

# Physikalisches Grundpraktikum für Physiker/innen

## Teil I

### Gleichstrom



WWW-Adresse Grundpraktikum Physik: <http://grundpraktikum.physik.uni-saarland.de/>

**Kontaktadressen der Praktikumsleiter:**

Dr. Manfred Deicher  
Zimmer: 1.11, Gebäude E 2.6  
e-mail: [manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de](mailto:manfred.deicher@tech-phys.uni-sb.de)  
Telefon: 0681/302-58198

Dr. Patrick Huber  
Zimmer: 3.23, Gebäude E2.6  
e-mail: [p.huber@physik.uni-saarland.de](mailto:p.huber@physik.uni-saarland.de)  
Telefon: 0681/302-3944

## 1. Stoffgebiet

- Stationäre Ströme und Spannungen
- Elektrische Netzwerke
- Kirchhoff'sche Regeln
- Spannungsquellen
- Gleichstrommeßwerke
- Ersatzschaltbilder
- Elektrische Leistung
- Energieumwandlung

## 2. Literatur

- Gerthsen-C. ,Meschede, D.  
Physik  
21. Auflage, Springer-Verlag, 2002
- Bergmann-Schäfer  
Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2, Elektromagnetismus  
8. Auflage, W. de Gruyter-Verlag, 1999
- CASSY Anleitung ((Auszug) Leybold-Didaktik)

### 3. Fragen

1. Wie sind Strom und Spannung definiert? Man leite das Ohmsche Gesetz aus der differentiellen Form  $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$  her.
2. Wie ändert sich ein metallischer Widerstand, wie ein Halbleiterwiderstand mit der Temperatur? Wie sieht die Kennlinie einer Glühbirne, eines NTC's oder PTC's aus?
3. Welche Wirkungen des elektrischen Stromes können zur Messung der Stromstärke herangezogen werden und wie sind diese Größen mit der Stromstärke verknüpft? Wie nennt man die entsprechenden Meßgeräte?
4. Welche Anforderungen werden an ein ideales Strommeßgerät bezüglich seines Innenwiderstandes gestellt? Erläutern Sie anhand einer Schaltskizze, wie ein Strommeßgerät in den Schaltkreis eingefügt wird. Überlegen Sie sich wie die obigen Anforderungen durch das Power/Sensor Cassys erfüllt wird.
5. Welche Anforderungen werden an einen idealen Spannungsmesser bezüglich seines Innenwiderstandes gestellt? Welche Spannungsmessgeräte kennen Sie und welches von diesen kommt dem idealen am nächsten? Wie wird die Spannung an einem Widerstand gemessen (Schematische Skizze!)? Wie sieht das Ganze beim Power/ Sensor Cassy aus?
6. Was versteht man unter elektrischer Arbeit und elektrischer Leistung? Wie sind diese mit Strom, Spannung und Widerstand verknüpft? Wie läßt sich elektrische Energie in Wärme, Licht, mechanische Energie und in chemische Energie umwandeln (Beispiele)?
7. Wie kann man Gleichspannung erzeugen? Welche Gleichspannungsquellen kennen Sie?
8. Was versteht man unter dem inneren Widerstand einer Spannungsquelle, z.B. eines galvanischen Elementes?
9. Man formuliere die Knoten- und die Maschenregel (1. und 2. Kirchhoff'sches Gesetz) und gebe je ein Beispiel an.
10. Wie groß muß man den Widerstand  $R_a$  eines Verbrauchers wählen, um aus einer Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand  $R_i$ 
  - a) die größtmögliche Spannung,
  - b) den größtmöglichen Strom,
  - c) die größtmögliche Leistung zu entnehmen?

## 4. Grundlagen

Wird an einem Stoff ein elektrisches Feld  $\vec{E}$  angelegt, fließt ein Strom

$$(1) \quad \vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} ,$$

wobei  $j$  die Stromdichte und  $\sigma$  die Leitfähigkeit sind.

Die Leitfähigkeit  $\sigma$  hängt mikroskopisch betrachtet von der Ladung  $e$  der freien Ladungsträger, deren Anzahl  $n$  sowie deren Beweglichkeit  $\mu$  im Kristallgitter ab:

$$(2) \quad \sigma = e \cdot n \cdot \mu .$$

In einem Metall sind freie Ladungsträger stets vorhanden; in einem Halbleiter werden sie durch thermische Energie erzeugt, d.h. die Leitfähigkeit eines Halbleiters wächst stark mit der Temperatur. Aus obiger Gleichung läßt sich leicht das bekannte Ohmsche Gesetz für einen homogenen Leiter, dessen Widerstand  $R$  nicht von der Spannung abhängt, herleiten:

$$(3) \quad U = R \cdot I ,$$

wobei  $I$  der elektrische Strom durch den Leiter und  $U$  der Spannungsabfall längs des Leiters sind.

Sind Spannung und Strom nicht von der Zeit abhängig, spricht man von Gleichspannung. Die im Widerstand erzeugte elektrische Leistung ist

$$(4) \quad P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} .$$

Diese wird im Widerstand  $R$  komplett in Wärme umgewandelt.

Elektrische Energie hat den Vorteil, daß sie sich mit hohem Wirkungsgrad in andere Energiearten umwandeln läßt und einfach und umweltfreundlich zu transportieren ist. Ein entscheidender Nachteil ist die geringe Speichermöglichkeit (Akku, Pumpspeicherwerk). Nachstehend sind die wichtigsten Energieumwandlungs-möglichkeiten aufgeführt:

Umwandlung von	mechan. Energie	Wärme	Licht	chemischer Energie
mittels	Dynamo, Mikrofon, Reibungselektrizität	Seebeck-Eff. (indirekt: KKW, Kernreaktor)	Photozelle, (Solarzelle)	Galvanisches Element, Brennstoffzelle

in elektrische Energie.

Umwandlung von elektrischer. Energie

mittels	Elektromotor, Lautsprecher	Joule'sche Wärme, Peltiereffekt	Leuchtstoffröhre (indirekt: Glühbirne)	Elektrolyse
in	mechan. Energie	Wärme	Licht	chemische Energie

Die Messung eines elektrischen Stromes geschieht durch geeignete Ausnutzung seiner Wirkungen, z.B. durch Messung einer bei Elektrolyse abgeschiedenen Stoffmenge, durch Messung der Temperaturerhöhung infolge Joule'scher Wärme (Thermokreuz, Hitzdraht-Ampèremeter), durch seine magnetischen Wirkungen (Drehspulinstrumente) oder durch elektronische Verstärkung und anschließende Digitalisierung der an einem Präzisionswiderstand abfallenden Spannung. Bei der letztgenannten Methode verwendet man ein (leicht abzulesendes) Digitalmultimeter mit einem Operationsverstärker (sehr hoher Eingangswiderstand von 100 M $\Omega$  und mehr) und einem Analog-Digital-Wandler (hohe Auflösung und Geschwindigkeit siehe hierzu das Kapitel über AD/DA Wandler). Zur Funktion eines Drehspulmeßwerks sei auf die Literatur bzw. auf den Versuch "Magnetismus" (Teil: Galvanometer) verwiesen. Wir wollen uns im folgenden auf die Schaltung von Meßinstrumenten in Stromkreisen beschränken. Das Meßwerk eines Drehspulinstruments liefert einen dem hindurchfließenden Strom proportionalen Ausschlag. Der Maximalausschlag ist die Grundkonstante  $I_m$ . Als Amperemeter muß das Instrument direkt in den Stromkreis geschaltet werden. Es ist zu berücksichtigen, daß jedes Meßwerk einen von Null verschiedenen Innenwiderstand (Grundkonstante  $R_i$ ) besitzt und somit selbst den zu messenden Strom beeinflusst.

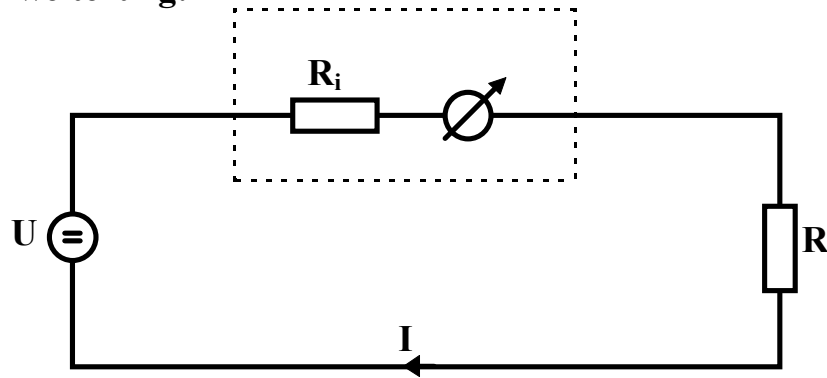
**Meßbereichserweiterung:**

Abb. 1: Stromkreis mit Meßwerk

Durch Änderung des Innenwiderstandes läßt sich der Meßbereich des Ampèremeters erweitern. Schaltet man parallel zum Ampèremeter nochmals den Widerstand  $R_p = R_i$ , so fließt durch das Meßwerk nur noch der halbe Strom; d.h. mit dem Parallelwiderstand  $R_i$  kann man maximal die Stromstärke  $2 \cdot I_m$  messen.

Allgemein ergibt sich für eine Erweiterung des Meßbereichs um den Faktor  $n$  für den Parallelwiderstand:

$$(5) \quad R_p = \frac{1}{n-1} \cdot R_i \quad (\text{Strommessung-Meßbereichserweiterung}).$$

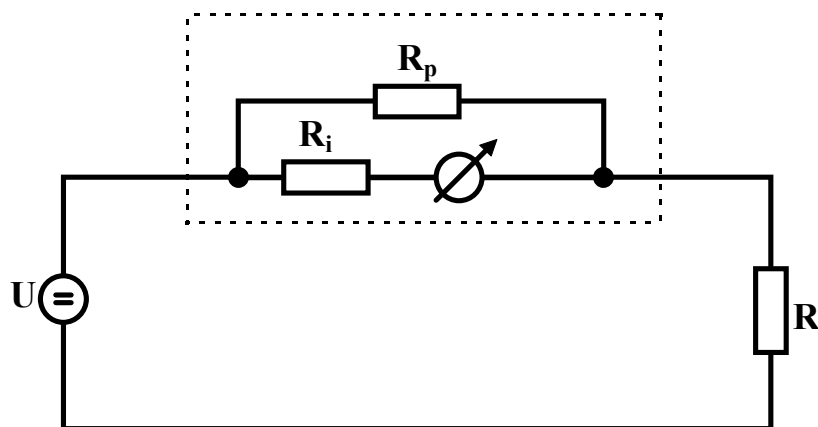


Abb. 2: Meßbereichserweiterung des Amperemeters

Als Voltmeter wird das Instrument in den Nebenschluß gelegt (Abb. 3).

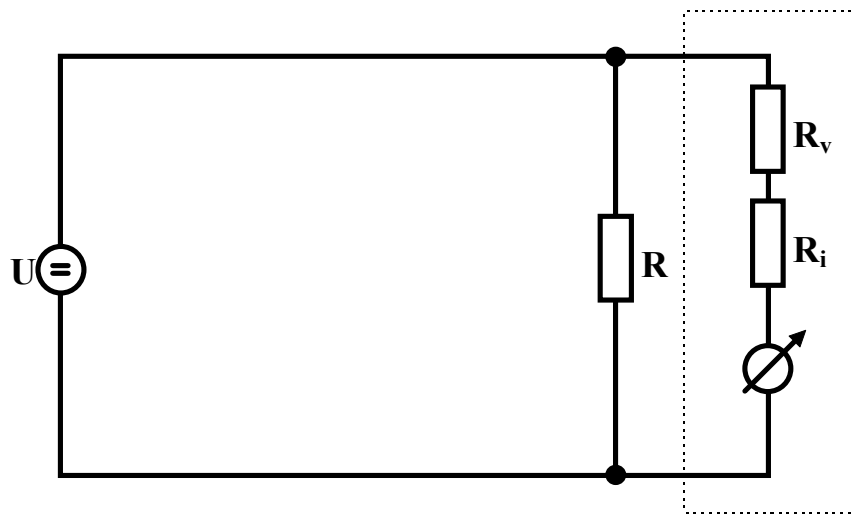


Abb. 3: Meßbereichserweiterung des Voltmeters

Die Maximalspannung, die das Meßwerk messen kann, ergibt sich aus den Grundkonstanten zu

$$(6) \quad U_m = R_i \cdot I_m .$$

Da jetzt ein Strom durch den Nebenschluß fließt, werden die Verhältnisse im Hauptkreis ebenfalls verändert. Man beachte, daß bei Messung von Strom und Spannung mit Drehspulinstrumenten die zu messenden Ströme und Spannungen beeinflusst werden. Um bei Messung von Strom und Spannung die Verhältnisse im Kreis nicht wesentlich zu verändern, muß der Innenwiderstand des Amperemeters klein gegen die Kreiswiderstände sein. Der Innenwiderstand des Voltmeters soll andererseits sehr groß sein.

Schaltet man beim Voltmeter den Widerstand  $R_v$  in Serie zu, so wird der Meßbereich um den Faktor

$$(7) \quad n = \frac{R_v + R_i}{R_i} \quad (\text{Spannungsmessung-Meßbereichserweiterung})$$

größer.

Mißt man mit einem Voltmeter die Klemmenspannung  $U_k$  einer Batterie, so ist folgendes zu beachten: Durch den inneren Widerstand  $R_B$  der Batterie und den Widerstand  $R_i$  des Voltmeters entsteht ein Spannungsteiler.

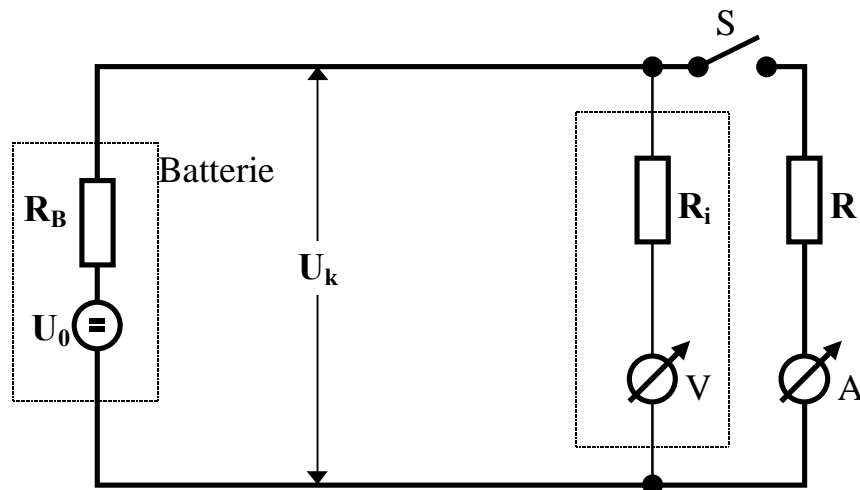


Abb. 4: Klemmenspannung  $U_k$  und Leerlaufspannung  $U_0$  einer Batterie

Dann ist

$$(8) \quad U_0 = U_k + I \cdot R_B ,$$

d.h. die Klemmenspannung  $U_k = U_0 - I \cdot R_B$  ist kleiner als die Leerlaufspannung  $U_0$  (auch Ursprung, früher elektromotorische Kraft (EMK) genannt). Ist aber  $R_i$  sehr groß, so wird der Strom vernachlässigbar klein und  $U_k \approx U_0$ .

Schließt man in Abb. 4 den Schalter  $S$  und mißt mit dem Ampèremeter den Strom, der über  $R$  fließt, so ist der innere Widerstand  $R_B$  bestimmt durch

$$(9) \quad R_B = \frac{U_0 - U_k}{I} .$$

Betrachtet man die Leistungsaufnahme im Verbraucher  $R$  ( $P_{el} = U_k \cdot I$ ), so stellt man fest, daß bei

$$(10) \quad R = R_i$$

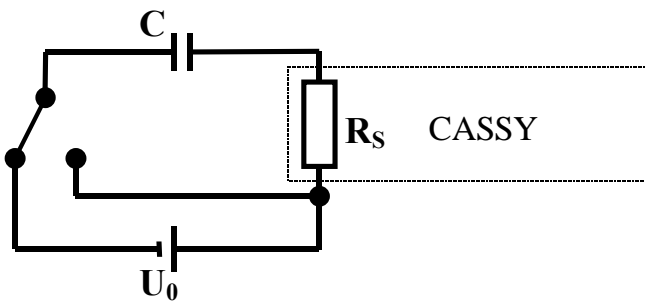
die Batterie die maximale Leistung abgibt (Leistungs-Anpassung).



## Einschaltvorgänge

Viele elektronische Schaltungen benötigen nach dem Einschalten eine kurze Zeit, bis sie einen stationären Zustand erreicht haben. Diese Einschalt- bzw. Einschwingzeiten sind auf die Eingangsimpedanz (ohmscher, kapazitiver und induktiver Widerstand) der Schaltung zurückzuführen.

Wie sich nun eine Kapazität verhält, wenn man eine Spannung anlegt, soll im folgenden an einem einfachen Beispiel untersucht werden. Dazu betrachte man folgende Schaltung:



$$C = 2.69 \mu\text{F}$$

$$U_0 = 39.4 \text{ V}$$

$R_S$  = Eingangswiderstand  
des CASSY's

Abb. 5: Meßaufbau zur Bestimmung des Ein- und Ausschaltvorgangs

Nach der Maschenregel gilt

$$(11) \quad U_0 = \frac{Q(t)}{C} + R_S \cdot I(t) .$$

Daraus folgt

$$(12) \quad I(t) = I(0) \cdot e^{-t/R_S C} .$$

Leiten Sie die Gleichungen (11) und (12) her.

Für die Spannung am Widerstand  $R_S$  ergibt sich dann:

$$(13) \quad U_{R_S}(t) = U_{R_S}(0) \cdot e^{-t/R_S C} .$$

Welche Spannung  $U_C(t)$  am Kondensator ergibt sich daraus?

## 5. Versuchsdurchführung

Leiten Sie die Gleichungen (5), (7) und (10) her.

### Aufgabe 1: Kennlinien

Bestimmen Sie die Kennlinie eines ohmschen Widerstands, einer Glühlampe, eines NTC sowie eines PTC Widerstands.

### Aufgabe 2: Innenwiderstand einer Spannungsquelle

#### Aufgabe 2.1:

a) Man bestimme den Innenwiderstand und die Leerlaufspannung  $U_0$  der Batterie ohne Zusatzwiderstand für verschiedene Lastwiderstände  $R = 10, 20, 30, 40, 50, 60 \Omega$ . Messen Sie die Klemmenspannung  $U_k$  an  $R$ , berechnen Sie daraus den Strom  $I$  und tragen Sie die Meßpunkte in einem  $U_k=U_k(I)$ -Diagramm auf. Aus der Steigung und dem y-Achsenabschnitt der Bestgeraden erhält man nach Gleichung (8)  $U_0$  und  $R_B$ .

b) Bestimmen Sie ebenso den Innenwiderstand und die Leerlaufspannung der Batterie mit Zusatzwiderstand.

c) Wie groß sind die Kurzschlußströme der Batterie für a) und b)?

**Vorsicht:** Drücken Sie den Taster stets nur kurzzeitig, um die Batterie nicht zu sehr zu belasten!

#### Aufgabe 2.2:

Die Anpassung eines Verbrauchers  $R$  an die Spannungsquelle ist experimentell zu bestimmen: Es wird die Batterie mit dem größten Innenwiderstand (Aufgabe 2.1b)) benutzt. Der Lastwiderstand  $R$  wird zwischen  $10 \text{ k}\Omega$  und  $0 \Omega$  variiert.

Man zeichne die Funktion  $P = P(R)$ .

**Aufgabe 3: Einschaltvorgänge****Aufgabe 3.1:**

Mit Hilfe des Cassy's, welches so geschaltet wird, daß sein Eingangswiderstand den Widerstand  $R_S$  darstellt, realisiere man die in Abb. 5 angegebene Schaltung und nehme die  $U_{R_S}(t)$ -Kennlinie für den Lade- und Entladevorgang auf.

**Aufgabe 3.2:**

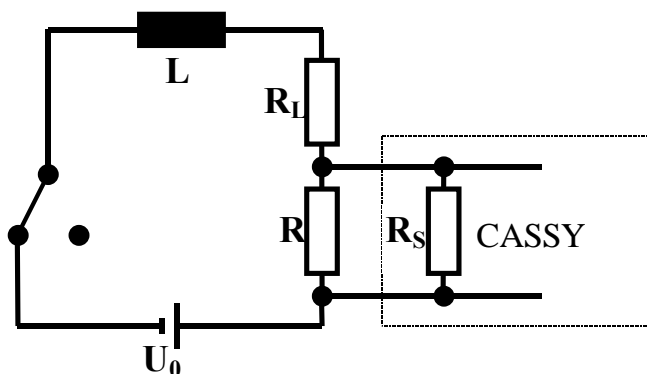
Aus Gleichung (13) folgt:

$$(14) \quad \ln U_{R_S}(t) = -\frac{1}{R_S C} \cdot t + \ln U_{R_S}(0)$$

Man trage  $\ln U_{R_S}(t)$  gegen  $t$  auf und bestimme aus der Steigung den Eingangswiderstand  $R_S$  des Cassy's und vergleiche diesen mit der technischen Spezifikation. Aus dem Achsenabschnitt berechne man mittels Interpolation den Einschaltstrom  $I(0) = U_{R_S}(0) / R_S$ .

**Aufgabe 3.3:**

Die folgende Abbildung stellt eine zu Abb. 5 analoge Schaltung für einen Einschaltvorgang mit einer Induktivität  $L$  dar.



$L$  = Induktivität  
 $R_L = 280 \Omega$  (Ohmscher  
 Widerstand  
 der Spule)  
 $R = 20 \Omega$  (Vorwiderstand)

Abb. 7: Messung des Einschaltvorgangs (Induktivität)

Aus Aufgabe 3.2 geht hervor, daß  $R_S \gg R$  ist; daher kann  $R_S$  vernachlässigt werden. Berechnen Sie aus der Maschenregel den Verlauf der Spannung  $U_R(t)$  für den Einschaltvorgang!

Hinweis:  $R_L + R = R'$  bildet einen Spannungsteiler. Man berechne zuerst  $U_R(t)$  und mit Hilfe des Teilverhältnisses dann  $U_R(t)$ .

Wie groß muß die Induktivität  $L$  sein, wenn  $U_R(t)$  nach 2 Sekunden auf den Wert  $U_R(t = 2s) = U_R(0) \cdot (1 - 1/e)$  angestiegen ist?

**Aufgabe 3.4:**

Skizzieren Sie den Verlauf der Spannungen  $U_L(t)$  bzw.  $U_C(t)$  an der Spule bzw. am Kondensator als Funktion des Rechtecksignals in Abb. 8.

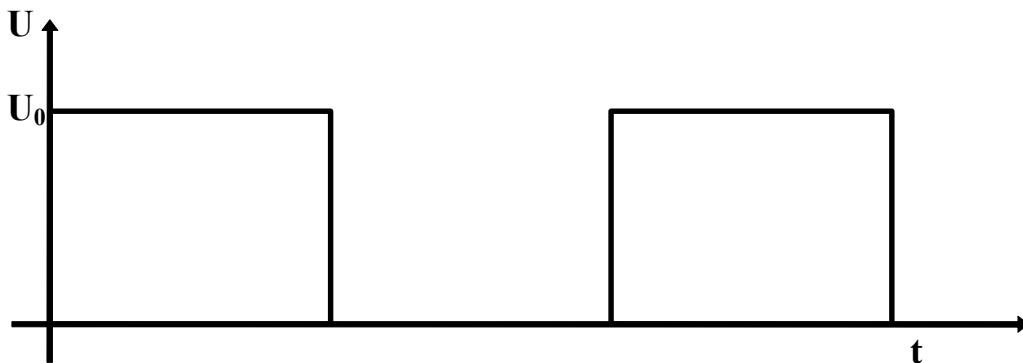


Abb. 8: An RC- bzw. RL-Serienschaltung angelegtes Rechtecksignal

Was stellt man fest, wenn man  $U_C(t)$  bzw.  $U_L(t)$  und die jeweils dazugehörige Funktion  $U_R(t)$  addiert (grafisch) ?

**6. Versuchsausstattung**

- 1 Batterie mit umschaltbarem Innenwiderstand und Taster
- 1 Widerstandsdekade 0 . . 111  $\Omega$
- 1 Widerstandsdekade oder 1 veränderlicher Widerstand 0 . . . 10 k $\Omega$
- 1 Schaltbrett mit 3 Widerständen
- 1 Schaltbrett mit Netzteil, Kondensator und Umschalter
- CASSY Lab