

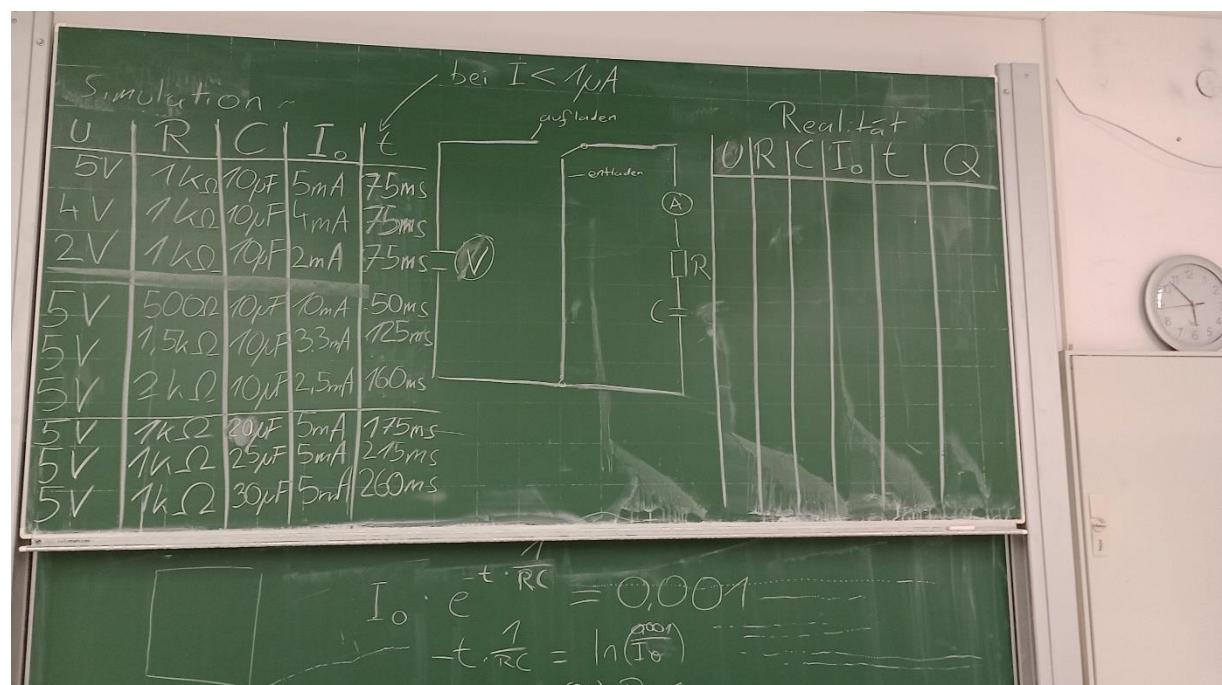
# Physik Experiment „Auf- und Entladen eines Kondensators“

## Ziel:

Der Einfluss der Spannung, dem Widerstand und der Kapazität auf den zeitlichen Verlauf der Stromstärke, beim Auf- und Entladen, eines Kondensators, soll festgestellt werden.

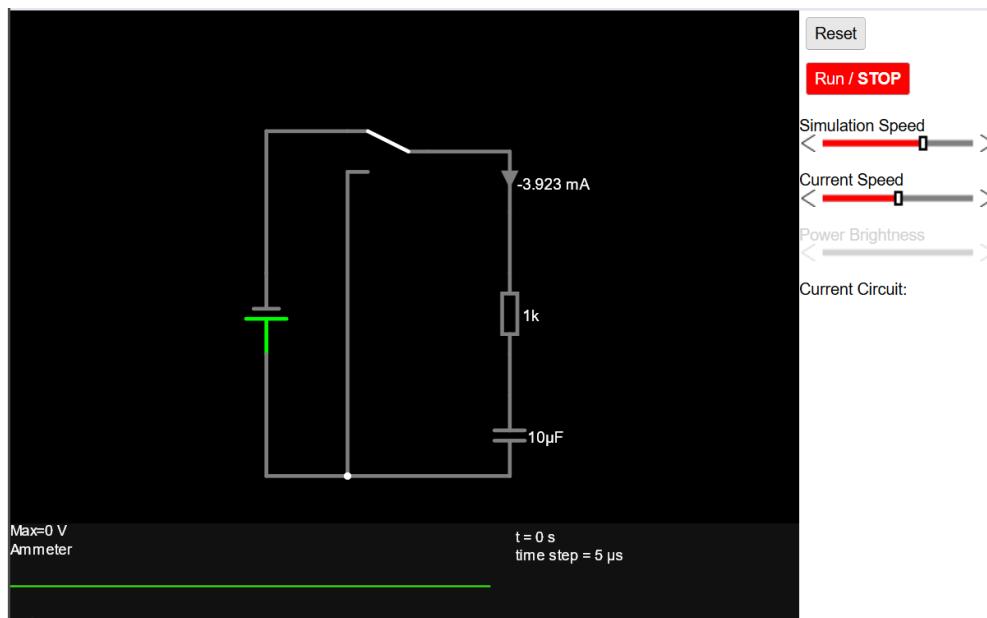
## Aufbau/Planung:

Um ein effektives und reibungsloses messen zu ermöglichen, wurde folgender Versuchsaufbau gewählt. Der Schalter oben, ermöglicht das einfache wechseln zwischen dem Auf- und Entladen des Kondensators.



Zur Verfügung standen die Geräte der Physik-Sammlung. Dadurch begrenzten sich die möglichen Spannungen auf bis zu 12 Volt, die möglichen Wiederstände auf 10 Ohm bis beinahe unbegrenzt und die Kondensatoren auf mikro Farrad bis 1.5 Farrad. Jedoch war der Abstand zwischen den Kapazitäten der jeweiligen Kondensatoren sehr groß, was sich bei der Auswahl später, als Hürde herausstellte. Denn dies bedeutete, dass man durch reines austauschen der Kondensatoren, die Kapazität nicht in einem sinnvollen Bereich varrieren konnte.

Zum Finden der passenden Parameter, wurde folgende Simulation auf <https://falstad.com/circuit> verwendet, welche dann die obigen Werte auf der Tafel ergab.



Dass die, zur Verwendung geplanten, Stromstärkemesser von Pasco, sehr ungenau bei kleineren Stromstärken sind und auch nur bedingt schnell abtasten können, fiel erst viel später auf, als wir messen wollten. Das führte dazu, dass wir, um dann die passenden Bauteile zu finden, einfach mal rumprobierten, bis wir zueinander passende Komponenten und Parameter fanden, mit denen sich brauchbare Werte messen ließen.

Der Versuchsaufbau sah dann zuletzt so aus, dass die normalen Netzgeräte, mit bis zu 5.5 V, das schaltbare Widerstandsgerät, im Bereich von 10 bis 50 Ohm und die Superkondensatoren mit 1.5 Fahrrad verwendet worden. Dadurch das keine anderen Kondensatoren im Fahrrad berreich zur Verfügung standen, erzeugten wir die notwendige Veränderung der Kapazität durch parallel bzw. Reihenschalten der Kondensatoren. So ließ sich jeweils die halbe und doppelte Kapazität erreichen.

Dies ergab folgende Messdurchführungen:

	Run 1:	Run 2:	Run 3:	Run 4:	Run 5:	Run 6:	Run 7:
U	5.5	U = 5.5V	U = 5.5V	U = 5.5V	U = 5.5V	U = 4V	U = 3V
R	10	R=10Ohm	R=10Ohm	R=20Ohm	R=30Ohm	R=10Ohm	R=10Ohm
C	1.5	C=0.75F	C=3F	C=1.5F	C=1.5F	C=1.5F	C=1.5F

Alle Rohdaten sind in der abgegebenen CSV Datei enthalten. Alle Messwerte sowie Tabellen die hier in der Auswertung verwendet werden, sind in der zusätzlichen Excel Tabelle hinterlegt.

Zuletzt sah der Arbeitsplatz so aus:



## Beobachtungen und Herausforderungen bei der Messwertaufnahme:

Um möglichst viele und genau Werte zu erhalten, hatten wir zu Anfang, die Abtastrate des Sensors, auf  $100\text{Hz}$  gestellt. Dabei lies sich sehr schnell erkennen, dass eine hohe Abtastrate ein relativ starkes Rauschen verursacht, welches in den Messwerten nicht vertretbar war. Am Ende nahmen wir die Messwerte mit  $10\text{Hz}$  auf. Dies ist noch schnell genug um keine signifikanten Stufen in den Kurven zu sehen und erzeugt minimal Rauschen im Bereich von  $\pm 0,001$  Ampere.

Was auch auffiel, war die starke Abweichung der Stromstärke  $I_0$  vom theoretisch errechneten Wert. So war die Stromstärke zum Beispiel, statt  $0,55$  Ampere,  $0,32$  Ampere. Dafür lassen zwei Vermutungen aufstellen. Der erste Grund könnte sein, dass der Kondensator selber einen Widerstand besitzt welcher in der theoretischen Formel nicht beachtet wird. Der zweite wäre, dass die Stromstärke von  $0,55$  Ampere durchaus da ist, aber diese so schnell abfällt, dass sie mit  $10\text{Hz}$  nicht sichtbar ist.

Wir musste den Sensor mehrmals nullen, da dieser ziemlich oft bzw. leicht einen Offset einbaute, was auch zu Verwirrung führte, als die Stromstärke nach  $15\text{ min}$  nicht auf  $0$  Ampere fallen wollte.

Bei einigen Aufladevorgängen sah man, dass die Stromstärke nach dem Aufladen, wieder hochging, obwohl der Kondensator schon voll war. Dies könnte mit einer externen Induktion zusammenhängen. Interessanterweise ist über dem Tisch, auf dem

der Versuchsaufbau stand, eine Hochspannung, mit einem Multimeter, zu messen. Dies könnte eine potentielle Erklärung für die Schwingung sein.

Was bereits bei der Aufnahme der Messwerte auffiel, war die relativ lange Zeit, die man abwarten musste, bis die Stromstärke auf einen vernachlässigbar kleinen Wert sank. Dieser Verdacht bestätigte sich nach kurzer Rechnung. Der Grund sollte uns vorerst noch ein Rätsel bleiben.

$$I_o \cdot e^{-t/RC} = 0,001$$

$$-t/RC = \ln(0,001)$$

$$-t = \ln(0,001) \cdot R \cdot C$$

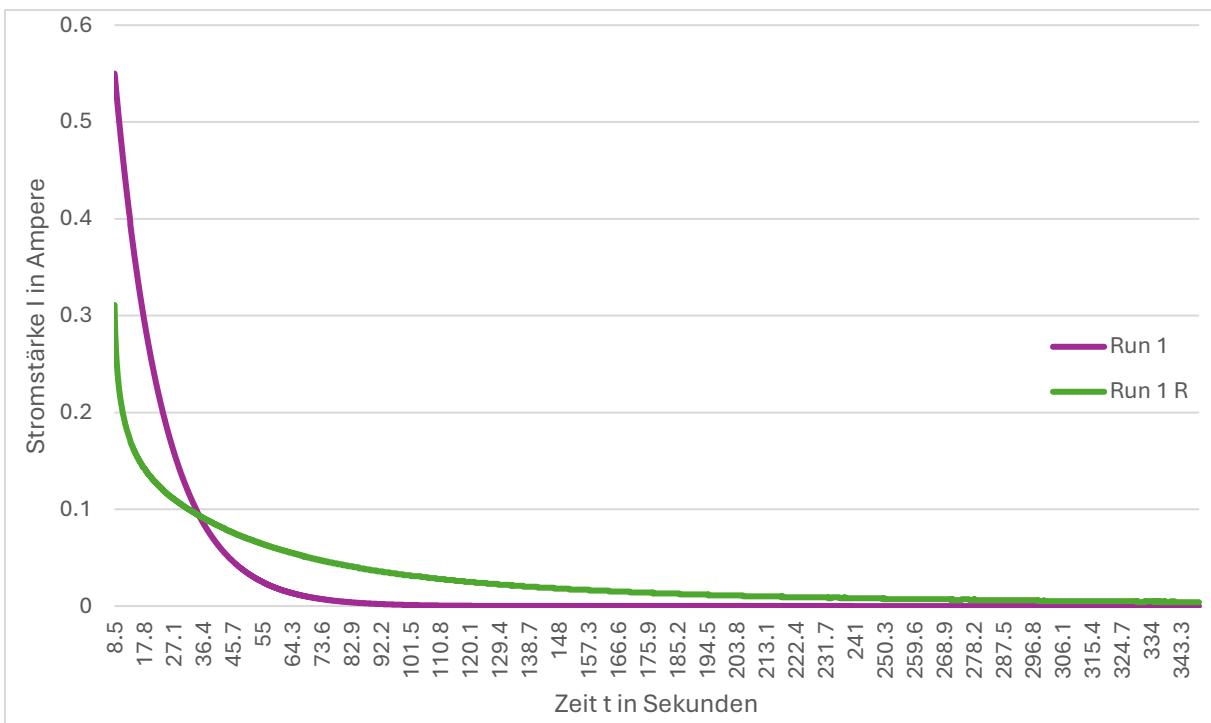
Erst zu viel später haben wir erfahren, dass viele dieser hier beobachteten Anomalien sich durch das besondere Verhalten von Superkondensatoren erklären lassen.

### Auswertung:

#### *Vergleich der aufgenommenen Kurven mit der Theorie:*

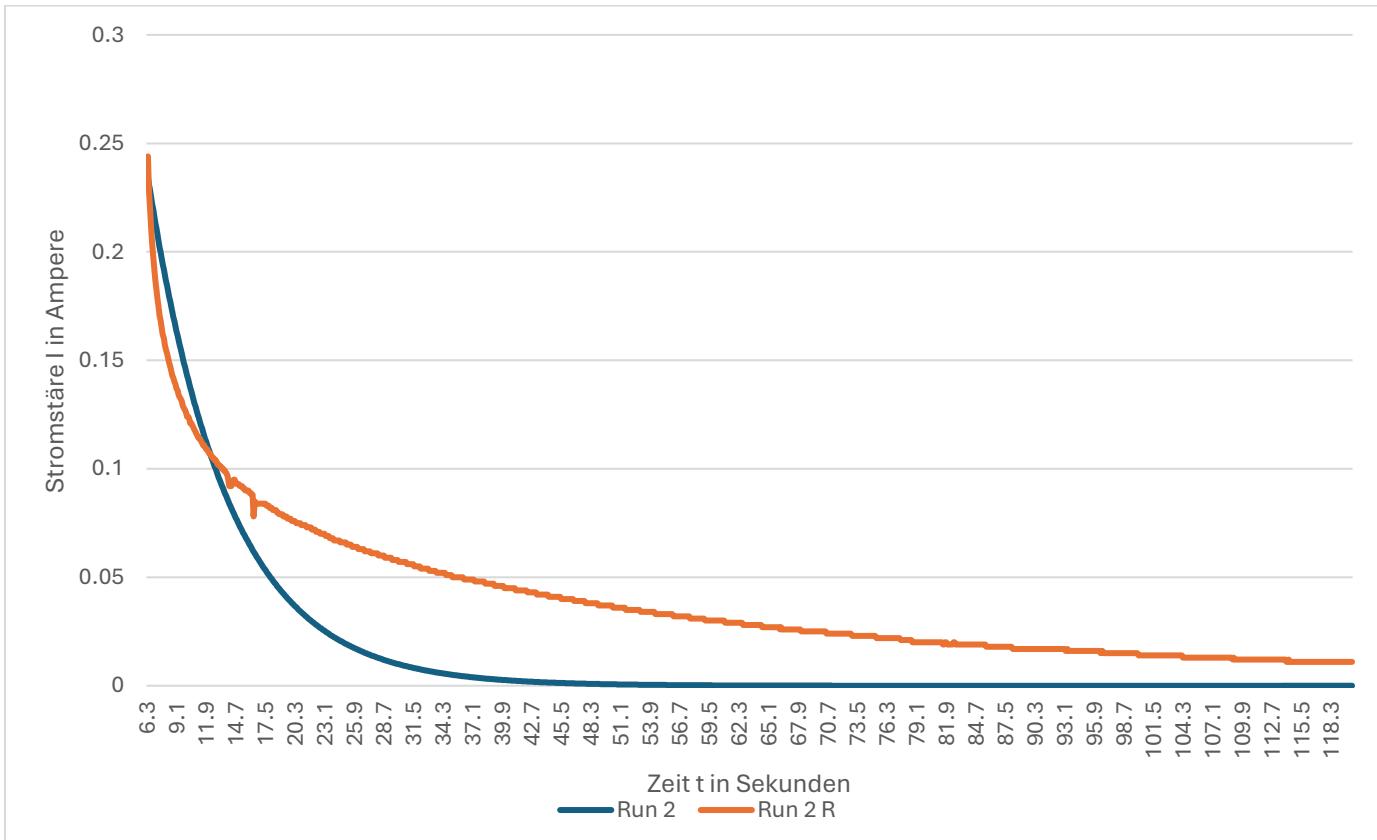
Wie bereits gesagt, wir vermuteten, dass die Aufnahme der Messwerte viel zu lange dauerte. Wenn man die aufgenommenen Werte und die theoretischen Werte der Stromstärke, übereinander plottet, erkennt man das auch recht schnell:

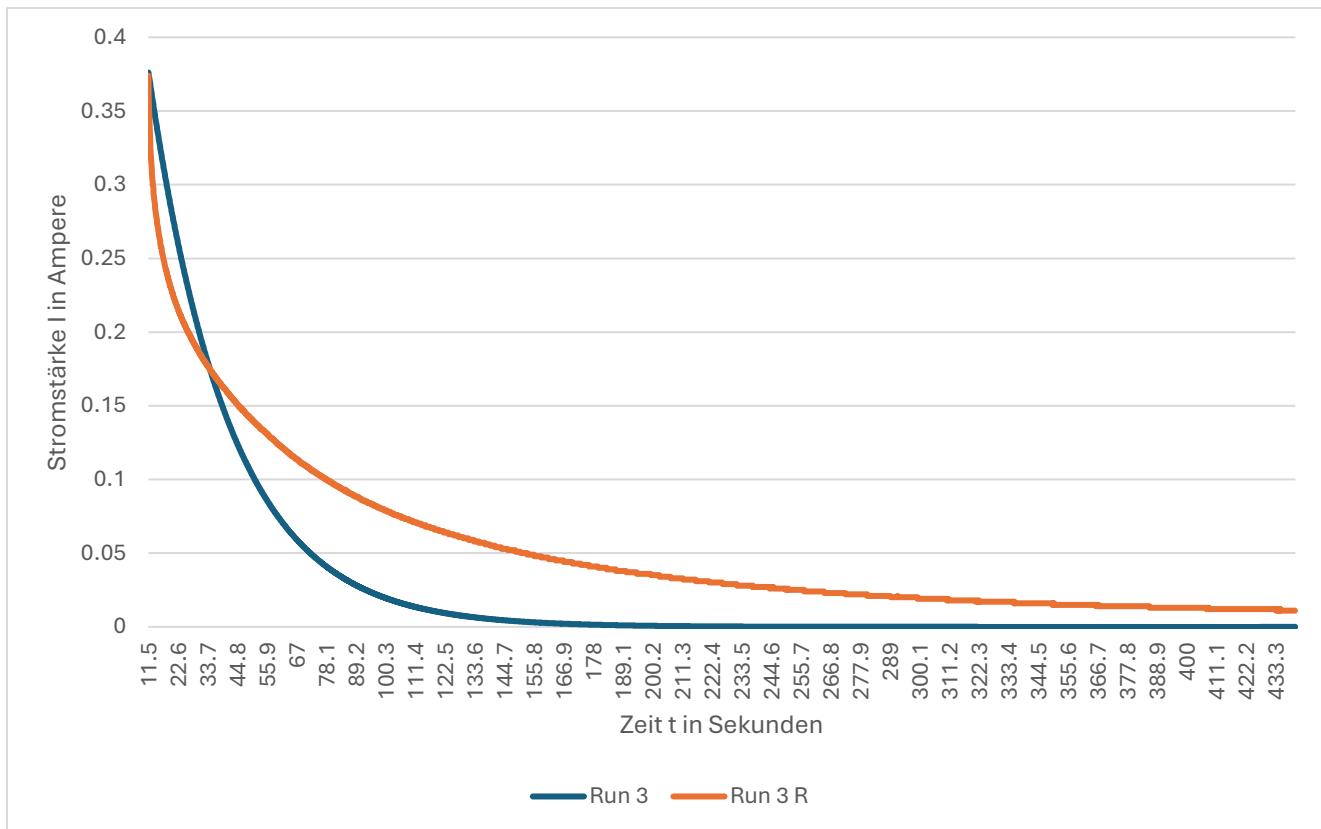
	Run 1:	Run 2:	Run 3:	Run 4:	Run 5:	Run 6:	Run 7:
<b>U</b>	5.5	U = 5.5V	U = 5.5V	U = 5.5V	U = 5.5V	U = 4V	U = 3V
<b>R</b>	10	R=10Ohm	R=10Ohm	R=20Ohm	R=30Ohm	R=10Ohm	R=10Ohm
<b>C</b>	1.5	C=0.75F	C=3F	C=1.5F	C=1.5F	C=1.5F	C=1.5F



Die lila Kurve, welche dem theoretischen Werten entspricht, fällt und flacht deutlich schneller ab, als die grüne gemessene Kurve. Während bei 90 Sekunden die Stromstärke schon nahe 0 sein sollte, ist sie in Wirklichkeit etwas unter 0,05 Ampere.

Diesen Unterschied erkennt man auch bei den anderen Messungen in der selben Form und Art:





Wenn man dann einen Kurvenfit anwendet um die tatsächlichen Parameter der Messung zu ermitteln, fällt auf, dass es sich bei den aufgenommenen Werten gar nicht um eine  $e^{-}$ -Funktion handelt. Dies lässt sich mit folgendem Ausschnitt aus Wikipedia erklären:

„Die starke Zeitabhängigkeit der Kapazität, bedingt durch die begrenzte Ladungsträgerbeweglichkeit, hat in der Praxis zu Folge, dass in vielen Anwendungen, besonders bei hohen Spitzenstrombelastungen, der Nennkapazitätswerte des Kondensators der Schaltung nicht zur Verfügung steht“

sowie

„Mit dem elektrischen Modell seriell geschalteter RC-Glieder, siehe Kapazität, lässt sich dabei leicht erklären, dass der Innenwiderstand von Superkondensatoren mit zunehmender Eindringtiefe der Ladungsträger in die Poren der Elektroden zeitverzögert zunimmt. Da die Ladungsträgerbeweglichkeit begrenzt ist, ist nicht nur die Kapazität, sondern auch der Innenwiderstand zeitabhängig und damit auch stark frequenzabhängig“

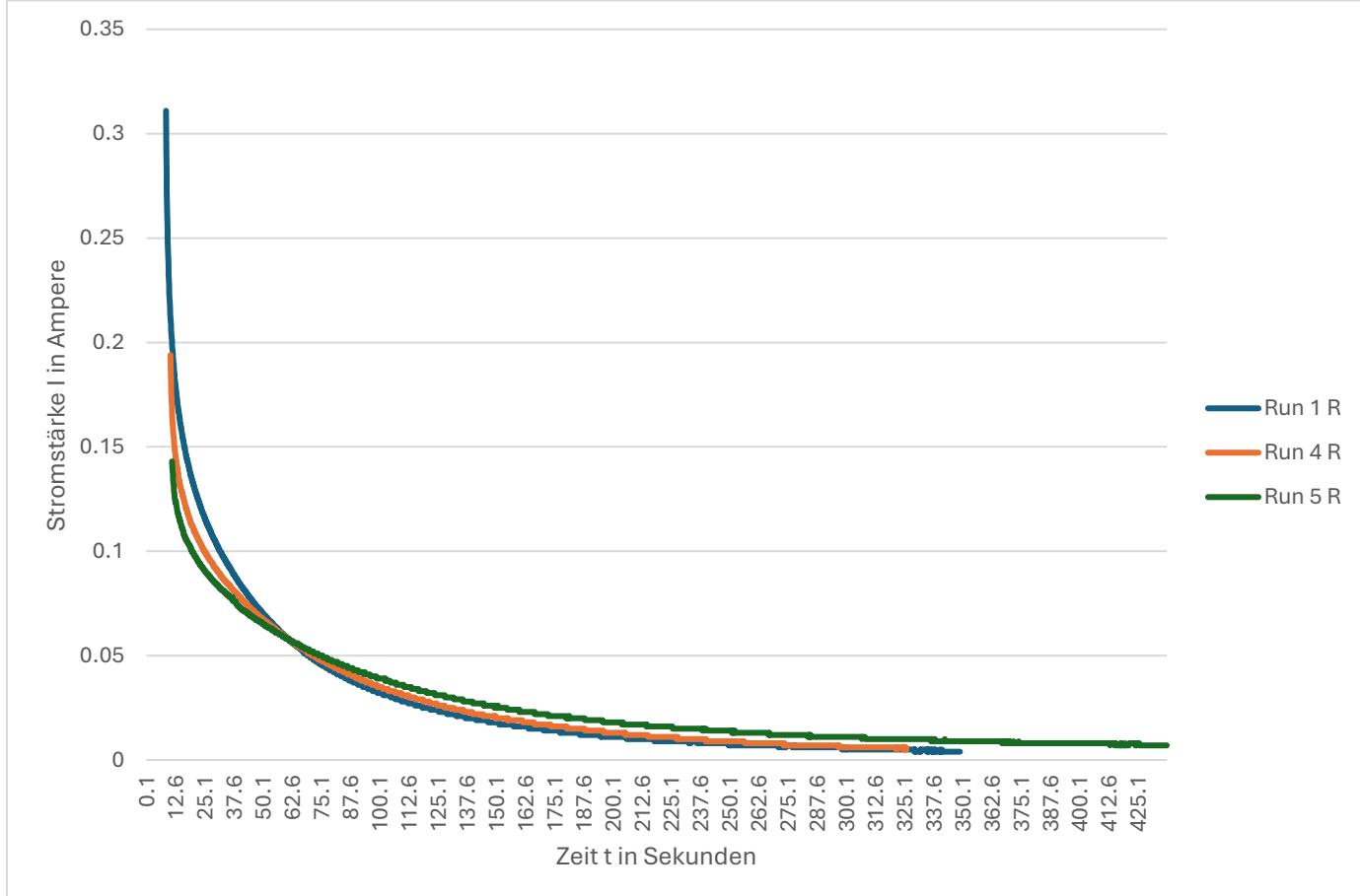
(siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Superkondensatoren>)

Das erklärt auch warum die Stromstärke am Anfang des Graphen gleich bzw. steiler fällt, als die Simulation und erst später sehr stark ausflacht. (Die Steigung ist deswegen nur nicht gleich, weil ich hier die gemessenen Werte zeitlich nach rechts verschoben habe, so dass die Anfangswerte von  $I_0$  übereinstimmen)

## Vergleich Einfluss Widerstand:

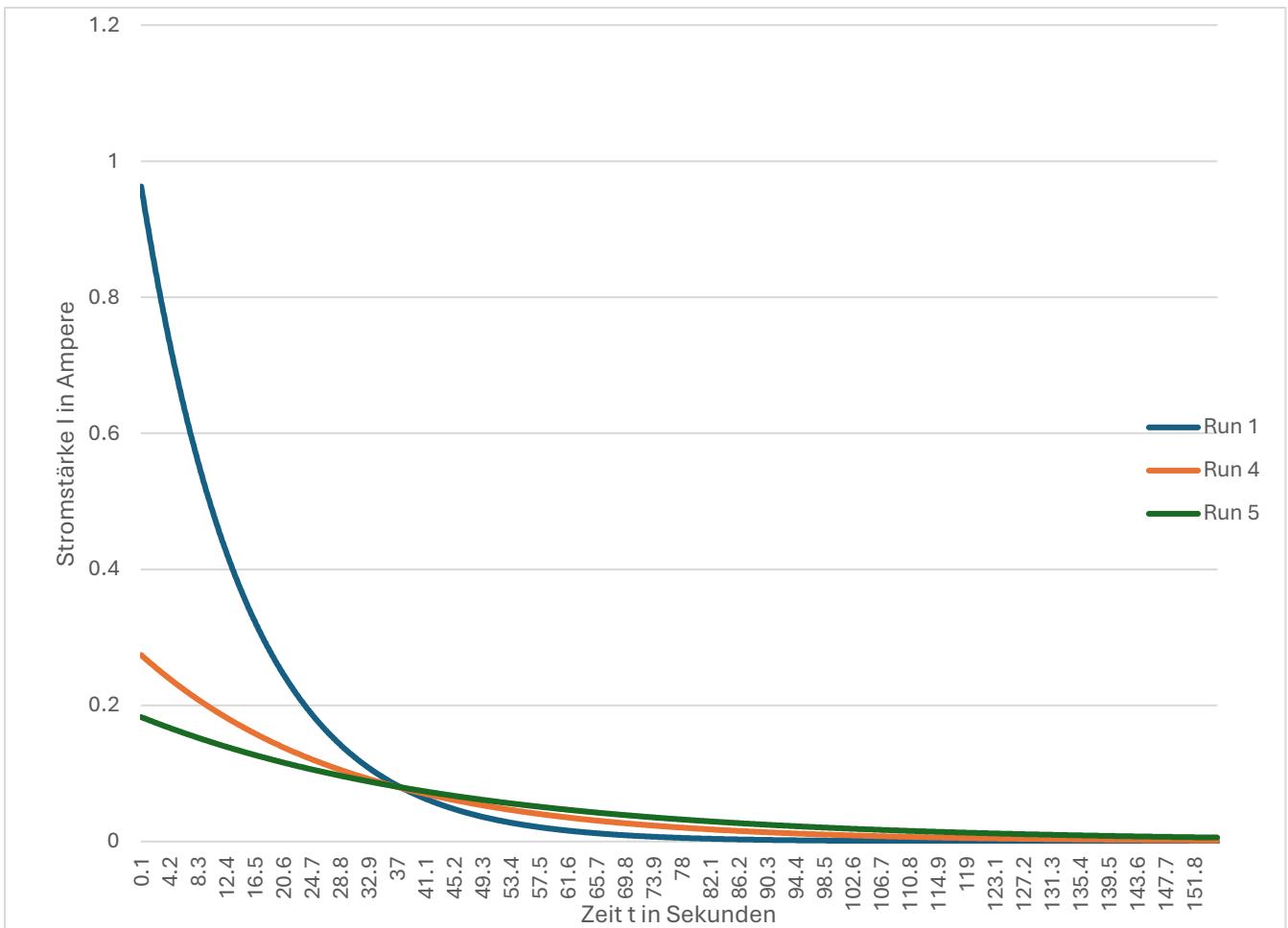
Um den Einfluss des Widerstandes auszuwerten, verwenden wir die Messreihen 1, 4 und 5.

	Run 1:	Run 2:	Run 3:	Run 4:	Run 5:	Run 6:	Run 7:
<b>U</b>	5.5	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 4V$	$U = 3V$
<b>R</b>	10	$R=10\Omega$	$R=10\Omega$	$R=20\Omega$	$R=30\Omega$	$R=10\Omega$	$R=10\Omega$
<b>C</b>	1.5	$C=0.75F$	$C=3F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$



Was man sehr gut erkennt, ist dass die Stromstärke  $I_0$  mit wachsendem Widerstand kleiner wird. Dies lässt sich sehr einfach durch  $I_0 = \frac{U}{R}$  erklären. Bedeutet je größer  $R$ , desto kleiner wird  $I_0$ .

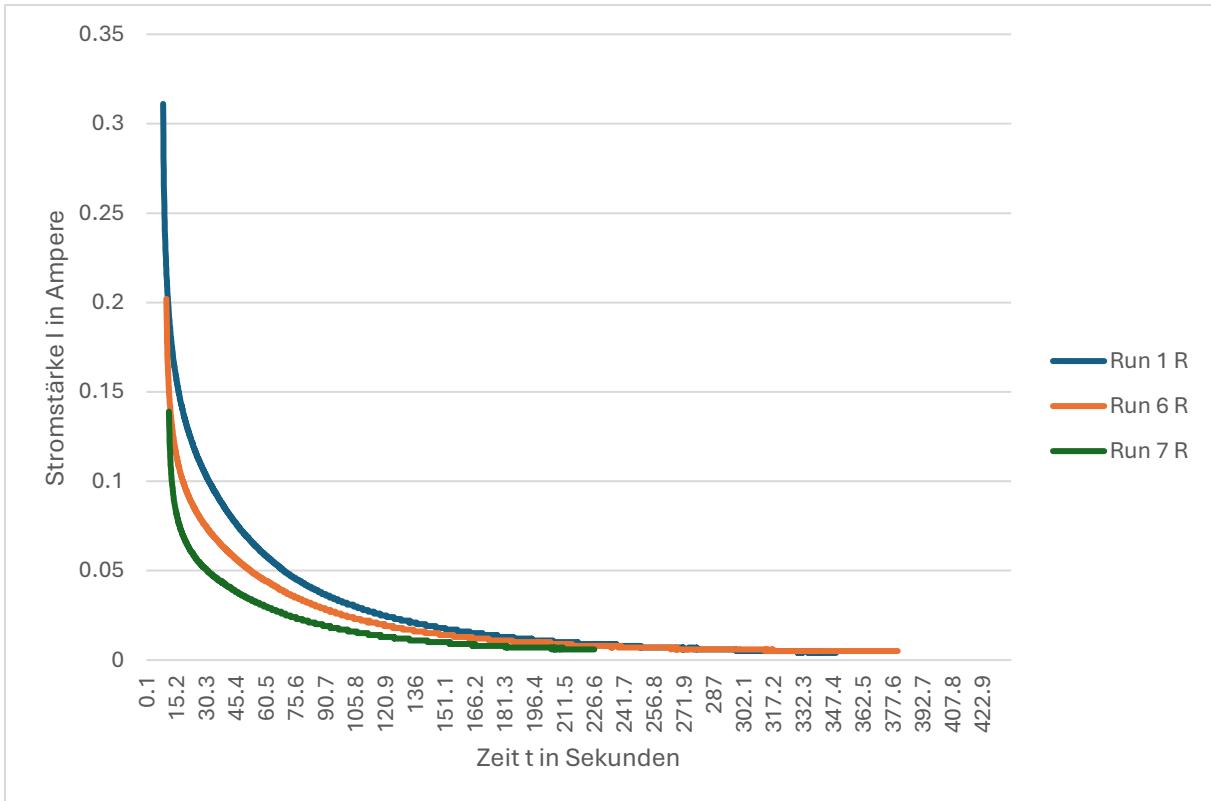
Was sich auch erkennen lässt, ist dass mit steigendem Widerstand die Aufladezeit längt wird. Betrachtet man die theoretische Formel für den Aufladevorgang, sieht man, dass die Vermutung sich bestätigt:



### Vergleich Einfluss Spannung:

Um den Einfluss der Spannung auszuwerten, verwenden wir die Messreihe 1, 6 und 7.

	Run 1:	Run 2:	Run 3:	Run 4:	Run 5:	Run 6:	Run 7:
<b>U</b>	5.5	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 4V$	$U = 3V$
<b>R</b>	10	$R=10\Omega$	$R=10\Omega$	$R=20\Omega$	$R=30\Omega$	$R=10\Omega$	$R=10\Omega$
<b>C</b>	1.5	$C=0.75F$	$C=3F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$

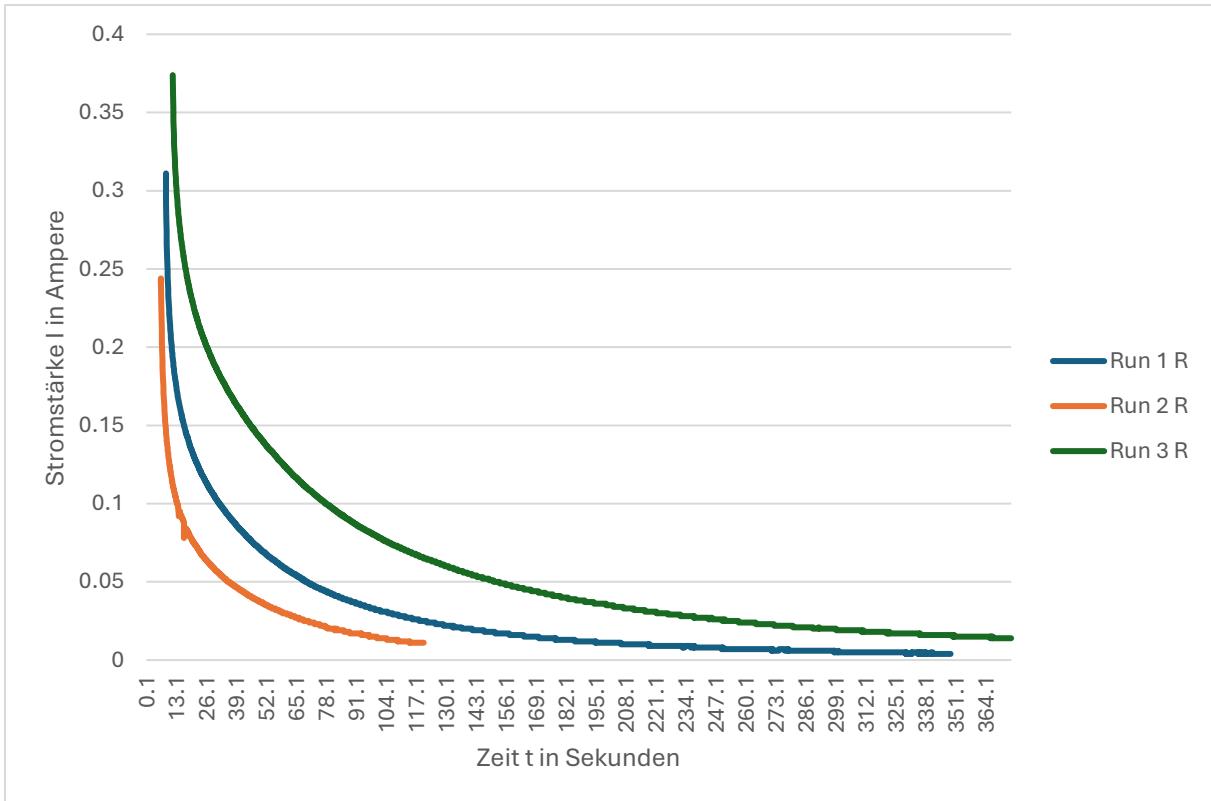


Bei diesen Messwerten erkennt man, den Einfluss der Spannung, sehr gut. Man sieht, dass mit sinkender Spannung  $U$ , die Stromstärke  $I_0$  gemäß  $I = \frac{U}{R}$  sinkt. Die Ent- bzw. Aufladezeit verändert sich aber nicht. Das erkennt man daran das alle Kurven wieder an ungefähr der gleichen Stelle zusammenkommen. Ein Vergleich mit der theoretischen Formel  $I(t) = \frac{U}{R} * e^{-t*\frac{1}{RC}}$  zeigt auch, dass die Spannung nur Einfluss auf die Initialstromstärke  $I_0$  hat.

### Vergleich Einfluss Kapazität:

Um den Einfluss Kapazität auszuwerten, verwenden wir die Messreihe 1, 2 und 3.

	Run 1:	Run 2:	Run 3:	Run 4:	Run 5:	Run 6:	Run 7:
U	5.5	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 5.5V$	$U = 4V$	$U = 3V$
R	10	$R=10\Omega$	$R=10\Omega$	$R=20\Omega$	$R=30\Omega$	$R=10\Omega$	$R=10\Omega$
C	1.5	$C=0.75F$	$C=3F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$	$C=1.5F$



Was sich auch hier erkennen lässt, sind zum einen die unterschiedlichen Anfangstromstärken  $I_0$ . Dies sollte laut Formel nicht so sein, lässt sich aber durch die unterschiedlichen inneren Widerstände der Kondensatoren erklären. Bedeutet die Kapazität hängt im Normalfall nicht mit der Anfangstromstärke zusammen.

Was aber sehr wohl mit der Kapazität zusammenhängt, ist die Auf- und Entladezeit. Man sieht eindeutig, bei einer größeren Kapazität, eine längere Auf- und Entladezeit. Und bei kleineren Kapazitäten, genau umgekehrt. Das lässt sich auch über die Formel zeigen. Je größer  $C$ , desto kleiner  $\frac{1}{RC}$ , desto näher an 0 ist  $-t \cdot \frac{1}{RC}$  und desto länger/flacher die Kurve.

### Berechnung der Ladungsmenge:

Um die Ladung von dem  $1.5F$  Kondensator zu ermitteln, haben wir für Messreihe 1, die Fläche unter der Aufladekurve summiert.

Für Messreihe 1 ergibt sich hiermit 10,2071 Coulomb.

Laut Herstellerangaben sollte der Wert  $C * U$  sein. Also  $1.5F * 5.5V = 8.25 C$ . Die Abweichung könnte sich durch die Messfehler in dem flachen Bereich der Entladungskurve erklären. Hier liegt die Stromstärke im Bereich von 0,0004 Ampere. In den sehr niedrigen Bereichen, hat der Sensor wahrscheinlich eine ungenauere Auflösung.

Auch als Erklärung könnten Toleranzen bei der Herstellung sein.

Aus Wikipedia: „Der Nennkapazitätswert ist mit einer Toleranz, meist 20 %, versehen und muss innerhalb dieses Toleranzbereiches liegen“ (siehe [https://de.wikipedia.org/wiki/Superkondensator#Technische\\_Daten\\_im\\_Vergleich](https://de.wikipedia.org/wiki/Superkondensator#Technische_Daten_im_Vergleich))

$120\% * 8.25C = 9.9C$ . Also mit Messfehlern eingerechnet liegt die gemessene Ladung des Kondensator im Toleranzbereich.

Wenn man auf Wikipedia weiterliest, gewinnt man die Erkenntnis, dass Superkondensatoren, durchaus anderes Verhalten aufweisen, als normale. Dies erklärt einen Großteil der unerwarteten Beobachtungen bei den Messungen.

### Vergleich der Auf- und Entladekurve:

Als letztes (weil es mich interessiert hat), habe ich noch die Auf- mit der Entladekurve verglichen, um zu schauen in wie weit diese sich decken.

Bis auf einige kleinere Abweichungen, beschreiben die Auf- und Entladekurven ungefähr den selben Verlauf (Die Abweichungen treten vor allem bei niedrigen Stromstärken auf was mit dem Sensor oder dem Verhalten der Kondensatoren zusammenhängen könnte):

