

# ANFÄNGERPRAKTIKUM 2015/2016

## Leerlaufspannung und Innenwiderstand von Spannungsquellen

Durchführung: 08.12.15

Clara RITTMANN<sup>1</sup>  
Anja BECK<sup>2</sup>

*Betreuer:*  
Max MUSTERMANN

---

<sup>1</sup>clara.rittmann@gmail.com

<sup>2</sup>anja.beck@tu-dortmund.de

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Aufbau und Ablauf des Experiments</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>5</b>
3.1	Statistische Formeln . . . . .	5
3.1.1	Fehlerrechnung . . . . .	5
3.1.2	Regression . . . . .	5
3.2	Leerlaufspannung und Innenwiderstand für drei Spannungsquellen berechnen . . . . .	6
3.3	Systematischer Fehler – endlicher Widerstand des Voltmeters . .	9
3.4	Das Maximum der umgesetzten Leistung . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>11</b>

# 1 Theorie

<sup>1</sup> Wird in der Elektrotechnik ein Stromkreis betrachtet, so gilt das 2. Kirchhoffsche Gesetz

$$\sum_n U_i = \sum_n I_i Z_i \quad . \quad (1)$$

Wobei die  $U_i$  die angelegten Spannungen,  $Z_i$  die Impedanzen und  $I_i$  der Strom, der durch  $Z_i$  fließt ist. Für einen Stromkreis mit einer Spannungsquelle  $U$  und einem Lastwiderstand  $R_a$  gilt dann

$$U = IR_a \quad .$$

Wird ein solcher Stromkreis, an dem die Spannung  $U_0$  anliegt, im Experiment betrachtet gilt diese Gleichung nicht für  $U = U_0$ . Das liegt daran, dass eine reale Spannungsquelle immer einen Innenwiderstand  $R_i$  hat, der den Stromfluss beeinflusst. Im Schaltbild und in der Rechnung kann eine solche reale Spannungsquelle wie eine ideale Spannungsquelle betrachtet werden, hinter der ein Widerstand der Größe  $R_i$  geschaltet ist (siehe Abbildung 1). Dann gilt wie gewohnt (1):

$$U_0 = IR_i + IR_a \quad . \quad (2)$$

Die angelegte Spannung  $U_0$  wird auch Leerlaufspannung genannt. Die im Schaltbild als  $U_k$  bezeichnete Klemmspannung, ist hingegen die Spannung, die dann am eigentlichen Stromkreis anliegt. Sie kann mit (1)

$$U_k = IR_a = U_0 - IR_i \quad (3)$$

berechnet werden. Eine ideale Spannungsquelle müsste demnach einen Innen-

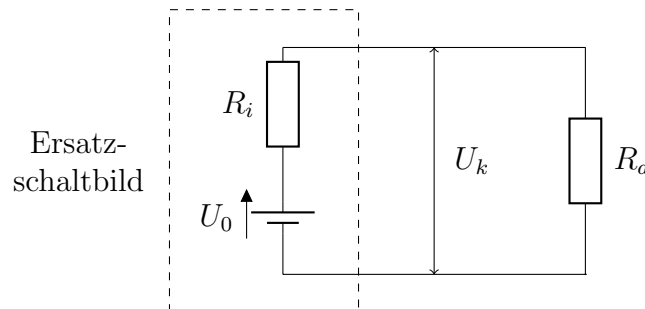


Abbildung 1: Reale Spannungsquelle in einem Stromkreis

widerstand von  $R_i = 0$  haben, sodass  $U_k = U_0$  gilt. Es ist zu beachten, dass es bei Generatoren zu Rückkopplungseffekten kommen kann, sodass für ihren Innenwiderstand ein differentieller Zusammenhang

$$R_i = \frac{dU_k}{dI} \quad (4)$$

<sup>1</sup>nach: Anleitung zu V301: Leerlaufspannung und Innenwiderstand von Spannungsquellen, Anfängerpraktikum TU Dortmund WS 2015/16, <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V301.pdf>

gilt.

Die Leistung  $N$ , die an einen Widerstand  $R$  abgegeben wird ist definiert als

$$N = IU_R = I^2 R \quad . \quad (5)$$

Wird weiterhin ein Stromkreis mit nur einem Lastwiderstand betrachtet, gilt für den Strom nach (2)

$$I = \frac{U_0}{R_i + R_a}, \quad (6)$$

sodass die Leistung am Lastwiderstand

$$N(R_a) = \left( \frac{U_0}{R_i + R_a} \right)^2 R_a \quad (7)$$

ist. Könnte der Innenwiderstand  $R_i$  Null sein, wäre es mit  $R_a \rightarrow 0$  möglich beliebig hohe Leistungen zu erreichen. Das Maximum der Leistung wird bei  $R_a = R_i$  erreicht. Eine dementsprechende Wahl von  $R_a$  wird Leistungsanpassung genannt.

## 2 Aufbau und Ablauf des Experiments

1. **Leerlaufspannung** Im ersten Messschritt wird die Leerlaufspannung, der im weiteren Verlauf verwendeten Monozelle, mit einem Voltmeter gemessen.
2. **Klemmspannung einer Monozelle**
  - a) Mit der in Abbildung 2a dargestellten Schaltung wird jeweils die Klemmspannung  $U_k$  und der Strom  $I$  bei verschiedenen Lastwiderständen im Bereich von 0 – 50 k $\Omega$  gemessen. Hier ist zu beachten, dass das Voltmeter an der eingezeichneten Stelle angeschlossen wird, denn nur dort kann die Spannung gemessen werden, die in den Stromkreis eingespeist wird. Würde das Voltmeter beispielsweise nach dem Amperemeter (also zwischen den Punkten H und G) angeschlossen, würde es die Klemmspannung minus die Spannung, die am Amperemeter abfällt, messen.
  - b) Die Klemmspannung kann auch mit Hilfe einer Gegenspannung bestimmt werden. Dazu wird eine Gegenspannung, die etwa 2 V größer ist, als die Leerlaufspannung hinter den Lastwiderstand (siehe Abbildung 2b) geschaltet. Auch hier findet die Messung der Klemmspannung  $U_k$  und des Stroms  $I$  bei verschiedenen Lastwiderständen im Bereich von 0 – 50 k $\Omega$  statt.

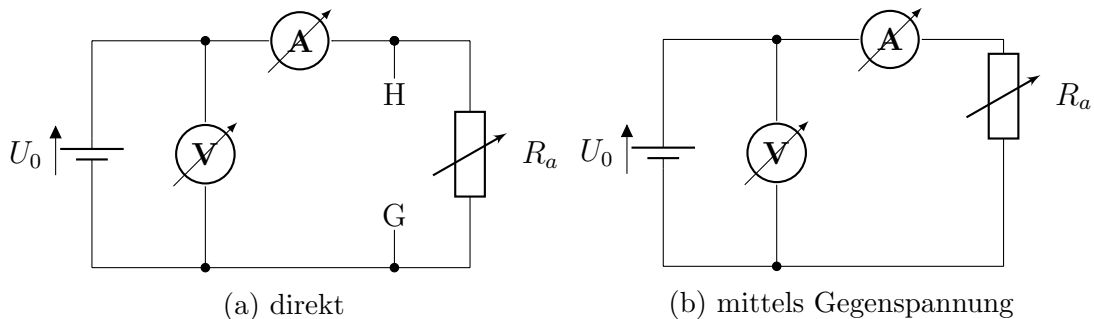


Abbildung 2: Messung der Klemmspannung

3. **Klemmspannung eines RC-Generators** Der Stromkreis 2a eignet sich auch zur Bestimmung der Klemmspannung einer Wechselspannungsquelle. Zunächst wird der 1 V-Rechteckausgang eines RC-Generators als Spannungsquelle verwendet. Wie bei den vorherigen Messungen werden wieder die Spannung  $U_k$  und der Strom  $I$  bei variablem Lastwiderstand, dieses Mal zwischen 20 und 250  $\Omega$ , gemessen. Die Messung wird für den 1 V-Sinusaussgang des RC-Generators und einem Lastwiderstand von 0.1 – 5 k $\Omega$ .

## 3 Auswertung

### 3.1 Statistische Formeln

#### 3.1.1 Fehlerrechnung

Im folgenden wurden Mittelwerte von N Messungen der Größe  $x$  berechnet

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (8)$$

sowie die Varianz

$$V(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (9)$$

woraus die Standardabweichung folgt

$$\sigma_x = \sqrt{V(x)}. \quad (10)$$

Die Standardabweichung des Mittelwertes, kürzer auch Fehler des Mittelwertes genannt, bezieht noch die Anzahl der Messungen mit ein. Mehr Messungen führen zu einem kleineren Fehler

$$\Delta_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}. \quad (11)$$

#### 3.1.2 Regression

Nachfolgend wird eine lineare Regression für Wertepaare  $(x_i, y_i)$  durchgeführt. Dafür müssen die Steigung

$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (12)$$

und der y-Achsenabschnitt

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (13)$$

berechnet werden. Den jeweiligen Fehler erhält man mit

$$s_m^2 = s_y^2 \cdot \frac{n}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (14)$$

$$s_b^2 = s_y^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} . \quad (15)$$

$s_y$  ist hierbei die Abweichung der Regressionsgeraden in y-Richtung.

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n - 2} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - b - mx_i)^2}{n - 2} \quad (16)$$

### 3.2 Leerlaufspannung und Innenwiderstand für drei Spannungsquellen berechnen

Es werden drei verschiedene Spannungsquellen in verschiedenen jeweils Stromkreisen mit zwei analogen Multimetern vermessen. Die Ableseungenauigkeit der Strommessung beträgt 2% und die der Spannungsmessung 3%. In den folgenden Diagrammen sind diese Fehler durch Fehlerbalken gekennzeichnet. Für die Monozelle folgt nach Formel (2a) mit der Leerlaufspannung  $U_0$  und den Innenwiderstand  $R_i$  und einer linearen Regression mittels Python:

$$U_0 = (1.471 \pm 0.014) \text{ V} , \quad (17)$$

$$R_i = (5.46 \pm 0.14) \Omega . \quad (18)$$

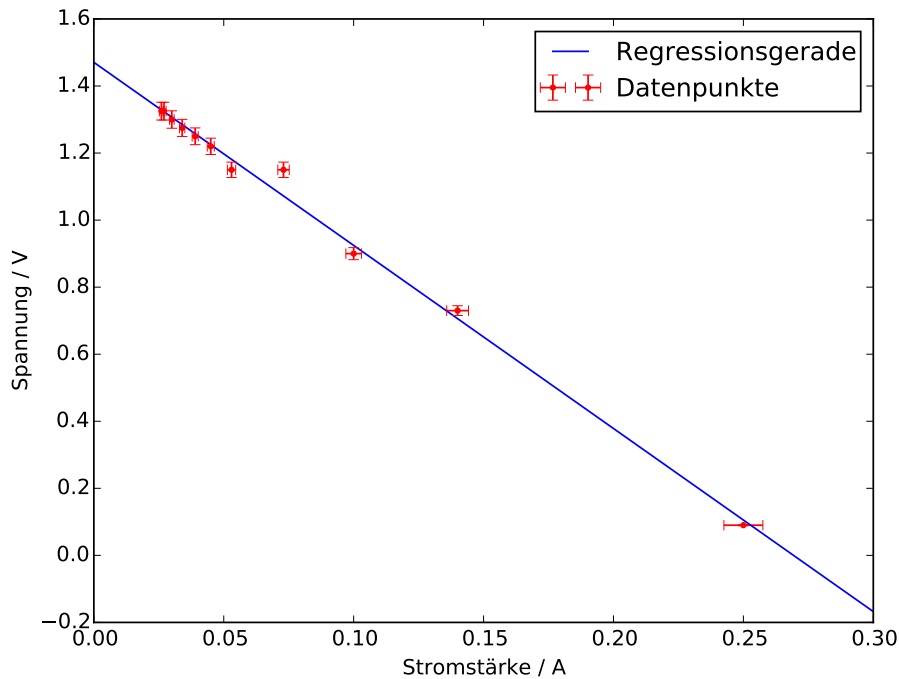


Abbildung 3: Lineare Regression zur Monozelle

Beim Anlegen einer Gegenspannung fließt der Strom in die entgegengesetzte Richtung und Formel (2a) wird zu

$$U_k = IR_a = U_0 + IR_i . \quad (19)$$

Die lineare Regression liefert :

$$U_0 = (1.383 \pm 0.033) \text{ V} , \quad (20)$$

$$R_i = (5.91 \pm 0.24) \Omega . \quad (21)$$

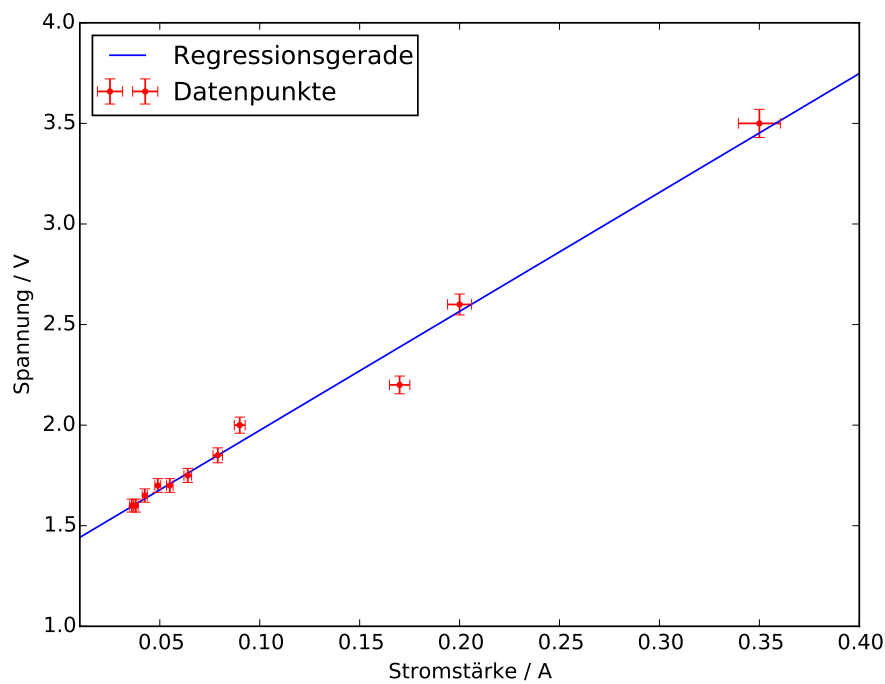


Abbildung 4: Lineare Regression zur Gegenspannung

Für den RC-Generator wird der gleiche Aufbau wie bei der Monozelle verwendet. Hier gibt es zwei Messreihen. Für die Rechteckspannung folgt

$$U_0 = (0.555 \pm 0.006) \text{ V} , \quad (22)$$

$$R_i = (61.4 \pm 1.9) \Omega \quad (23)$$

und für die Sinusspannung

$$U_0 = (0.2332 \pm 0.0015) \text{ V} , \quad (24)$$

$$R_i = (675.6 \pm 12.5) \Omega . \quad (25)$$



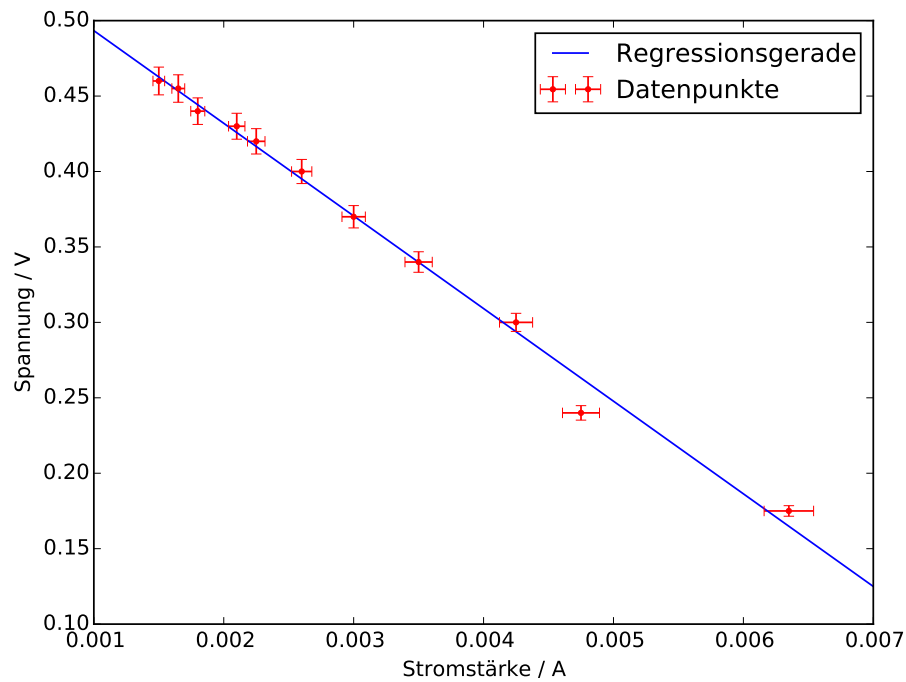


Abbildung 5: Lineare Regression zum RC-Generator (Rechteckspannung)

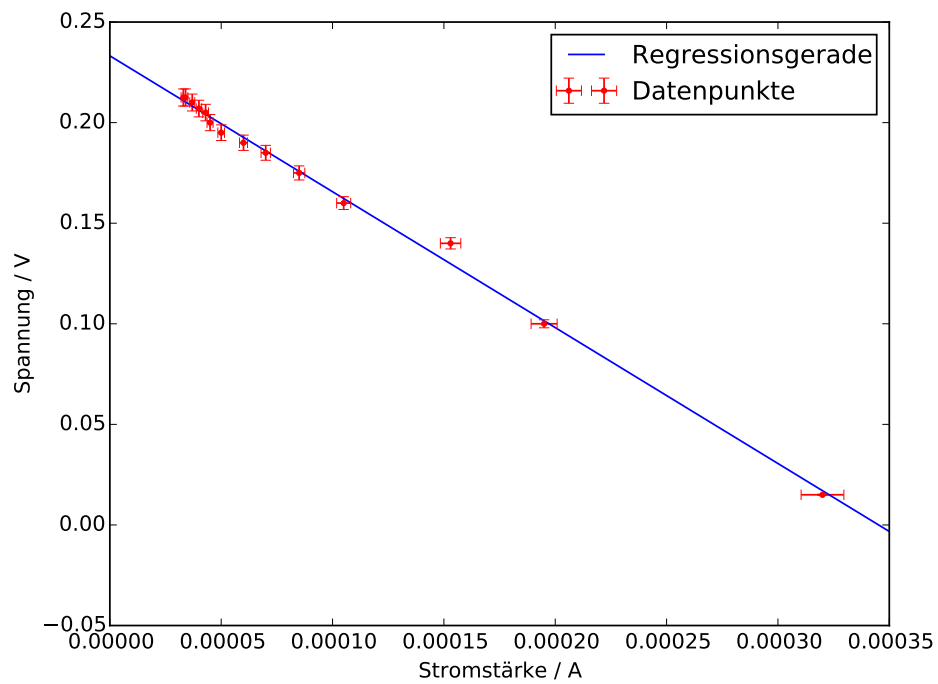


Abbildung 6: Lineare Regression zum RC-Generator (Sinusspannung)

### 3.3 Systematischer Fehler – endlicher Widerstand des Voltmeters

Der Endliche Widerstand des Voltmeters führt zu einem systematischen Fehler. Der Widerstand des Messgerätes müsste unendlich groß sein, um den Stromkreis und -fluss nicht zu beeinflussen. Um den Fehler auszurechnen wird direkt die Leerlaufspannung der Monozelle gemessen

$$U_k = 1.5 \text{ V} . \quad (26)$$

Der Innenwiderstand der Monozelle(siehe (18)) wird aus einer anderen Messreihe übernommen. Durch umstellen der Formel (2a) nach  $U_0$  und einsetzen vereinfacht sich der absolute Fehler zu

$$\Delta U = U_0 - U_k = U_k * \frac{R_i}{R_v} = 8.191 \cdot 10^{-7} \text{ V} \quad (27)$$

und der relative Fehler wird

$$\frac{\Delta U}{U_k} = \frac{R_i}{R_v} = 5.461 \cdot 10^{-7} \% . \quad (28)$$

Dieser Fehler ist vernachlässigbar klein.

### 3.4 Das Maximum der umgesetzten Leistung

Wie bereits in der Theorie erklärt ist die umgesetzte Leistung abhängig vom Lastwiderstand  $R_a$  und nimmt sogar ein lokales Maximum ein. Hier werden die Messreihen der Monozelle betrachtet. Die Leistung  $N_{\text{Mess}} = U_k \cdot I$  wird über den Belastungswiderstand  $R_a = U_k/I$  aufgetragen. Ein Fehler entsteht durch die Ablesungenauigkeit der Messgeräte.

Tabelle 1: Belastungswiderstand und Leistung mit Fehlern

Widerstand in $\Omega$	Fehler in $\Omega$	Leistung in W	Fehler in W
0.36	0.013	0.0225	0.00081
5.21	0.188	0.1022	0.00368
9.00	0.324	0.0900	0.00325
15.75	0.568	0.0840	0.00303
21.70	0.782	0.0610	0.00220
27.11	0.978	0.0549	0.00198
32.05	1.156	0.0488	0.00176
37.50	1.352	0.0434	0.00156
43.33	1.562	0.0390	0.00141
49.07	1.769	0.0358	0.00129
50.96	1.837	0.0345	0.00124

Die erwartete Leistung nach Formel (7) wird in einem Diagramm zusammen mit den in Tabelle 1 dargestellten Werten dargestellt.

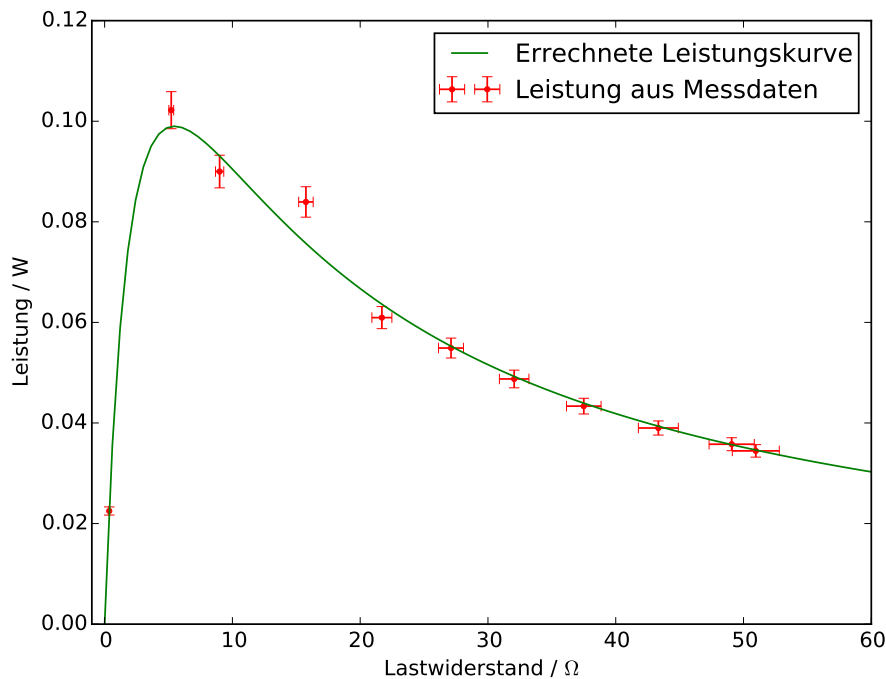


Abbildung 7: Lineare Regression zum RC-Generator (Rechteckspannung)

## 4 Diskussion

Wieso liegt der Wert der Leerlaufspannung der Monozelle aus Messung b nicht genau auf 1.5 und die Gegenspannung nicht genau 2V?

- Voltmeter kann es nicht sein nach Auswertung
- Amperemeter keinen unendlich kleinen Widerstand
- Rückkopplungseffekte

RC-Generator:

- woher kommen die großen Unterschiede zwischen Rechteck und Sinusspannung?

Der errechnete Innenwiderstand des RC-Generators für die Rechteckspannung stimmt mit dem Literaturwert<sup>2</sup> von circa  $50\,\Omega$  überein, zumal dieser Wert vom Gerät abhängig ist. Wieso der Innenwiderstand des Generators beim Erzeugen einer Sinusspannung so viel höher ist können wir nur vermuten. Das Rechtecksignal wird in ein Dreiecksignal umgewandelt und diese beiden zusammen ergeben die Sinusspannung. Anscheinend ist der große Innenwiderstand darauf zurückzuführen.

Leistung:

- die Werte sind bis auf einen recht gut!
- Maximum händisch bestimmen

---

<sup>2</sup>Elektronikpraktikum, H. Pfeiffer, S. 55