunktion des Funktionengenerator Limitierte Aufladung. Der Variable Widerstand Verändert durch  $\tau = RC$  die Relaxationszeit und ermöglicht eine Beobachtung der Ent- und Aufladung. Durch die Veränderung der Kapazität gilt nach  $U_C = QC^{-1}$  es wird auch die Spannung verändert.

### 3.2.5 Messen der Relaxationszeit bei der Entladung eines Kondensators

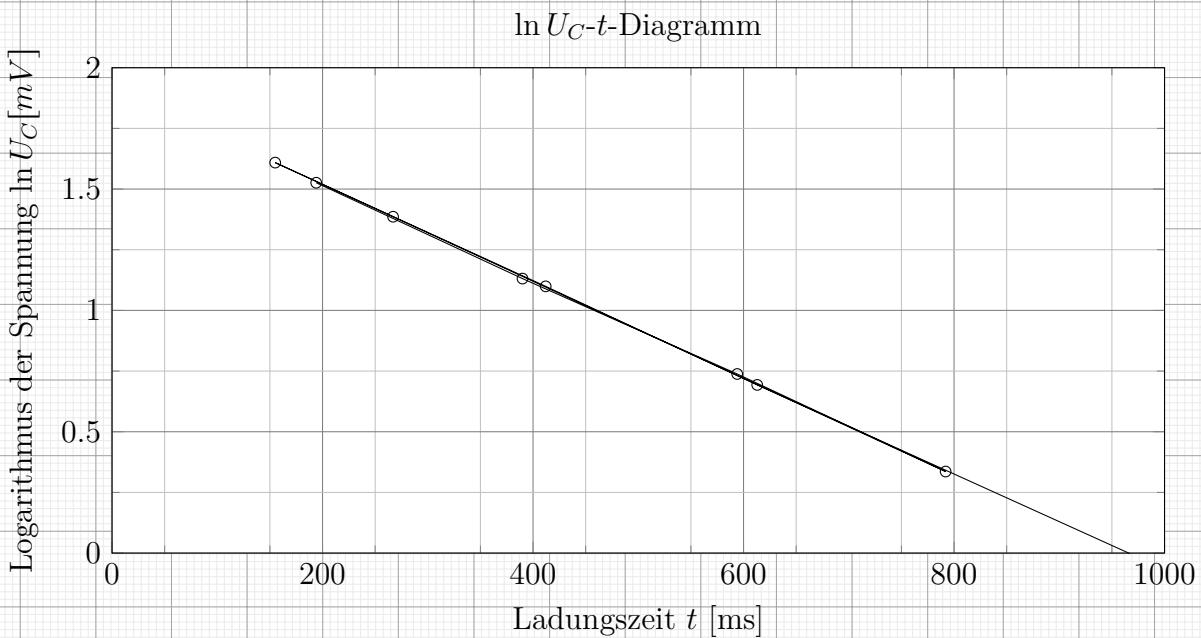
| Messreihe osz 1 |         |           |               |
|-----------------|---------|-----------|---------------|
| $i$             | $t[ms]$ | $U_C[mV]$ | $\ln U_C[mV]$ |
| 1               | 200     | 487       | 6.19          |
| 2               | 400     | 393       | 5.98          |
| 3               | 600     | 296       | 5.69          |
| 4               | 800     | 198       | 5.29          |
| 5               | 1000    | 100       | 4.61          |
| 6               | 1040    | 77.5      | 4.35          |
| 7               | 1080    | 57.5      | 4.05          |
| 8               | 1120    | 36.8      | 3.61          |
| 9               | 1160    | 16.5      | 2.8           |
| 10              | 1200    | 0         |               |
| 11              | 440     | 375       | 5.93          |

$\ln U_C$ - $t$ -Diagramm



Aufgrund des ausbleibenden linearen Verlaufs wird hier von einem Experimentierfehler ausgegangen. Die Relaxationszeit kann im Folgenden nur aus den gegebenen Daten nachvollzogen werden; auf eine graphische Analyse wird verzichtet. Die Natur des Fehlers ist noch zu klären und wird bei Vorliegen entsprechender Erkenntnisse ergänzt.

| (1x) | von Anleitung: |          | L.M.B.       |
|------|----------------|----------|--------------|
| $i$  | $t[ms]$        | $U_C[V]$ | $\ln U_C[V]$ |
| 1    | 194            | 4.60     | 1.526        |
| 2    | 390            | 3.10     | 1.131        |
| 3    | 594            | 2.09     | 0.738        |
| 4    | 792            | 1.40     | 0.336        |
| 5    | 267            | 4.00     | 1.386        |
| 6    | 155            | 5.00     | 1.609        |
| 7    | 412            | 3.00     | 1.099        |
| 8    | 613            | 2.00     | 0.693        |
| 9    | 967            | 0.998    | -0.002       |



**Legen Sie die optimale Gerade durch die Messpunkte, bestimmen Sie deren Steigung und berechnen Sie daraus die Fehlerstreifen sowie die Unsicherheit  $\ln(U/U_0)$ :**

Der Graph ist nicht linear, hier wird von einem Messfehler ausgegangen. Dazu wurde sich ab Seite 20 der Zusatzliteratur [TAE] gelesen. Die Fehlerquelle bleibt unbekannt, die Theorie und der Sollzustand sind erfasst und durch die von der Anleitung gegebenen Daten bestätigt.

**Berechnen Sie aus der Steigung die Relaxationszeit  $\tau_C$ . Bestimmen Sie deren Unsicherheit aus dem Fehler der Steigung.:**

$$m_1 = \frac{x_i - x_I}{y_i - y_I} = \left( \frac{200 \text{ s} - 1160 \text{ s}}{6,19 \ln \text{ mV} - 2,8 \ln \text{ mV}} \right) = \frac{-960 \text{ second}}{3,38 \ln \text{ mV}} = -284 \text{ s}/\ln \text{ mV}_1 \quad (40)$$

$$m_2 = \left( \frac{194 \text{ s} - 613 \text{ s}}{1,526 \ln \text{ V} - 0,693 \ln \text{ V}} \right) = -503,001 \text{ s}/\ln \text{ V}_2 \quad (41)$$

Aus der Steigung konnte kein vergleichbares Ergebniss errechnet werden, das Herstellerproduct ist mehrere Größenordnungen entfernt, im Folgenden wird über der RC-Entladegleichung verglichen.

**Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Produkt  $RC$  aus den Herstellerangaben.:**

$$R = 1 \text{ M}\Omega \wedge C = 10 \mu\text{F} \Rightarrow \tau = 10 \text{ s} \quad (42)$$

Die Entladedauer bis zum endwert von 375 mV berechnet sich nach der RC-Entladegleichung

$$t = RC \ln \left( \frac{U_0}{U_0 - U_{entl}} \right) = 1 \text{ M}\Omega \cdot 10 \mu\text{F} \ln \left( \frac{9 \text{ V}}{9 \text{ V} - 375 \text{ mV}} \right) = 31,78 \text{ s} \quad (\text{TAE-1.22})$$

Mit der Rule of Thumb [TAE-s22] der maximalen Entladung mit 5RC gilt:

$$t_{Max} \approx 5RC = 50\text{ s} \quad (43)$$

Der abgefallene Teil von 9V ist durch 5,69V kostituiert was einen Vergleich zwischen einem errechneten und dem gegebenen Wert erlaubt, so gilt:

$$t_e = RC \ln\left(\frac{U_0}{U_0 - U_{632\%}}\right) = 1\text{ M}\Omega \cdot 10\text{ }\mu\text{F} \ln\left(\frac{9\text{ V}}{9\text{ V} - 5,69\text{ V}}\right) = 10\text{ s} \quad (44)$$

Wie oben, durch das Produkt von RC gezeigt, und durch  $t_e$  errechnet wird bei angenommen  $U_{632\%}$  das Hersteller Produkt bestätigt.

**Welche Stellung am Tastkopf beeinflusst Ihre Schaltung weniger stark? Begründen Sie Ihre Antwort.:**

Für 1x-Tastkopf gilt, Direkte Messung ohne Abschwächung. Höhere Kapazität des Tastkopfes kann den Kondensator spürbar beladen, besonders bei hochohmigen Widerständen- Ergebnis: Die Entladung wird schneller angezeigt, als sie in Realität abläuft. Und für 10x-Tastkopf dementsprechend Spannung wird um den Faktor 10 abgeschwächt. Niedrigere Eingangskapazität daher geringerer Einfluss auf die Schaltung. Entladungskurve entspricht näher der Theorie, weniger Verzerrung.

**Bestimmen Sie, welchen Widerstand der Tastkopf haben muss, damit nur 1/10 der an den Tastkopfspitzen anliegenden Spannung am Innenwiderstand des Oszilloskops anliegt.:**

$$\tau = RC \wedge R_{osz} = 1\text{ M}\Omega$$

für 10x :

$$U_{TK} + U_{osz} = U_0 9/10 U_0 + 1/10 U_0 = U_0 \Rightarrow R_T = 9 \cdot R_{osz} = 9\text{ M}\Omega \quad (45)$$

### 3.3 Auswertung zum 01.09.2025

Vierpole

Die Abgabe setzt sich aus zwei Teilen zusammen: Durchführung und Auswertung. Dem Verfasser ist es freigestellt, die Inhalte nach eigenem Ermessen zu platzieren. Sollte es Schwierigkeiten beim Finden relevanter Inhalte geben, wird darum gebeten, sich an den gleich indexierten Teil der Durchführung oder Auswertung zu orientieren. Vielen Dank für Ihre Zeit.

|  |
|--|
| <b>Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München</b><br><b>Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2</b><br><b>Blockpraktikum vom 11. Aug. bis 9. Sept. 2025</b> |
|--|

|  |                 |                         |  |                |                 |                  |                                     |               |      |
|--|-----------------|-------------------------|--|----------------|-----------------|------------------|-------------------------------------|---------------|------|
| <b>Versuch:</b>  | <b>Vierpole</b> |                         |  | <b>Gruppe:</b> | <b>C2-5</b>     |                  |                                     |               |      |
| <b>Vorname 1:</b>  | <b>Ahmed</b>    |                         |  | <b>Name 1:</b> | <b>Djelassi</b> |                  |                                     |               |      |
| <b>Vorname 2:</b>  | -----           |                         |  | <b>Name 2:</b> | -----           |                  |                                     |               |      |
| <b>Mit Abgabe der Auswertung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!</b>   |                 |                         |  |                |                 |                  |                                     |               |      |
| Die Abgabe ist vor dem Einreichen auf eine saubere äußere Form und Struktur zu kontrollieren.<br>Bei ungenügender äußerer Form erfolgt zunächst keine Korrektur! |                 |                         |  |                |                 | <b>OK?</b>       | <input checked="" type="checkbox"/> |               |      |
|  |                 |                         |  |                |                 | <b>1. Abgabe</b> | <b>2. Abgabe</b>                    |               |      |
| Alle Teilversuche vollständig ausgewertet?   |                 |                         |  |                |                 | Ja               | Nein                                | Ja            | Nein |
| Wurden immer korrekte Formeln angegeben und eigene Werte eingesetzt?   |                 |                         |  |                |                 | Ja               | Nein                                | Ja            | Nein |
| Wurde immer eine Fehlerrechnung durchgeführt?  |                 |                         |  |                |                 | Ja               | Nein                                | Ja            | Nein |
| Sind Endergebnisse immer angegeben und korrekt gerundet?   |                 |                         |  |                |                 | Ja               | Nein                                | Ja            | Nein |
| Wurde immer eine aussagekräftige Diskussion geführt?   |                 |                         |  |                |                 | Ja               | Nein                                | Ja            | Nein |
| Wurden alle Diagramme mit geeignetem Maßstab und Titel eingeklebt?   |                 |                         |  |                |                 | Ja               | Nein                                | Ja            | Nein |
| Enthalten die Diagramme alle Messwerte, Beschriftungen u. Konstruktionen?  |                 |                         |  |                |                 | Ja               | Nein                                | Ja            | Nein |
| Sind ausgefülltes Deckblatt, Vorbereitung und Messprotokoll in der Abgabe enthalten  |                 |                         |  |                |                 | Ja               | Nein                                | Ja            | Nein |
| Auswertung erhalten am:  |                 |                         |  |                |                 |                  |                                     |               |      |
| Auswertung zurückgegeben am:   |                 |                         |  |                |                 |                  |                                     |               |      |
| Nacharbeit notwendig bis:  |                 |                         |  |                |                 |                  |                                     | nicht möglich |      |
| Abzug 0,2 Punkte pro Nacharbeit/angefangene 3 Tage Verspätung:   |                 |                         |  |                |                 | -0,2             | -0,2                                | -0,2          | -0,2 |
| Wird eine der obigen Fragen bei der ersten Abgabe mit Nein beantwortet ist eine Nacharbeit erforderlich!   |                 |                         |  |                |                 |                  |                                     |               |      |
| <b>Punkte:</b>   |                 | <b>Datum, Abtestat:</b> |  |                |                 |                  |                                     |               |      |

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

Ahmed Djelassi C2-5

LMU München Grundpraktikum der Physik 12776917

1/140/173 I: 14 Kapitel: 3.3

Auswertung zum 01.09.2025

Vierpole

### 3.3.1 Qualitative Untersuchung einzelner Schalelemente

Resultierende Referenzgrößen:

- |  |      |
|--|------|
| • $\varphi_R$ PHASENVERSCHIEBUNG WIDERSTAND  | 0°   |
| • $\varphi_C$ PHASENVERSCHIEBUNG KONDENSATOR | -90° |
| • $\varphi_L$ PHASENVERSCHIEBUNG SPULE       | 90°  |

Überprüfen Sie die Gültigkeit der theoretischen Phasenverschiebungen anhand Ihrer Messwerte.

Widerstand: Strom und Spannung sind in Phase ( $\varphi = 0^\circ$ ), da der Widerstand Energie nur in Wärme umsetzt, nicht speichert. Kondensator: Strom eilt der Spannung um  $90^\circ$  voraus ( $\varphi = -90^\circ$ ), da sich zuerst Ladung bewegen muss, bevor sich Spannung aufbauen kann. Spule: Strom hinkt der Spannung um  $90^\circ$  hinterher ( $\varphi = +90^\circ$ ), da die Spule eine Spannung induziert, die der Stromänderung entgegenwirkt.

Geben Sie zu jedem der drei Schaltelemente eine Ein-Satz-Erklärung für die Phasenverschiebung.

Die Erklärungen sind jeweils oben angegeben und beschreiben das Phasenverhalten jedes Elements.

Erklären Sie die Frequenzabhängigkeit der relativen Änderung der Amplituden!

Beim Kondensator sinkt der Blindwiderstand mit steigender Frequenz, dadurch wird der Strom größer. Bei der Spule steigt der Blindwiderstand mit der Frequenz, dadurch wird der Strom kleiner. Beim Widerstand bleibt die Amplitude unabhängig von  $f$  konstant.

### 3.3.2 Frequenzverhalten eines RC-Hoch- und Tiefpassfilter

Berechnen Sie das Übertragungsverhältnis  $|G|$  für jede eingestellte Frequenz, und tragen Sie die Ergebnisse gegen die Frequenzen auf.

Tiefpass: bei geringer frequenzen Übetragungsverhältniss gegen 1 bei höheren starke Dämpfung. Hochpass: bei höheren frequenzen Übetragungsverhältniss gegen 1 bei niedrigen starke Dämpfung.

Prüfen Sie, ob die auf die Frequenzen 0 und  $\infty$  extrapolierten Werte von  $|G|$  den theoretischen Erwartungen entsprechen.

Die Extrapolation entspricht den theoretischen Werten: Tiefpass blockiert hohe Frequenzen, Hochpass blockiert Gleichstrom.

Bestimmen Sie aus der Kurve die Grenzfrequenz, und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem aus den Herstellerdaten berechneten Wert.

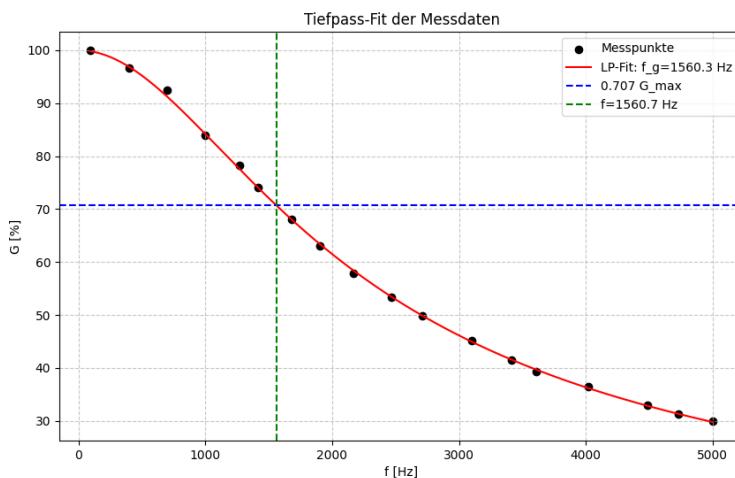
Die Grenzfrequenz liegt bei  $f_g = \frac{1}{2\pi RC}$ , an der Stelle  $|G| = 1/\sqrt{2} \approx 0.707$ .

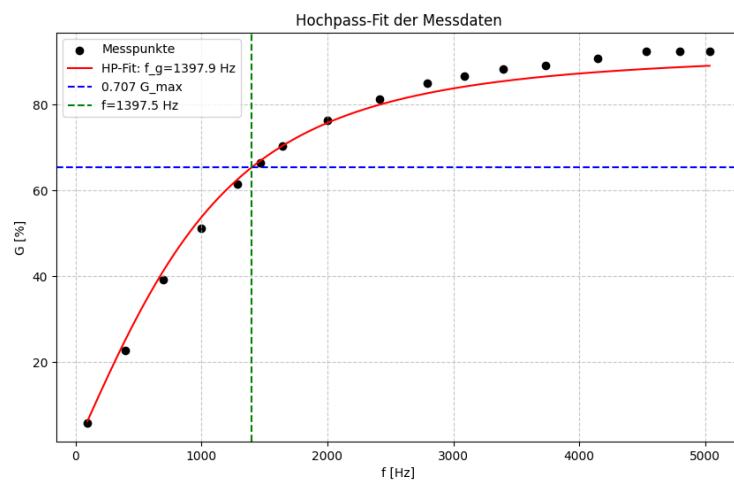
Resultierende Referenzgrößen:

- R WIDERSTAND 10 k $\Omega$
- C KONDENSATOR 10 nF
- ANHANGSKENNUNG ERSTER FIT 0080002332A
- ANHANGSKENNUNG ZUGEHÖRIGER CODE 0080002332AC
- ANHANGSKENNUNG ZWETIER FIT 0080002332B
- ANHANGSKENNUNG IN ANHANG 0080002332BC

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi 10 \text{ k}\Omega 10 \text{ nF}} = 1,59 \text{ kHz} \quad (46)$$

Der experimentelle Wert befinden sich in der selben Größenordnung wie der errechnete Wert.





### 3.3.3 Resonanzkurve eines Serienschwingkreis

Tragen Sie die Spannung gegen die Frequenz auf, und legen Sie durch die Messpunkte eine glatte Kurve.

Die Resonanzkurve zeigt ein Spannungsmaximum bei der Resonanzfrequenz 4448 Hz an.

Berechnen Sie die Resonanzfrequenz aus den Bauteildaten von Induktivität und Kapazität und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Messwert.

- |                   |         |
|-------------------|---------|
| • $C$ KONDENSATOR | 10 nF   |
| • $L$ SPULE       | 0,116 H |

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,116 \text{ H} \cdot 10 \text{ nF}}} = 4672 \text{ Hz} \quad (47)$$

$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ . Der Messwert (Experimentielles Endergebniss p.A. Fehlerfrei) 4448 Hz liegt nahe beim errechneten, Abweichungen entstanden durch parasitäre Widerstände und Messgenauigkeit.

Geben Sie eine Erklärung für das Absinken der Spannung im Resonanzfall.

Bei Resonanz heben sich die Blindwiderstände von Spule und Kondensator auf, sodass nur der Wirkwiderstand  $R$  übrig bleibt. Dadurch liegt die Spannung überwiegend über  $R$ , während die äußere Spannung trotz großem Strom klein bleibt.

### 3.3.4 Differenzier- und Integrierschaltung

**Erklären Sie den physikalischen Grund für den Unterschied zwischen den beobachteten und den theoretischen Ausgangsspannungen.**

Abweichungen entstehen durch endliche Zeitkonstanten, nichtideale Bauelemente und die Belastung durch Messgeräte.

**Gehen Sie dabei (beispielhaft) auch auf die Eingangsspannungen und Ihre Beobachtungen ein.**

Eingangssignale wie Rechteck, Sinus und Dreieck wurden wie erwartet transformiert, zeigten jedoch Abweichungen in Höhe und Form durch Dämpfung, Verzerrungen und Leckströme.

**Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München**  
**Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2**  
**Blockpraktikum vom 11. Aug. bis 9. Sept. 2025**

|  |                          |                         |                  |                  |                 |  |
|--|--------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------------|--|
| <b>Versuch:</b>  | <b>Magnetisches Feld</b> |                         |                  | <b>Gruppe:</b>   | <b>C2-5</b>     |  |
| <b>Vorname 1:</b>  | <b>Ahmed</b>             |                         |                  | <b>Name 1:</b>   | <b>Djelassi</b> |  |
| <b>Vorname 2:</b>  | -----                    |                         |                  | <b>Name 2:</b>   | -----           |  |
| Mit Abgabe der Auswertung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!  |                          |                         |                  |                  |                 |  |
| Die Abgabe ist vor dem Einreichen auf eine saubere äußere Form und Struktur zu kontrollieren.<br>Bei ungenügender äußerer Form erfolgt zunächst keine Korrektur! |                          |                         |                  |                  |                 | <b>OK?</b> <input checked="" type="checkbox"/> |
|  |                          |                         | <b>1. Abgabe</b> | <b>2. Abgabe</b> |                 |  |
| Alle Teilverweise vollständig ausgewertet?   |                          |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Wurden immer korrekte Formeln angegeben und eigene Werte eingesetzt?   |                          |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Wurde immer eine Fehlerrechnung durchgeführt?  |                          |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Sind Endergebnisse immer angegeben und korrekt gerundet?   |                          |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Wurde immer eine aussagekräftige Diskussion geführt?   |                          |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Wurden alle Diagramme mit geeignetem Maßstab und Titel eingeklebt?   |                          |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Enthalten die Diagramme alle Messwerte, Beschriftungen u. Konstruktionen?  |                          |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Sind ausgefülltes Deckblatt, Vorbereitung und Messprotokoll in der Abgabe enthalten  |                          |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Auswertung erhalten am:  |                          |                         |                  |                  |                 |  |
| Auswertung zurückgegeben am:   |                          |                         |                  |                  |                 |  |
| Nacharbeit notwendig bis:  |                          |                         |                  |                  | nicht möglich   |  |
| Abzug 0,2 Punkte pro Nacharbeit/angefangene 3 Tage Verspätung:   |                          |                         | -0,2             | -0,2             | -0,2            | -0,2   |
| Wird eine der obigen Fragen bei der ersten Abgabe mit Nein beantwortet ist eine Nacharbeit erforderlich!   |                          |                         |                  |                  |                 |  |
| <b>Punkte:</b>   |                          | <b>Datum, Abtestat:</b> |                  |                  |                 |  |

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

### **3.4.1 Eigenregie-Teilversuch: Smartphoneexperiment zur Bestimmung des Magnetfelds einer Leiterschleife (Durchführung vorab zu Hause)**

### 3.4.2 Sichtbarmachen der Magnetfeldlinien mit Hilfe von Eisenspänen

### 3.4.3 Drehmoment des Feldes auf eine stromdurchflossene Spule

### **3.4.4 Induktion durch Drehen einer Spule in einem Magnetfeld**

### 3.4.5 Induktion durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld

**Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München**  
**Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2**  
**Blockpraktikum vom 11. Aug. bis 9. Sept. 2025**

|  |   |                  |           |                 |   |      |
|--|---|------------------|-----------|-----------------|---|------|
| Versuch:   | <b>Ausgewählte Phänomene der Wärmelehre</b> |                  | Gruppe:   | <b>C2-5</b>     |   |      |
| Vorname 1:   | <b>Ahmed</b>                                |                  | Name 1:   | <b>Djelassi</b> |   |      |
| Vorname 2:   | -----                                       |                  | Name 2:   | -----           |   |      |
| Mit Abgabe der Auswertung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!  |   |                  |           |                 |   |      |
| Die Abgabe ist vor dem Einreichen auf eine saubere äußere Form und Struktur zu kontrollieren.<br>Bei ungenügender äußerer Form erfolgt zunächst keine Korrektur! |   |                  |           |                 | OK? <input checked="" type="checkbox"/> |      |
|  |   |                  | 1. Abgabe |                 | 2. Abgabe                               |      |
| Alle Teilversuche vollständig ausgewertet?   |   |                  | Ja        | Nein            | Ja                                      | Nein |
| Wurden immer korrekte Formeln angegeben und eigene Werte eingesetzt?   |   |                  | Ja        | Nein            | Ja                                      | Nein |
| Wurde immer eine Fehlerrechnung durchgeführt?  |   |                  | Ja        | Nein            | Ja                                      | Nein |
| Sind Endergebnisse immer angegeben und korrekt gerundet?   |   |                  | Ja        | Nein            | Ja                                      | Nein |
| Wurde immer eine aussagekräftige Diskussion geführt?   |   |                  | Ja        | Nein            | Ja                                      | Nein |
| Wurden alle Diagramme mit geeignetem Maßstab und Titel eingeklebt?   |   |                  | Ja        | Nein            | Ja                                      | Nein |
| Enthalten die Diagramme alle Messwerte, Beschriftungen u. Konstruktionen?  |   |                  | Ja        | Nein            | Ja                                      | Nein |
| Sind ausgefülltes Deckblatt, Vorbereitung und Messprotokoll in der Abgabe enthalten  |   |                  | Ja        | Nein            | Ja                                      | Nein |
| Auswertung erhalten am:  |   |                  |           |                 |   |      |
| Auswertung zurückgegeben am:   |   |                  |           |                 |   |      |
| Nacharbeit notwendig bis:  |   |                  |           |                 | nicht möglich                           |      |
| Abzug 0,2 Punkte pro Nacharbeit/angefangene 3 Tage Verspätung:   |   |                  | -0,2      | -0,2            | -0,2                                    | -0,2 |
| Wird eine der obigen Fragen bei der ersten Abgabe mit Nein beantwortet ist eine Nacharbeit erforderlich!   |   |                  |           |                 |   |      |
| Punkte:  |   | Datum, Abtestat: |           |                 |   |      |

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

**Vorbemerkung zu Teilversuch 1 und 2:** Für die Berechnungen empfiehlt sich die Verwendung eines Tabellenkalkulationsprogramms. Achten Sie bei Computerausdrucken auf die korrekte und vollständige Angabe von Einheiten und Bezeichnungen.

In diesem Versuch wird wegen der teilweise großen Messunsicherheiten besonderer Wert auf die Diskussion der Fehler gelegt. Überlegen Sie sich, welche Fehlereinflüsse vorhanden sind und schätzen Sie deren Einfluss auf das Ergebnis ab.

### 3.5.1 Erster Teilversuch: Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern

**Bestimmung der Wärmekapazitäten von Festkörpern – Bestimmen Sie die Mischtemperaturen (Al und Pb) und verwenden Sie dazu das im Theorienteil beschriebene Extrapolationsverfahren.**

Berechnen Sie die spezifischen Wärmekapazitäten von Al und Pb nach (5). Verwenden Sie dazu den Literaturwert der spezifischen Wärmekapazität von Wasser (in diesem Temperaturbereich  $4,18 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) und die Herstellerangaben für den Wasserwert des Kalorimeters ( $m_w = 80 \text{ g}$ ).

Führen Sie eine Fehlerbestimmung mit der Min-Max-Methode durch.

Berechnen Sie aus den spezifischen die molaren Wärmekapazitäten (molare Massen:  $M_{\text{Al}} = 27 \text{ g/mol}$ ,  $M_{\text{Pb}} = 207 \text{ g/mol}$ ). Vergleichen Sie die Ergebnisse mit dem theoretischen Wert nach der Regel von Dulong und Petit (allgemeine Gaskonstante:  $R = 8,31 \text{ J/mol K}$ ).

### 3.5.2 Zweiter Teilversuch: Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern

Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazität von Festkörpern – Berechnen Sie aus (5) die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten von Al und Pb (sofern gemessen). Die Temperatur von flüssigem Stickstoff hat den Wert  $T_p = 77 \text{ K}$  oder  $\Theta_p = -196^\circ\text{C}$ . Der Literaturwert für die spezifische Wärmekapazität von Wasser liegt hier bei  $4,20 \text{ J/g K}$  (Fehlerbestimmung wird nicht verlangt, aber die Angabe einer angemessenen Stellenzahl).

Berechnen Sie außerdem die Rate der pro Sekunde verdampfenden Menge Stickstoff, indem Sie eine Gerade durch die Messwerte legen (es ist nur die Steigung relevant). Falls Sie die Datennahme mit Hilfe des PCs gewählt hatten, überlegen Sie sich anhand der im Versuch erhaltenen Steigungen, welcher Wert für die Verdampfungsrate realistisch ist.

Berechnen Sie die Wärmekapazität nach (6), wobei Sie die gemessene Menge an verdampftem Stickstoff um die oben berechnete Verdampfungsrate korrigieren.

Vergleichen Sie die Ergebnisse beider Methoden miteinander und mit dem Ergebnis aus Teilversuch 1 und interpretieren Sie den Unterschied der Ergebnisse anhand von Abbildung 3. Worin liegen die größten systematischen Messunsicherheiten begründet?

### **3.5.3 Dritter Teilversuch: Gefriervorgang von Wasser**

**Gefrierkurve von reinem Wasser – Diskutieren Sie den Verlauf des Gefrierens von reinem Wasser.**

### 3.5.4 Vierter Teilversuch: Dampfdruckkurve von Wasser

Dampfdruckkurve von Wasser – Tragen Sie gemäß (7)  $\ln(p/\text{bar})$  gegen  $-1/T$  auf, und prüfen Sie, ob sich eine ansteigende Gerade ergibt.

Ermitteln Sie die Steigung der Geraden.

Bestimmen Sie aus der Steigung nach (7) die Bindungsenergie  $E_b$ , mit der Wassermoleküle an flüssiges Wasser gebunden sind. Geben Sie auch den molaren Wert an. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit Hilfe der wie üblich während der vorherigen Schritte bestimmten Messunsicherheiten mit den Literaturwerten.

### 3.5.5 Fünfter Teilversuch: Strahlung eines Schwarzen Strahlers

Strahlung eines Hohlraumstrahlers – Tragen Sie zur Überprüfung des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes die gemessenen Thermospannungen gegen  $T^4 - T_0^4$  auf.

Legen Sie durch die Messpunkte eine optimale Gerade.

Zeichnen Sie um die Gerade einen Fehlerstreifen.

Warum wurde  $T_0^4$  abgezogen?

**Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München**  
**Grundpraktikum in Experimentalphysik - Kurs P2**  
**Blockpraktikum vom 11. Aug. bis 9. Sept. 2025**

|  |                                  |                         |                  |                  |                 |  |
|--|----------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|-----------------|--|
| <b>Versuch:</b>  | <b>Thermodynamische Prozesse</b> |                         |                  | <b>Gruppe:</b>   | <b>C2-5</b>     |  |
| <b>Vorname 1:</b>  | <b>Ahmed</b>                     |                         |                  | <b>Name 1:</b>   | <b>Djelassi</b> |  |
| <b>Vorname 2:</b>  | -----                            |                         |                  | <b>Name 2:</b>   | -----           |  |
| Mit Abgabe der Auswertung wird bestätigt, dass diese eigenständig erstellt wurde!  |                                  |                         |                  |                  |                 |  |
| Die Abgabe ist vor dem Einreichen auf eine saubere äußere Form und Struktur zu kontrollieren.<br>Bei ungenügender äußerer Form erfolgt zunächst keine Korrektur! |                                  |                         |                  |                  |                 | <b>OK?</b> <input checked="" type="checkbox"/> |
|  |                                  |                         | <b>1. Abgabe</b> | <b>2. Abgabe</b> |                 |  |
| Alle Teilversuche vollständig ausgewertet?   |                                  |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Wurden immer korrekte Formeln angegeben und eigene Werte eingesetzt?   |                                  |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Wurde immer eine Fehlerrechnung durchgeführt?  |                                  |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Sind Endergebnisse immer angegeben und korrekt gerundet?   |                                  |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Wurde immer eine aussagekräftige Diskussion geführt?   |                                  |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Wurden alle Diagramme mit geeignetem Maßstab und Titel eingeklebt?   |                                  |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Enthalten die Diagramme alle Messwerte, Beschriftungen u. Konstruktionen?  |                                  |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Sind ausgefülltes Deckblatt, Vorbereitung und Messprotokoll in der Abgabe enthalten  |                                  |                         | Ja               | Nein             | Ja              | Nein   |
| Auswertung erhalten am:  |                                  |                         |                  |                  |                 |  |
| Auswertung zurückgegeben am:   |                                  |                         |                  |                  |                 |  |
| Nacharbeit notwendig bis:  |                                  |                         |                  |                  | nicht möglich   |  |
| Abzug 0,2 Punkte pro Nacharbeit/angefangene 3 Tage Verspätung:   |                                  |                         | -0,2             | -0,2             | -0,2            | -0,2   |
| Wird eine der obigen Fragen bei der ersten Abgabe mit Nein beantwortet ist eine Nacharbeit erforderlich!   |                                  |                         |                  |                  |                 |  |
| <b>Punkte:</b>   |                                  | <b>Datum, Abtestat:</b> |                  |                  |                 |  |

Bitte bewahren Sie Ihre Hefte nach dem Praktikum unbedingt auf.

### 3.6.1 Isotherme Expansion

Berechnen Sie die Drucke der abgesperrten Luftmenge gemäß Abbildung 12 und Abbildung 13 in der Einheit Millimeter Quecksilbersäule.

Tragen Sie zur Bestätigung des Gesetzes von Boyle und Mariotte aus den Ergebnissen der ersten Messreihe die Quotienten aus dem Atmosphärendruck und dem Druck im Gefäß gegen die Kolbenpositionen auf und prüfen Sie, ob die Messpunkte gemäß (5) auf einer Geraden liegen.

Der Kehrwert ihrer Steigung sollte nach (5) mit der Ablesung von  $x_A$  (7,2 cm) übereinstimmen. Eine Fehlerbestimmung wird hier nicht verlangt.

### 3.6.2 Isochore Zustandänderung

Tragen Sie zur Bestätigung des Gesetzes von Amontons die Quotienten aus den Drucken im Gefäß und dem Druck am Ende der Messreihe gegen die eingestellten Temperaturen

Prüfen Sie, ob die Messpunkte gemäß (9) auf einer Geraden liegen.

Bestimmen Sie die Steigung der Geraden, die nach (8) gleich dem isochoren Spannungs- koeffizienten ist, und aus ihr die absolute Eiswassertemperatur  $T_0$  (ohne Fehlerberechnung).

Vergleichen Sie das Ergebnis für  $T_0$  mit dem Literaturwert und diskutieren Sie wie allgemein beim Experimentieren üblich mögliche Fehlerquellen.

### 3.6.3 Isotherme Kompression

Auswertung des Kreisprozesses Auftragen der Werte

Erstellen Sie gemäß Abbildung 7 mit den Werten aus Teilversuch 1 und Teilversuch 3 ein  $p(V)$ -Diagramm (Millimeterpapier vom Format DIN A 3), das nur den Stirling-Prozess gemäß Abbildung 7 enthält. Die Ordinate muss dabei unbedingt mit dem Wert null beginnen!

Verbinden Sie die Messpunkte durch optimal angepasste Kurven (z. B. mit einem flexiblen Kurvenlineal zeichnen). Warum können die Kurven hier fast gerade sein?

Bestimmung von Wirkungsgraden

Bestimmen Sie die Fläche der dem Stirling-Prozess entsprechenden geschlossenen Kurve, z. B. durch Ausschneiden und Wegen des Millimeterpapiers, mit dem Planimeter oder durch intelligentes Auszählen der mm-Kästchen, ebenso die Fläche zwischen der oberen Isotherme und der Abszisse.

Bestimmen Sie den Quotient aus geleisteter Arbeit zu zugeführter Wärme, der dem Flächenverhältnis entspricht.

Vergleichen Sie den so erhaltenen Wirkungsgrad  $s_{exp}$  mit dem nach (23) berechneten theoretischen Wert.

### 3.6.4 Isobare Zustandänderung

Tragen Sie zur Bestätigung des Gesetzes von Gay-Lussac die Quotienten aus den Volumina im Gefäß und dem Volumen zu Beginn der Messreihe gegen die eingestellten Temperaturen auf und prüfen Sie, ob die Messpunkte gemäß (11) auf einer Geraden liegen.

Bestimmen Sie die Steigung der Geraden, daraus den isobaren Ausdehnungskoeffizienten und die absolute Eiswassertemperatur  $T_0$  (ohne Fehlerbestimmung).

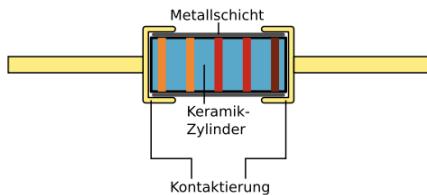
Vergleichen Sie das Ergebnis für  $T_0$  mit dem Literaturwert und dem Ergebnis von Teilversuch 2.

### 3.6.5 Adiabatische Zustandänderung

Berechnen Sie den Adiabatenexponenten nach (30), und bestimmen Sie seinen Fehler mit Hilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung.

Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem theoretischen Wert.

## 4 Anhänge



**Versuchs Abbildung 21 [V-ESK-VA21]:**  
Aufbau eines Keramik-Widerstands.

Und zugehörige Ablesetabelle.

| Farbe        | 1. Ring | 2. Ring | 3. Ring | Multiplikator   | Toleranz     |
|--------------|---------|---------|---------|---|--------------|
| Silber       |         |         |         | $\times 0.01 \Omega$                                  | $\pm 10\%$   |
| Gold         |         |         |         | $\times 0.1 \Omega$                                   | $\pm 5\%$    |
| Schwarz      | 0       | 0       | 0       | $\times 1 \Omega$                                     |              |
| Braun        | 1       | 1       | 1       | $\times 10 \Omega$                                    | $\pm 1\%$    |
| Rot          | 2       | 2       | 2       | $\times 100 \Omega$                                   | $\pm 2\%$    |
| Orange       | 3       | 3       | 3       | $\times 1000 \Omega \text{ (} 1k\Omega \text{)}$      |              |
| Gelb         | 4       | 4       | 4       | $\times 10000 \Omega \text{ (} 10k\Omega \text{)}$    |              |
| Grün         | 5       | 5       | 5       | $\times 100000 \Omega \text{ (} 100k\Omega \text{)}$  | $\pm 0.5\%$  |
| Blau         | 6       | 6       | 6       | $\times 1000000 \Omega \text{ (} 1M\Omega \text{)}$   | $\pm 0.25\%$ |
| Lila         | 7       | 7       | 7       | $\times 10000000 \Omega \text{ (} 10M\Omega \text{)}$ | $\pm 0.1\%$  |
| Grau         | 8       | 8       | 8       |   | $\pm 0.05\%$ |
| Schwarz-Weiß | 9       | 9       | 9       |   |              |

```

#0080002242c zu 0080002242
#Zweites Physikalisches Grundpraktikum

import cv2
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# -----
# Bild in Graustufen einlesen
# -----
img = cv2.imread('0080002242.png', cv2.IMREAD_GRAYSCALE)

# optional: glätten
blur = cv2.GaussianBlur(img, (5,5), 0)

# Kanten mit Canny
edges = cv2.Canny(blur, 50, 150)

# -----
# Vorschau: Original Graubild + Kanten
# -----
plt.figure(figsize=(10,4))

plt.subplot(1,2,1)
plt.imshow(img, cmap='gray')
plt.title("Graustufenbild")
plt.axis("off")

plt.subplot(1,2,2)
plt.imshow(edges, cmap='gray')
plt.title("Kanten (Canny)")
plt.axis("off")

plt.show()

# Koordinaten der Kantenpunkte
y_coords, x_coords = np.where(edges > 0)

```

#Ahmed Djelassi

```

#0080002332Ac zu 0080002332a
#Zweites Physikalisches Grundpraktikum

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# Tiefpass-Daten
f = np.array([95, 399, 699, 999, 1271, 1414, 1682, 1902, 2166, 2469, 2709,
3098, 3412, 3608, 4018, 4488, 4730, 4999])
G = np.array([100, 96.6, 92.4, 84.0, 78.2, 74.1, 68.1, 63.0, 57.8, 53.4,
49.9, 45.2, 41.5, 39.3, 36.4, 33.0, 31.3, 30.0])

# Normieren auf G_max = 1
G_norm = G / np.max(G)

# Tiefpass-Funktion
def LP_func(f, f_g):
    return 1 / np.sqrt(1 + (f/f_g)**2)

# Curve fit
popt, pcov = curve_fit(LP_func, f, G_norm, p0=[1500]) # Startwert f_g ~
1.5 kHz
f_g_fit = popt[0]
print(f"Gefittete Grenzfrequenz f_g = {f_g_fit:.2f} Hz")

# Gesuchte Frequenz für G = 0.707 * G_max
G_target = 0.707
# f_target direkt aus der Gleichung: G = 1 / sqrt(1 + (f/f_g)^2)
x_target = f_g_fit * np.sqrt((1/G_target)**2) - 1

# Interpolation für glatten Plot
f_fit = np.linspace(f[0], f[-1], 1000)
G_fit = LP_func(f_fit, f_g_fit) * np.max(G)

# -----
# Plot
# -----
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.scatter(f, G, color='black', label='Messpunkte')
plt.plot(f_fit, G_fit, 'r-', label=f'LP-Fit: f_g={f_g_fit:.1f} Hz')
plt.axhline(np.max(G)*0.707, color='blue', linestyle='--', label='0.707
G_max')
plt.axvline(x=x_target, color="green", linestyle="--",
label=f"f={x_target:.1f} Hz")
plt.xlabel('f [Hz]')
plt.ylabel('G [%]')
plt.title('Tiefpass-Fit der Messdaten')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.show()

```

```

#0080002332Bc zu 0080002332b
#Zweites Physikalisches Grundpraktikum

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# Hochpass-Daten
f = np.array([95, 398, 699, 997, 1287, 1471, 1640, 1999, 2414, 2792, 3086,
3398, 3731, 4146, 4531, 4799, 5035])
G = np.array([5.8, 22.7, 39.1, 51.2, 61.4, 66.4, 70.4, 76.3, 81.2, 84.9,
86.6, 88.2, 89.1, 90.8, 92.4, 92.4, 92.4])

# Normieren auf G_max = 1
G_norm = G / np.max(G)

# Hochpass-Funktion
def HP_func(f, f_g):
    return 1 / np.sqrt(1 + (f_g/f)**2)

# Curve fit
popt, pcov = curve_fit(HP_func, f, G_norm, p0=[1000]) # Startwert f_g ~ 1
kHz
f_g_fit = popt[0]
print(f"Gefittete Grenzfrequenz f_g = {f_g_fit:.2f} Hz")

# Gesuchte Frequenz für G = 0.707 * G_max
G_target = 0.707
# aus der Gleichung: G = 1 / sqrt(1 + (f_g/f)^2)
x_target = f_g_fit / np.sqrt((1/G_target)**2) - 1

# Interpolation für glatten Plot
f_fit = np.linspace(f[0], f[-1], 1000)
G_fit = HP_func(f_fit, f_g_fit) * np.max(G)

# -----
# Plot
# -----
plt.figure(figsize=(10,6))
plt.scatter(f, G, color='black', label='Messpunkte')
plt.plot(f_fit, G_fit, 'r-', label=f'HP-Fit: f_g={f_g_fit:.1f} Hz')
plt.axhline(np.max(G)*0.707, color='blue', linestyle='--', label='0.707 G_max')
plt.axvline(x=x_target, color="green", linestyle="--",
label=f"f={x_target:.1f} Hz")
plt.xlabel('f [Hz]')
plt.ylabel('G [%]')
plt.title('Hochpass-Fit der Messdaten')
plt.grid(True, which='both', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.legend()
plt.show()

```

## 5 Formelsammlungen

Ohmische Gesetz

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{??-esk-1})$$

Spezifischer Widerstand

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{??-esk-2})$$

Wirkspannung Ohmischer Leiter

$$U = RI \quad (\text{??-esk-3})$$

Verbraucher, geregelter Strom

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0} \quad (\text{??-esk-4})$$

Anfangs und Messstrom über den Anfangs und Messwiderstand

$$U = \frac{R}{R_0} U_0 \quad (\text{??-esk-5})$$

Spannungsanpassung aufgrund einer Spannungabhängigkeit an der Messvorrichtung

$$U = U_q - U_i \quad (\text{??-esk-6})$$

Spannungsanpassung aufgrund des Klemminnenwiderstands

$$U = U_q - R_i I \quad (\text{??-esk-7})$$

über einen Variablen Strom (Widerstand *times* Spannung) kompensierte Spannung.

$$U_0 = \frac{R}{R_N} U_N \quad (\text{??-esk-8})$$

Kirchhoffscher Knoten Satz, Stromerhaltung in einem Knoten

$$\sum_{in} I = \sum_{out} I \quad (\text{??-esk-9})$$

Kirchhoffscher Maschen Satz, Spannungserhaltung in einer geschlossenen Masche.

$$\sum_M U = 0 \quad (\text{??-esk-10})$$

Widerstandsverhalten in einer Parallelschaltung

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R1} + \frac{U}{R2} = \frac{U}{R_i} \quad (\text{??-esk-11})$$

Widerstandsverhalten in einer Reihenschaltung

$$RI = R_1 I + R_2 I = R_i I \quad (\text{??-esk-12})$$

Anfangs und Messtrom über eine variable Skala

$$U = \frac{x}{x_0} U_0 \quad (\text{??-esk-13})$$

## Komplexe Darstellung des harmonischen Wechselstroms

$$\tilde{U} = \hat{U} \cos(\omega t) \quad (\text{??-osz-1})$$

Spannungseffektiv wert über Wurzel des Mittelwertes der Quadrate

$$U_{\text{eff}} = \sqrt{\langle U^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U(t)^2 dt} = \frac{\hat{U}}{2} \quad (\text{??-osz-2})$$

Phasenverschiebung über Periodendauer und Zeitabschnitt.

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 360^\circ \frac{\Delta t}{T} \quad (\text{??-osz-3})$$

Phasenverschiebung über Spannungsdifferenz.

$$\sin\varphi = \pm \frac{|\Delta x|}{2\hat{x}} \quad (\text{??-osz-4})$$

Erweiterung des Ohmischen Gesetzes um eine Kondensator

$$RI + U_C = U_0 \quad (\text{??-osz-5})$$

Kondensator Spannung

$$U_C = \frac{Q}{C} \quad (\text{??-osz-6})$$

LDG eines Kondensators

$$d_t U_C = -\frac{1}{RC} (U_C - U_0) \quad (\text{??-osz-7})$$

Kondensator Spannung beim Aufladevorgang

$$U_C = U_0 [1 - \exp(-\frac{t}{RC})] \quad (\text{??-osz-8})$$

Kondensator Spannung beim Entladevorgang

$$U_C = U_0 [\exp(-\frac{t}{RC})] \quad (\text{??-osz-9})$$

Auflade und Enlade Relaxationszeit (ete-Teil)

$$\tau = RC \quad (\text{??-osz-10})$$

Phasenverschobener harmonischer Wechselstrom

$$\tilde{I}(t) = \hat{I} \cos(\omega t - \varphi) \quad (\text{??-vpo-1})$$

Komplexe Darstellung des harmonischen Stroms

$$\tilde{I}(t) = \hat{I} \cos(\omega t - \varphi) + \hat{I} i \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{??-vpo-2})$$

Komplexer Widerstand über Spannung strom verhältniss

$$Z = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} \exp\{i\varphi\} \quad (\text{??-vpo-3})$$

## Komplexer Widerstand über Impedanz Betrag

$$Z = |Z| \exp\{i\varphi\} \quad (\text{??-vpo-4})$$

## Impedanz Betrag und Zusammenhang mit effektiv Werten

$$|Z| = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} = |Z| = \frac{U_{texteff}}{I_{texteff}} \quad (\text{??-vpo-5})$$

## Kartesische Darstellung der Impedanz in der Komplexen Ebene

$$Z = R + iX \quad (\text{??-vpo-6})$$

## Impedanz über Pythagoreischen Zusammenhang

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (\text{??-vpo-7})$$

## Phasenverschiebung über Real und Imaginärteil

$$\tan \varphi = \frac{X}{R} \quad (\text{??-vpo-8})$$

## Impedanz eines Kondensators

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C} = -\frac{i}{\omega C} \quad (\text{??-vpo-9})$$

## Phasenverschiebung Kondensator

$$\varphi_C = -90^\circ \quad (\text{??-vpo-10})$$

## Impedanz einer Spule

$$Z_L = i\omega L = \omega L \exp(i\frac{\pi}{2}) \quad (\text{??-vpo-11})$$

## Phasenverschiebung einer Spule

$$\varphi_L = 90^\circ \quad (\text{??-vpo-12})$$

## Impedanz eines Ohmischen Leiters

$$Z_R = R \quad (\text{??-vpo-13})$$

## Kirchhoffscher Impedanz satz für Serienschaltungen

$$Z = \sum_{i=1}^n Z_i \quad (\text{??-vpo-14})$$

## Kirchhoffscher Impedanz satz für Parallelschaltungen

$$\frac{1}{Z} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \quad (\text{??-vpo-15})$$

## Gesamtimpedanz einer Parallelschaltung

$$Z_{RL} = \frac{iR\omega L}{R + i\omega L} \quad (\text{??-vpo-16})$$

## Zum Verlauf der Ortskurve der Parallelschaltungsimpedanz

$$Z_{RL} = \frac{R}{2} - \frac{R}{2} \frac{1 - i\omega L/R}{1 + i\omega L/R} \quad (\text{??-vpo-17})$$

## Impedanz einer Schaltung nach VPOVA9

$$Z = Z_L + Z_C = i\omega L - \frac{i}{\omega C} = i\left(\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}\right) \quad (\text{??-vpo-18})$$

## Resonanzkreisfrequenz nach VPOVA9

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{??-vpo-19})$$

## Resonanzfrequenz nach VPOVA9

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{??-vpo-20})$$

## Impedanz einer Schaltung nach VPOVA10

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L + \frac{1}{\omega C})^2} \quad (\text{??-vpo-21})$$

## Phasenverschiebung nach VPOVA10

$$\tan \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (\text{??-vpo-22})$$

## Erweiteretes Ohmischs Gesetz für Vierpole

$$U_k = Z_{km} I_k \quad (\text{??-vpo-23})$$

## Betrag des Spannungsamplituden Verhältnis

$$|G| = \frac{\hat{U}_1}{\hat{U}_2} \quad (\text{??-vpo-24})$$

## Übertragungsverhältniss der Amplituden mit Phasenverschiebung

$$G = \frac{\hat{U}_1}{\hat{U}_2} \exp(-i\varphi) \quad (\text{??-vpo-25})$$

## Pegelmaß als logarithmisches Leistungsverhältnis in dB

$$a = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{??-vpo-26})$$

## Pegelmaß aus $P \propto U^2$ in dB

$$a = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad (\text{??-vpo-27})$$

## Übertragungsverhältnis eines RC Tiefpassfilters

$$G = \frac{\tilde{U}_1}{\tilde{U}_2} = \frac{\frac{1}{i\omega C}}{R + i\omega C} = \frac{1}{i\omega RC + 1} = \frac{1 - i\omega RC}{(\omega RC)^2 + 1} \quad (\text{??-vpo-28})$$

Betrag von G für RC-Tiefpass

$$|G| = \frac{1}{(\omega RC)^2 + 1} \quad (\text{??-vpo-29})$$

Phasenverschiebung für RC-Tiefpass

$$\tan \varphi = -\frac{\text{Im} G}{\text{Re} G} = \omega RC \quad (\text{??-vpo-30})$$

Grenzkreisfrequenz ( der  $2^{-\frac{1}{2}}$  teil des Maximum) [Halbierte Leistung]

$$\omega_g = \frac{1}{RC} \quad (\text{??-vpo-31})$$

Elektromagnetisches Kraft Gesetz von H. A. Lorentz

$$\vec{F}_{em} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{??-mag-1})$$

Magnetfeld Kraft nach Lorentz

$$\vec{F}_m = Q(\vec{v} \times \vec{B}) = QvB \sin \alpha \quad (\text{??-mag-2})$$

Durchflutungsgesetz von Ampere

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I \quad (\text{??-mag-3})$$

Magentische Feldkonstante des Vakuums

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \quad (\text{??-mag-4})$$

Gesetz von Biot und Savart  $\vec{r}_i$ : Ortsvektor

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{\vec{r}_i - \vec{r}}{|\vec{r}_i - \vec{r}|^3} \times d\vec{r}_i \quad (\text{??-mag-5})$$

Produzierend eines N-fachen B-feld entlang eines Kreisform

$$B(x) = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2}{(x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} NI \quad (\text{??-mag-6})$$

Feld der Helmholtzspule (zwei parallele Drahtringe) 2% Genauigkeit in Theoretischen innenzylinder

$$B = 2 \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2}{(\frac{R^2}{2^2} + R^2)^{\frac{3}{2}}} NI = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{NI}{R} = \mu_0 \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{NI}{R} \quad (\text{??-mag-7})$$

Zur Divergenz eines Magnetfeldes

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{??-mag-8})$$

Magentisch Kraft auf einen Strom

$$\vec{F} = I(\vec{s} \times \vec{B}) \quad (\text{??-mag-9})$$

Magnetisch Induziertes Drehmoment

$$\vec{M} = \vec{d} \times \vec{F}_m = a \vec{F}_m \sin \alpha = a I a B \sin \alpha = I A B \sin \alpha = \vec{m} \times \vec{B} \quad (\text{??-mag-10})$$

## Magnetisches Dipolmoment $\mathbf{m}$

$$M = NIAB \sin \alpha = mB \sin \alpha \quad (\text{??-mag-11})$$

## Arbeit einer rotierenden quadratischen Leiterschleife

$$W = F_m 2a = QvB \sin(\omega t) 2a = Q\omega \frac{a}{2} B \sin(\omega t) = QU_i \quad (\text{??-mag-12})$$

## Entstehende (Induzierte) Spannung im Magnetischen Feld

$$U_i = BA\omega \sin(\omega t) = NBA\omega \sin(\omega t) = -N\vec{B}d_t \vec{A} \quad (\text{??-mag-13})$$

## Messspannung eines Magnetfeldes

$$\hat{U}_i = NBA\omega \quad (\text{??-mag-14})$$

## Magnetfeld Flussdichte

$$B = \frac{\hat{U}_i}{NA\omega} \quad (\text{??-mag-15})$$

## Feldlinienwirbel entlang eines geradlinig Strom

$$\Delta \vec{B} = \vec{B}(t + \Delta t) - \vec{B}_t \quad (\text{??-mag-16})$$

## Sinusförmiger feldverlauf mit kreisfrequenz und zeitabhängigkeit

$$B = \hat{B} \sin \omega t \quad (\text{??-mag-17})$$

## Spannung eines B felds

$$U_{i,t} = -NA\hat{B}d_t \sin(\omega t) \quad (\text{??-mag-18})$$

## Spannungamplitude zum ortspunkt $\propto \omega$

$$\hat{U} = NA\hat{B}\omega \quad (\text{??-mag-19})$$

## Allgemeines Induktionsgesetz

$$U_i = -Nd_t(\vec{B} \cdot \vec{A}) = -Nd_t\Phi \quad (\text{??-mag-20})$$

## Flussdichte mal Fläche : Magnetische Fluss

$$\Phi = \int \vec{B} d\vec{A} \quad (\text{??-mag-21})$$

## Flussdichte in einem Ringfeld

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (\text{??-mag-22})$$

## Magnetische Fluss Rotierende leitere schleife

$$\Phi(t) = N B A \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (\text{??-mag-23})$$

## Faradayische Induktionsspannung

$$\mathcal{E}(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = NBA\omega \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (\text{??-mag-24})$$

## EMF : Electromotiveforce

$$\mathcal{E} = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{\ell} \quad (\text{??-mag-25})$$

Integral zur arbeit entlang eines Leiters

$$W = \int_C \vec{F}_L \cdot d\vec{\ell} = q \int_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{\ell}. \quad (\text{??-mag-26})$$

EMF über Arbeit und Ladung

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} = \int_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{\ell}. \quad (\text{??-mag-27})$$

Faradays Gesetz für Ruhende Leiter

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{??-mag-28})$$

Feldlinien form

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{??-mag-29})$$

Temperatur über Wärmekapazität

$$\Delta T = C^{-1} Q \quad (\text{??-apw-1})$$

Wärme über Temperaturänderung

$$Q = C \Delta T \quad (\text{??-apw-2})$$

Mittelwert der Wärmekapazität über Reziproke Temperaturdifferenz

$$\bar{c} = \int_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)^{-1} c(T) dT \quad (\text{??-apw-3})$$

Wärmekapazität über Wasserwert

$$C = C_W + C_G = c_w (m_w + m_w^*) \quad (\text{??-apw-4})$$

Wärmekapazität der Messung

$$c_s = \frac{c_w (m_w + m_w^*) (\theta_m - \theta_k)}{m_s (\theta_s - \theta_m)} \quad (\text{??-apw-5})$$

Verdampfungswärme  $Q_V$

$$Q = Q_V m_V = M_x c_x (T_1 - T_2) \quad (\text{??-apw-6})$$

Drucklogarithmus

$$\ln(p) - \ln(p_{end}) = E_b(k_B T)^{-1} \quad (\text{??-apw-7})$$

Boltzmannverteilung zur Druckbestimmung

$$p = p_{end} e^{-E_b(k_B T)^{-1}} \quad (\text{??-apw-8})$$

Plancksche Strahlungsformel

$$M_{\lambda,T} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (\text{??-apw-9})$$

## Die totale spezifische Ausstrahlung

$$M_s(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda,T} d\lambda \quad (\text{??-apw-10})$$

## Stephan-Boltzmann-Gesetz

$$M_s(T) = \sigma T^4 \quad (\text{??-apw-11})$$

## Stephan-Boltzmann-Gesetz mit Emission und Absorbtion

$$\Phi(T) = \epsilon A \sigma T^4 \quad (\text{??-apw-12})$$

## Wärmefluss über Parameter

$$d\dot{Q} = -(\nabla\theta)\hat{n}dA = -\partial_n\theta dA \quad (\text{??-apw-13})$$

## Temperatur über Verteilung

$$T(t, x) = 2^{-1}(T_1 - T_2) \operatorname{erf}(x(\sqrt{4at})^{-1}) + 2^{-1}(T_1 - T_2) \quad (\text{??-apw-14})$$

## Gaußverteilung

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\varphi^2} d\varphi \quad (\text{??-apw-15})$$

## Temperaturleitfähigkeit

$$a = \frac{\lambda}{cp} \quad (\text{??-apw-16})$$

## Druck an einer Gefäßwand mit einem Idealen Gas mit intrisischer Kinetischer Energie

$$\frac{1}{3} \frac{Nm}{V} \bar{v^2} = p \quad (\text{??-tep-1})$$

## Thermische, Kinetische Energie

$$\frac{1}{2} m \bar{v^2} = \frac{f}{2} k_B T \quad (\text{??-tep-2})$$

## Ideales Gas gesetz : Id. G.

$$pV = nRT = Nk_T \quad (\text{??-tep-3})$$

## Ideales Gas gesetz mit Konstanter Temperatur

$$pV = nRT|_T \quad (\text{??-tep-4})$$

## Anfangs- druck und -volumen Verhältniss nach Id. G. mit Konstanter Temperatur

$$\frac{p_0}{p} = \frac{V}{V_0} \quad (\text{??-tep-5})$$

## Isochore zustandänderung (bei Konsatnen Volumen)

$$p = \frac{nR}{V_0} T \propto |_V T \quad (\text{??-tep-6})$$

## Kelvin in Celsius umrechnung mit $T_0 = 273,15 K$ , $T = T_0 + \theta(48)$ Anfangs-temperatur und -druck Verhältniss nach einem Isochoren Id. G.

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0} \quad (\text{??-tep-8})$$

**Gesetz von Amontons**

$$p = p_0(1 + \beta\theta) \quad (\text{??-tep-9})$$

**Isochore Spannungskoeffizient**

$$\beta = \frac{1}{p_0} [\partial_T p]_V \quad (\text{??-tep-10})$$

**Anfangs- temperatur und -volumen Verhältniss nach einem Isobaren Id. G.**

$$V = \frac{nR}{p_0} T \alpha|_p T \quad (\text{??-tep-11})$$

**Erwärmung eines Volumen in Celsius**

$$\frac{V}{V_0} = 1 + \frac{\theta}{T_0} \quad (\text{??-tep-12})$$

**Gesetzt von Gay-Lussac**

$$V = V_0(1 + \alpha\theta) \quad (\text{??-tep-13})$$

**Isobarer Ausdehnungskoeffizient**

$$\alpha = \frac{1}{V_0} [\partial_T V]_p \quad (\text{??-tep-14})$$

**Innere Energie**

$$U = N \frac{f}{2} k_B T = n \frac{f}{2} RT \quad (\text{??-tep-15})$$

**Erster Hauptsatz, Energie erhaltung.**

$$\Delta U = Q + W \quad (\text{??-tep-16})$$

**Hubarbeit**

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p(T, V) dV \quad (\text{??-tep-17})$$

**Wärme bei Konstanter Zustandsgröße x**

$$Q_x = \int_{T_1}^{T_2} C_x(T) dT \quad (\text{??-tep-18})$$

**Molare Wärmekapazität bei Konsatner Zustandsgröße x**

$$C_x^m = \frac{C_x}{n} \quad (\text{??-tep-19})$$

**Isotherme Hubarbeit**

$$W_{IsoT} = - \int_{V_A}^{V_B} p(T, V) dV = - \int_{V_A}^{V_B} nRT \frac{dV}{V} = -nRT \ln\left[\frac{V_B}{V_A}\right] = -p_A V_A \ln\left[\frac{V_B}{V_A}\right] \quad (\text{??-tep-20})$$

**Isochore Energiebilanz**

$$\Delta U = n \frac{f}{2} R (T_1 - T_2) = Q_{Iso,C} \quad (\text{??-tep-21})$$

**Wärme kapzität einer Isochoren Zustandsänderung nach Freiheitsgraden.**

$$C_V^m = \frac{f}{2} R \quad (\text{??-tep-22})$$

## Isochore Innereenergie

$$U = nC_V^m T \quad (\text{??-tep-23})$$

## Isobare Energiebilanz

$$Q_{Iso_B} = nC_V^m(T_2 - T_1) + [p(V_A - V_E) = nR(T_2 - T_1)] = n(C_V^m + R)(T_2 - T_1) \quad (\text{??-tep-24})$$

## Molare Wärmekapazität bei Konstantem Druck

$$C_p^m = C_V^m + R \quad (\text{??-tep-25})$$

## Carnotwirkungsgrad

$$\eta = \frac{|W|}{|Q|} \quad (\text{??-tep-26})$$

## Wirkungsgrad Reversibler Kreisprozesse

$$\eta_s = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{??-tep-27})$$

## Erster Hauptsatz in Differenzieller Form

$$d_V T = -\frac{p}{nC_V^m}|_{\delta Q=0} \quad (\text{??-tep-28})$$

## Poissonsche Gleichung für adiabatische Zustandsänderungen

$$\frac{p}{p_0} \left[ \frac{V}{V_0} \right]^{\frac{C_p^m}{C_V^m}} = 1 \quad (\text{??-tep-29})$$

## Adiabatenexponent

$$\gamma = \frac{C_p^m}{C_V^m} = \frac{f+2}{f} \quad (\text{??-tep-30})$$