

Datum: 04.04.2025

Super-Cap



Einleitung

Der Super-Cap-Versuch soll die Leistungen von Super-Kondensatoren demonstrieren. Der Super-Cap ist nach wenigen Sekunden aufgeladen und lässt eine LED über Tage leuchten.

Material

- Super-Cap-Box
- Labornetzgerät (z. B. Basetech BT-305)
- 2x Laborkabel (kurz)
- Netzkabel

Aufbau

Zum Laden des Super-Caps muss die Super-Cap-Box über die beiden 4mm-Buchsen mit dem Labornetzgerät verbunden werden. Der Schalter auf der Oberseite wird auf „laden“ gestellt. Die Spannung am Labornetzteil muss $U \geq 4.0 \text{ V}$ sein, damit der verbaute Spannungsregler einwandfrei arbeitet. (Die Spannung bitte nicht übermäßig hoch wählen, damit nicht unnötig viel elektrische Energie als Wärme am Spannungsregler abfällt). Der Strom kann bis $I = 5 \text{ A}$ betragen.

Nach kurzer Zeit bricht der Strom aus dem Labornetzgerät stark ein. Der Kondensator ist dann aufgeladen.

Wenn das Labornetzgerät abgeklemmt wird, fließt ein Strom von ca. $I = 7 \text{ mA}$ aus dem Kondensator. Daher sollte direkt nach dem Laden der Schalter auf „leuchten“ gestellt werden, damit dieser Entladestrom ausbleibt.

Schaltplan der Super-Cap-Box

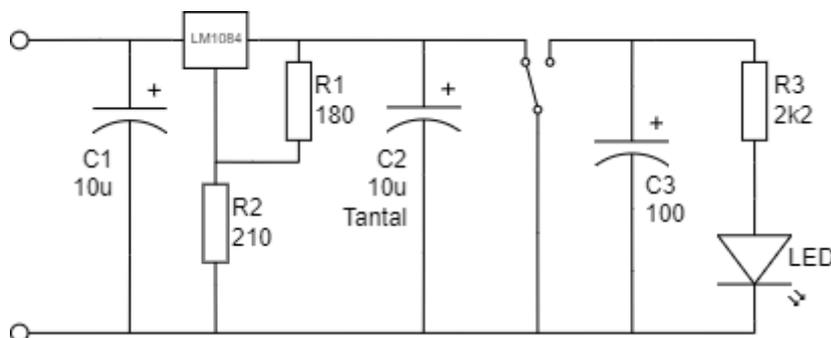


Abbildung 1: Schaltplan der Super-Cap-Box

Der Spannungsregler benötigt die Widerstände R1 und R2 sowie die Kondensatoren C1 und C2 zum Betrieb. Das Verhältnis der Widerstände bestimmt die Ausgangsspannung nach:

$$U_{\text{out}} = 1.25 \text{ V} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

Der Widerstand R1 sollte eher 181 Ω betragen anstatt des Nominalwerts 180 Ω, damit am Ausgang des Spannungsreglers $U_{\text{out}} = 2.7 \text{ V}$ liegen. Der Kondensator C3 (Hersteller-Nummer: SCCV60B107SRB) ist das Herzstück des Versuchs. Der Widerstand R3 ist der Vorwiderstand der LED und begrenzt den Strom durch die LED solange über dem Kondensator noch eine, für die LED zu hohe Spannung, anliegt.

Anmerkungen

Kennlinie der LED 8034G3C-CSE-B

Die Kennlinie der LED wurde mit dem Keithley 2450 SourceMeter gemessen. Es zeigt sich, dass die Kennlinie nicht gut durch die Shockley-Gleichung beschrieben wird. Die folgende Funktion ist die Anpassung an die Messdaten:

$$I(U) = \frac{1}{\tanh\left(\frac{45.5199}{U^{2.69212}}\right)} - 0.999995$$

(1)

Die Funktion ist eine sehr gute Anpassung an die gemessenen Daten (s. Abbildung 2).

Anmerkung: Die Funktion $f(x) = \coth(1/x)$ hat einige wünschenswerte Eigenschaften. Sie ist bei $x = 0$ ungleich Null und ihr Verlauf ist dort recht flach. Für sehr große x steigt die Funktion praktisch linear an. (Der Tipp für diese Funktion stammt von K. Buth (katrin.buth@uni-hamburg.de)).

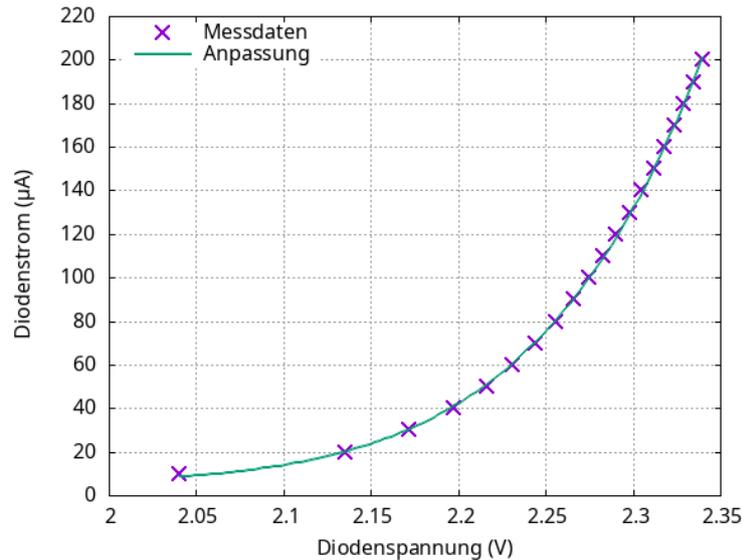


Abbildung 2: Kennlinie der grünen LED 8034G3C-CSE-B. Vergleich von Messung and Anpassung

Simulation des zeitlichen Verlaufs der Kondensatorentladung

Der Strom I durch die LED ist die eigentlich interessante Größe. Er ist ein Maß für die Leuchtkraft der LED. Natürlich spielt es eine große Rolle, welche Spannung noch über dem Kondensator anliegt, damit der Spannungsabfall an der LED bzw. dem Vorwiderstand bestimmt werden kann. Dies ist nicht trivial, da sich der Äquivalentwiderstand der LED mit der an ihr liegenden Spannung ändert. Jedoch lassen sich alle Größen aus bekannten Parametern (Vorwiderstand, Kapazität des Kondensators) und dem Strom I durch die LED ermitteln.

In Abbildung 3 sind in violetter Farbe Messdaten von acht Tagen Messung und in grüner Farbe die dazugehörige Simulation zu sehen. Der Verlauf beider Graphen ist recht ähnlich. Die Messdaten liegen allerdings immer unterhalb der simulierten Daten. Dies mag vielfältige Gründe haben. Beispielsweise wurde in der Simulation die Selbstentladung des Kondensators gar nicht berücksichtigt. Weiterhin wurden in der Simulation die Nennwerte des Kondensators $C = 100 \text{ F}$ und des Widerstands $R = 2200 \Omega$ angenommen, so, dass eine Annäherung der beiden Graphen durchaus möglich ist.

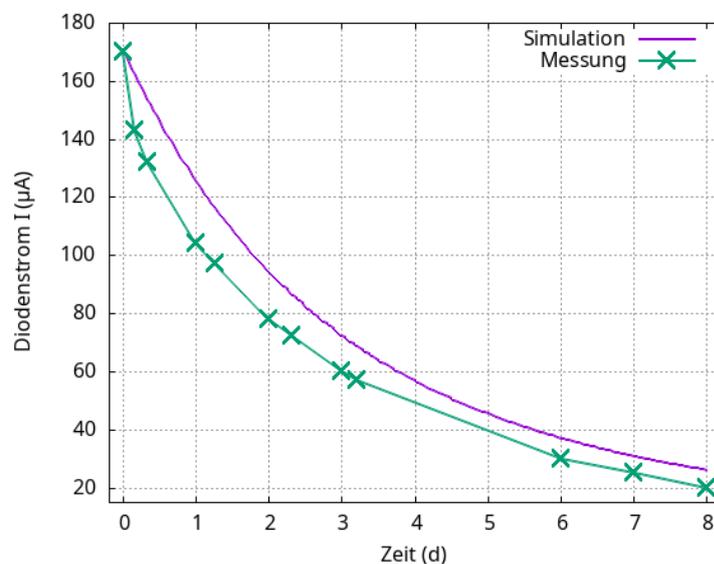


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf des Stroms in der Super-Cap-Box: Vergleich von Messung und Simulation

Zur Simulation der elektrischen Größen wurde ein Jupyter-Notebook verwendet. Das Notebook ist in der Datei: LED2.ipynb. Dies kann online (ohne Installation von Programmen) unter:

<https://jupyter.org/try-jupyter/lab/>

benutzt werden.

Im Kern wird die Spannung U_{LED} gesucht, bei der der Strom durch die LED und der Strom durch den Widerstand gleich groß sind. Der Strom I_{LED} wird aus der Anpassung der Kennlinie (1) gewonnen, und der Strom I_R aus der Differenz der Kondensatorspannung U_C und der Spannung U_{LED} . Ist U_{LED} gefunden, können sämtliche Größen berechnet werden. Anschließend wird die Spannung über dem Kondensator U_C nach einer Zeitspanne Δt bestimmt. Der Widerstand im RC-Glied setzt sich aus dem Vorwiderstand R und dem Äquivalenzwiderstand R_{LED} zusammen. Dieser wächst mit der Zeit, da der Strom bei geringen Diodenspannungen stark unterdrückt ist. Mit der neu errechneten Kondensatorspannung U_C wird wieder die Spannung U_{LED} ermittelt.

Während der Zeitspanne Δt wird der Gesamtwiderstand also als konstant angesehen. Dies bedeutet, dass der Gesamtwiderstand tendenziell geringer angenommen wird, als er zu jedem Zeitpunkt tatsächlich ist. Dies führt zu einer eher zu stärkeren Entladung des Kondensators und einem zu großen Stromfluss.

Um dies zu untersuchen, wurde die Spannung über den Kondensator U_C über 48h mit den Schrittweiten $\Delta t = 0,5h$; $1h$; und $2h$ simuliert. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, gibt es im Grunde keinen merklichen Einfluss. Im Inset erkennt man einen leichten Abfall der Kondensatorspannung mit der Schrittweite. Solange also die Schrittweite Δt „vernünftig“ gewählt wird, ist die Simulation unempfindlich gegenüber einem willkürlich gewählten Δt .

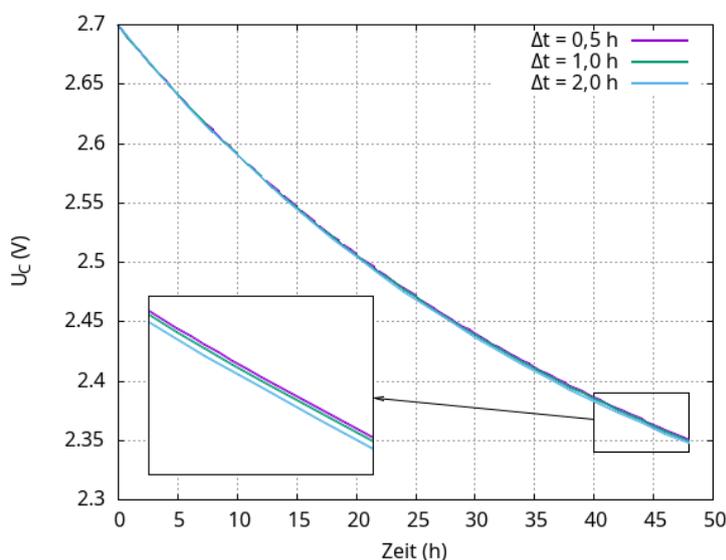


Abbildung 4: Entladung des Kondensators über die Zeit bei verschiedenen Schrittweiten

Vergleich der simulierten Strom-Spannungs-Kennlinie mit realen Messdaten

Um sicher zu gehen, dass die Unterschiede der Graphen in Abbildung 3 wirklich auf realen Unzulänglichkeiten und nicht auf Fehler im Jupyter-Programm zurück zu führen sind, wurde die

Schaltung nachgebaut. Anstatt des Kondensators wurde eine Stromquelle benutzt und die, für den vorgegebenen Strom, notwendige Spannung ermittelt. Wie in Abbildung 5 gut zu sehen ist, gibt es keine nennenswerten Abweichungen.

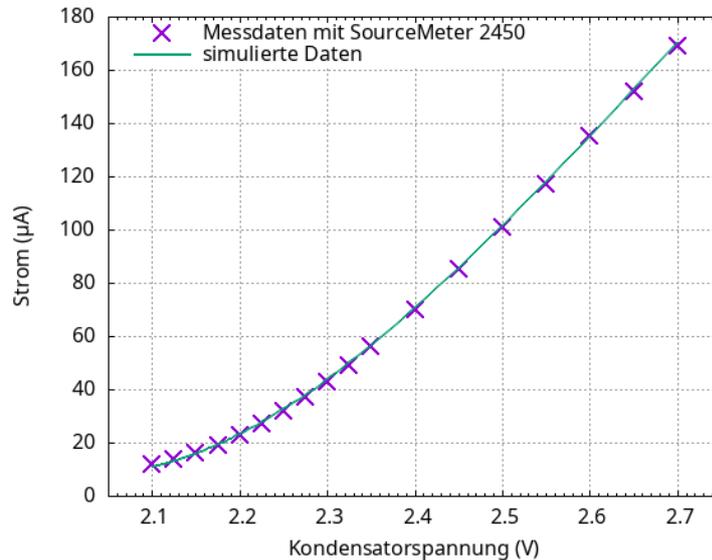


Abbildung 5: Vergleich der Kennlinie der Simulation mit Messdaten

Schaltungssimulation

Um überhaupt ein Gefühl für die Ströme und Spannungen in diesem Versuch zu bekommen, kann auf der Internet-Seite Falstad:

<https://www.falstad.com/circuit/circuitjs.html>

die Datei circuitjs-20250217-152047.txt hochgeladen werden. Dort kann die Simulation rechts oben gestartet und auf die Schalter geklickt werden.

RC-Glied mit Diode

Ein Kondensator lässt sich nur sehr schwer vollständig über eine Diode entladen, da eine Diode unterhalb einer endlichen Schwellspannung U_S sperrt. In ungünstigen Fällen lässt sich deswegen ein großer Teil der gespeicherten Ladung nicht nutzen. Für die folgenden Überlegungen wird der Einfachheit halber angenommen, dass eine Diode „unendlich“ gut oberhalb einer gewissen Schwellenspannung U_S leitet und unterhalb von U_S den Stromfluss perfekt unterdrückt.

Ziel ist eine möglichst lange Entladezeit bis die Kondensatorspannung unter die Schwellspannung U_S sinkt.

Für die Entladung eines Kondensators mit der Kapazität C über einen Widerstand R gilt:

$$U(t) = U_0 \cdot \exp(-t/\tau)$$

mit:

- $U(t)$: Spannung über dem Kondensator nach der Entladezeit t

- U_0 : Anfangsspannung über dem Kondensator
- $\tau = RC$: Die Zeitkonstante

Sei nun noch $U(t) = U_S$, dann ergibt sich daraus die Entladezeit:

$$t_1 = \tau \cdot \ln\left(\frac{U_0}{U_S}\right) \quad (2)$$

Im Folgenden wird untersucht, ob sich durch eine Serienschaltung bzw. Parallelschaltung von zwei gleichen Kondensatoren eine längere Entladezeit erreichen lässt.

Für eine Parallelschaltung zweier Kondensatoren mit jeweils der Kapazität C beträgt die Gesamtkapazität $C_{\text{parallel}} = 2C$ und es ergibt sich die Entladezeit

$$t_2 = 2\tau \ln\left(\frac{U_0}{U_S}\right) = 2RC \ln\left(\frac{U_0}{U_S}\right)$$

Für eine Serienschaltung zweier Kondensatoren mit jeweils der Kapazität C beträgt die Gesamtkapazität $C_{\text{serie}} = C/2$ und für die vollständige Aufladung wird die Spannung $2U_0$ benötigt. Die Entladezeit beträgt somit

$$t_3 = \frac{1}{2}\tau \ln\left(\frac{2U_0}{U_S}\right)$$

Ergebnisse

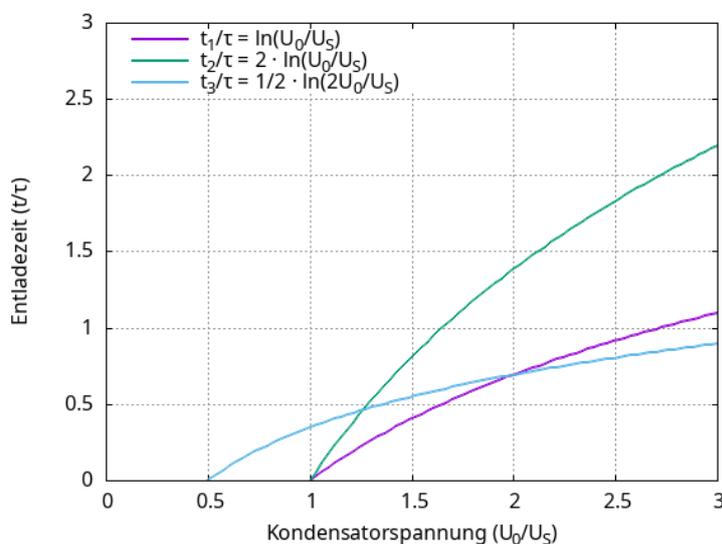


Abbildung 6: Entladezeiten für einen Kondensator, einer Serienschaltung und einer Parallelschaltung zweier Kondensatoren, wenn die Kondensatorspannung oberhalb einer Schwellspannung ist.

In Abbildung 6 sind die Entladezeiten der drei oben beschriebenen Fälle aufgetragen. Auf der Ordinate ist die Entladezeit in Einheiten der Zeitkonstante τ und auf der Abszisse die Spannung über den Kondensatoren in Einheiten der angenommenen Schwellspannung über Diode aufgetragen. Deutlich ist zu sehen, dass die Entladezeit t_2 der Parallelschaltung immer oberhalb der Entladezeit t_1 des einzelnen Kondensators liegt. Für Kondensatorspannungen $0.5U_S \leq U_0 \leq U_S$ ist eine Entladung überhaupt nur mit einer Serienschaltung zu erreichen. Im Bereich

von $U_S \leq U_0 \leq 2U_S$ hängen die längste Entladezeit der verschiedenen Schaltungen sehr von dem Verhältnis U_0/U_S ab. In Tabelle 1 ist zusammengefasst, unter welchen Verhältnissen U_0/U_S die Entladezeiten der Dauer nach sortiert sind.

Tabelle 1: Entladezeiten verschiedener Kondensatoranordnungen

Spannungsbereich (V)	Entladezeiten
0 – 1.26	$t_3 > t_2 > t_1$
1.26 – 2.0	$t_2 > t_3 > t_1$
ab 2.0	$t_2 > t_1 > t_3$

Diese Ergebnisse werden nun auf den Super-Cap-Versuch angewandt. Sei $U_0 = 2,7\text{ V}$ und $U_S = 2,0\text{ V}$, dann ist das Verhältnis $U_0/U_S = 1.35$. Damit würde eine Parallelschaltung die längste Entladungszeit liefern. Wie man aber in Abbildung 2 sehen kann, ist die angenommene Schwellspannung $U_S = 2,0\text{ V}$ durchaus nicht fest. Wenn nun $U_S = 2.15\text{ V}$ angenommen würde, was auch eine vertretbare Schwellspannung ist, dann wäre eine Serienschaltung zu bevorzugen. Man erkennt aber auch, dass in jedem der Fälle, keine großen Sprünge in der Entladungszeit zu erwarten sind.