

Laborprotokoll

der dritten Übung: DC-Messungen

Fachhochschule Vorarlberg

FTB-ELT-DU-1_2

Elektrotechnik Einführungslabor

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider
Raum/Arbeitsplatz: U130/PC01
Tag der Übungsdurchführung: 07.11.2018
Verfasser: David Zengerle

Egg, 27.11.18

U:

David Zengerle

Inhaltsverzeichnis

Darstellungsverzeichnis	III
Messgeräteverzeichnis	IV
1. Vorbereitung	1
1.1. Selbststudium	1
1.2. Empfohlene Vorbereitung (freiwillig)	2
1.3. Laborvorbereitung	3
2. Laborübung	8
2.1. Widerstandsmessung Glühlampe	8
2.1.1 Aufgabenstellung	8
2.1.2 Messschaltungen	8
2.1.2. Messtabelle	9
2.1.3 Statistische Auswertung	10
2.2. Kennlinienvermessung passive, nichtlineare Bauelemente	11
2.2.1 Aufgabenstellung	11
2.1.2 Messschaltung	11
2.1.3 Messtabellen	11
2.1.4 Kennlinie Siliziumdiode (1N40001); $I = f(U)$	12
2.1.5 Kennlinie weiße Leuchtdiode; $I = f(U)$	13
2.3. Kennlinienvermessung Batterie	14
2.3.1 Aufgabenstellung	14
2.3.2 Messschaltung	14
2.3.3 Messtabelle	14
2.3.4 Kennlinie $I=f(U)$	15
2.4. Kennlinienvermessung Solarmodul	17
2.4.1 Aufgabenstellung	17
2.4.2 Messschaltung	17
2.4.3 Messtabelle	17
2.4.4 Kennlinie $U=f(I)$	18
3. Abschließender Kommentar	19

Darstellungsverzeichnis

Abbildung 1	Gegenüberstellung des VZS und EZS bei Zweipolen (Quelle: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, Lehrveranstaltung Elektrotechnik Einführungslabor, 02_DCundMultimeter.pdf, S.7, November 2018).....	1
Abbildung 2	Gegenüberstellung der Leistung im VZS und EZS (Quelle: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, Lehrveranstaltung Elektrotechnik Einführungslabor, 02_DCundMultimeter.pdf, S.7, November 2018).....	1
Abbildung 3	Automatisierte Messunsicherheitsberechnung mittels Excel	2
Abbildung 4	Formeln und Tabellen zur Messunsicherheitsberechnung (Quelle: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, Lehrveranstaltung Elektrotechnik Einführungslabor, 01_Messtechnische Grundlagen.pdf, S.7-9, November 2018)	2
Abbildung 5	Mess- und Ersatzschaltung von Erzeuger- und Verbraucherzweipolen bei gleichzeitiger Strom- und Spannungsmessung	3
Abbildung 6	Berechnung des Widerstandswertes eines Zweipols, welcher bei einer spannungsrichtigen Messung eine systematische Messabweichung von 10% verursacht.....	4
Abbildung 7	Berechnung des Widerstandswertes eines Zweipols, welcher bei einer stromrichtigen Messung eine systematische Messabweichung von 10% verursacht.....	5
Abbildung 8	tabellarische Auflistung der Genauigkeit des Fluke 87 für verschiedene Gleichstrommessbereiche (Quelle: Fluke Coporation, 80 Series V Multimeters Bedienungshandbuch, S. 48, May 2004 Rev 1)	6
Abbildung 9	tabellarische Auflistung der Genauigkeit des Fluke 87 für verschiedene Gleichspannungsmessbereiche (Quelle: Fluke Coporation, 80 Series V Multimeters Bedienungshandbuch, S. 46, May 2004 Rev 1)	6
Abbildung 10	Berechnung der Vertrauensbereiche für das DMM Fluke 87 V innerhalb der Messbereiche in Aufgabe 2.....	6
Abbildung 11	tabellarische Auflistung der Genauigkeit des Keysight 34460A für verschiedene Gleichspannungs- und Gleichstrommessbereiche (Quelle: Agilent Technologies, Truevolt series Digital Multimeters Agilent 34461A/34460A, S. 8, April 5, 2013).....	7
Abbildung 12	Berechnung der Vertrauensbereiche für das DMM Keysight 34461A innerhalb der Messbereiche in Aufgabe 2.....	7
Abbildung 13	Ersatzschaltbild einer 2-Draht-Messung eines Widerstandes mittels Ohmmeter.....	8
Abbildung 14	Ersatzschaltbild einer 4-Draht-Messung eines Widerstandes mittels Ohmmeter.....	8
Abbildung 15	Ersatzschaltbild einer spannungsrichtigen U-I-Messung zur Widerstandsberechnung	9
Abbildung 16	Ersatzschaltbild einer stromrichtigen U-I-Messung zur Widerstandsberechnung	9
Abbildung 17	statistische Messauswertung von 5 Widerstandsmesswerten unter Excel (Quelle Vorlage: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, messunsicherheit.xlsx, November 2018).....	10

Abbildung 18 Messschaltung und Ersatzschaltbild einer spannungsrichtigen U-I-Messung einer Diode	11
Abbildung 19 Messtabelle U-I Messung einer Siliziumdiode (1N4001)	11
Abbildung 20 Messtabelle U-I Messung einer weißen Leuchtdiode	11
Abbildung 21 Kennlinie Siliziumdiode (1N4001); $I=f(U)$	12
Abbildung 22 Kennlinie weiße Leuchtdiode; $I=f(U)$	13
Abbildung 23 Messschaltung und Ersatzschaltbild einer spannungsrichtigen U-I-Messung einer AA-Batterie.....	14
Abbildung 24 Messtabelle U-I Messung einer AA-Batterie.....	14
Abbildung 25 Kennlinie AA-Batterie; $I=f(U)$	15
Abbildung 26 Ermittlung des Innenwiderstands der AA-Batterie über eine Interpolierte Kennliniensteigung.....	15
Abbildung 27 veranschaulichte Dartstellung des Spannungsquellenverhalten der AA-Batterie im I-U-Diagramm	15
Abbildung 28 Messschaltung und Ersatzschaltbild einer spannungsrichtigen I-U-Messung eines Solarmoduls	17
Abbildung 29 Messtabelle I-U-Messung eines Solarmoduls inkl. Berechnung der jeweiligen durch das Solarmodul abgegeben Leistung zum Messzeitpunkt	17
Abbildung 30 Kennlinie Solarmodul; $U=f(I)$; $P=f(I)$	18
Abbildung 31 Vergleichskennlinie eines baugleichen Solarmoduls, gemessen mit höherer Beleuchtungsstärke; $U=f(I)$; $P=f(I)$	18

Messgeräteverzeichnis

Für alle folgenden Spannungsmessungen wurde das DMM Keysight 33461A verwendet.

Für alle Strommessungen das DMM Fluke 87 V.

1. Vorbereitung

1.1. Selbststudium

- zum Thema Zählpfeilsysteme:
Man unterscheidet zwischen Erzeuger- und Verbraucherzählpfeilsystem.

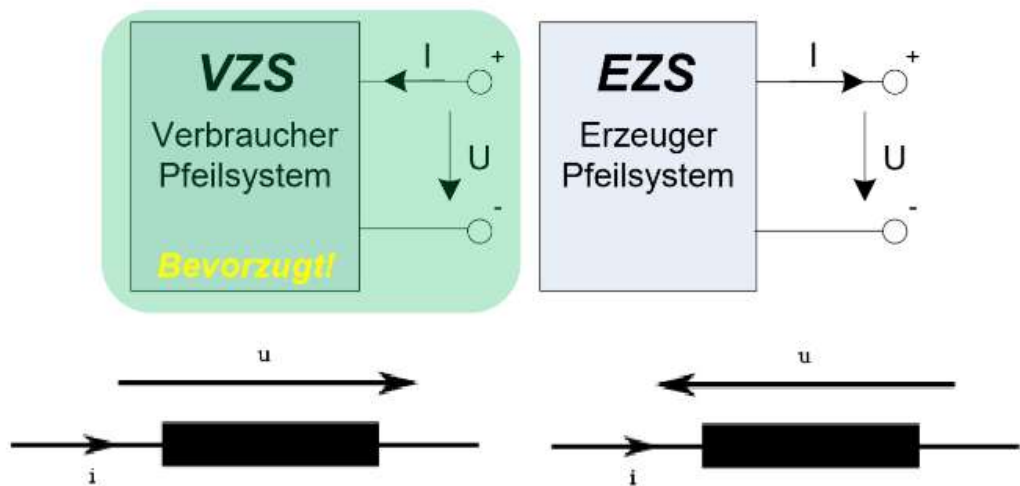


Abbildung 1 Gegenüberstellung des VZS und EZS bei Zweipolen (Quelle: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, Lehrveranstaltung Elektrotechnik Einführungslabor, 02_DCundMultimeter.pdf, S.7, November 2018)

Die gewählte Stromrichtung ist abhängig vom Zählpfeilsystem:

Beim Verbraucher-Zählpfeilsystem fließt der Strom in Spannungsrichtung.

Beim Erzeuger-Zählpfeilsystem fließt der Strom gegen die Spannungsrichtung.

Dadurch ergibt sich, dass im Erzeugersystem erzeugte Leistungen positiv und verbrauchte Leistung negativ gezählt wird. Im Gegensatz dazu wird im Verbraucherzählpfeilsystem verbrauchte Leistung positiv und erzeugte negativ gezählt. Siehe dazu folgende Tabelle:

Spannung U	Strom I	Leistung $P = U \cdot I$	VZS	EZS
10 V	1 A	10 W	Verbraucher	Erzeuger
-10 V	1 A	-10 W	Erzeuger	Verbraucher
10 V	-1 A	-10 W	Erzeuger	Verbraucher
-10 V	-1 A	10 W	Verbraucher	Erzeuger

Abbildung 2 Gegenüberstellung der Leistung im VZS und EZS (Quelle: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, Lehrveranstaltung Elektrotechnik Einführungslabor, 02_DCundMultimeter.pdf, S.7, November 2018)

- zum Thema strom- und spannungsrichtiger Messung:
Eine gleichzeitige Strom- und Spannungsmessung verursacht eine systematische Messabweichung.

Stromrichtige Messung: Der durch die Messgröße fließende wahre Stromwert wird vom Amperemeter angezeigt. Der Wert der Spannungsmessung beinhaltet eine systematische Messabweichung.

Spannungsrichtige Messung: Der an der Messgröße anliegende wahre Spannungswert wird durch das Voltmeter angezeigt. Der angezeigte Stromwert des Amperemeters beinhaltet eine systematische Messabweichung

1.2. Empfohlene Vorbereitung (freiwillig)

- Automatisierte Messunsicherheitsberechnung mittels Excel (für 5 Messwerte)

	A	B	C	D	E	F
1	#	Messwerte				
2	1	5,78				
3	2	5,79				
4	3	5,64				
5	4	5,82				
6	5	5,77				
7						
8	Mittelwert	5,76	=MITTELWERT(B2:B6)			
9	Varianz	0,00485	=VARIANZ(B2:B6)			
10	Standardabweichung	0,06964194	=STABW.S(B2:B6)			
11	t aus Tabelle	2,8				
12	Vertrauensbereich	5,76 ±	0,0872	=B11*B10/WURZEL(A6)		
13	Messunsicherheit k = 2	5,76 ±	0,1744	=D12*2		

Abbildung 3 Automatisierte Messunsicherheitsberechnung mittels Excel

Verwendete Formeln und Tabellen:

α				empirische Varianz	$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
n	68,3%	95%	99,7%	Mittelwert	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
3	1,32	4,3	19,2	$Ergebnis = \bar{x} \pm \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s$	
5	1,15	2,8	6,6		
10	1,06	2,3	4,1		
100	1,00	2,0	3,1		

Abbildung 4 Formeln und Tabellen zur Messunsicherheitsberechnung (Quelle: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, Lehrveranstaltung Elektrotechnik Einführungslabor, 01_Messtechnische Grundlagen.pdf, S.7-9, November 2018)

1.3. Laborvorbereitung

- Aufgabe 1: Mess- und Ersatzschaltung von Erzeuger- und Verbraucherzweipolen bei gleichzeitiger Strom- und Spannungsmessung**

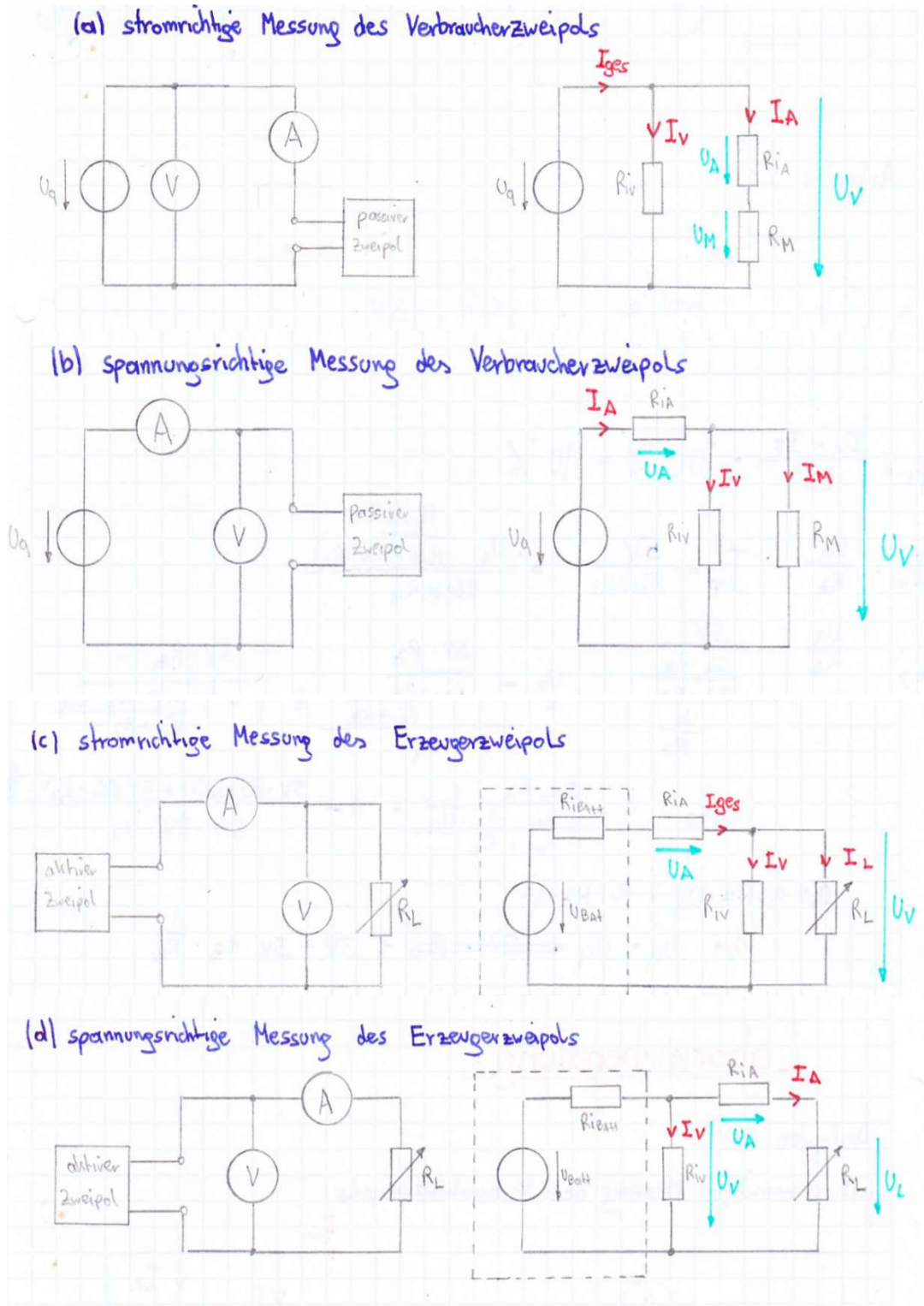


Abbildung 5 Mess- und Ersatzschaltung von Erzeuger- und Verbraucherzweipolen bei gleichzeitiger Strom- und Spannungsmessung

- **Aufgabe 2: Widerstandswert eines Zweipols der bei einer strom- bzw. spannungsrichtigen Messung eine systematische Messabweichung von 10% verursacht.**

Es gilt: $R_{\text{Amperemeter}} = 100\Omega$, $R_{\text{Voltmeter}} = 10\text{M}\Omega$, $U_{\text{Voltmeter}} = 5\text{V}$

Spannungsrichtige Messung:

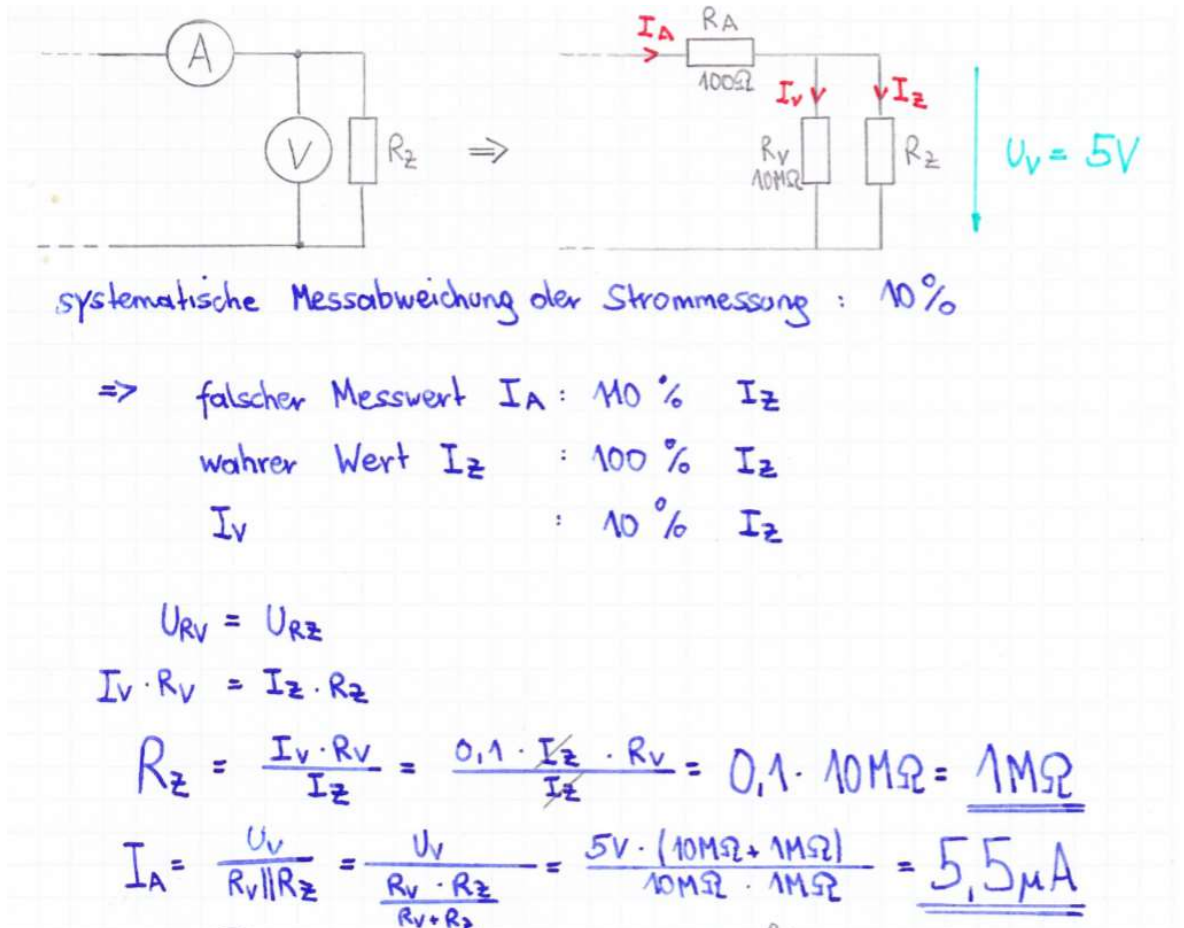


Abbildung 6 Berechnung des Widerstandswertes eines Zweipols, welcher bei einer spannungsrichtigen Messung eine systematische Messabweichung von 10% verursacht

Da sich der Gesamtstrom des Amperemeters gemäß dem Ohm'schen Gesetzes auf die beiden Widerstände R_V und R_Z aufteilt, fließt bei einem höheren Widerstand R_Z mehr Strom über R_V .

Das bedeutet der „Fehlerstrom“ über I_Z wird größer und somit auch die relative Messabweichung.

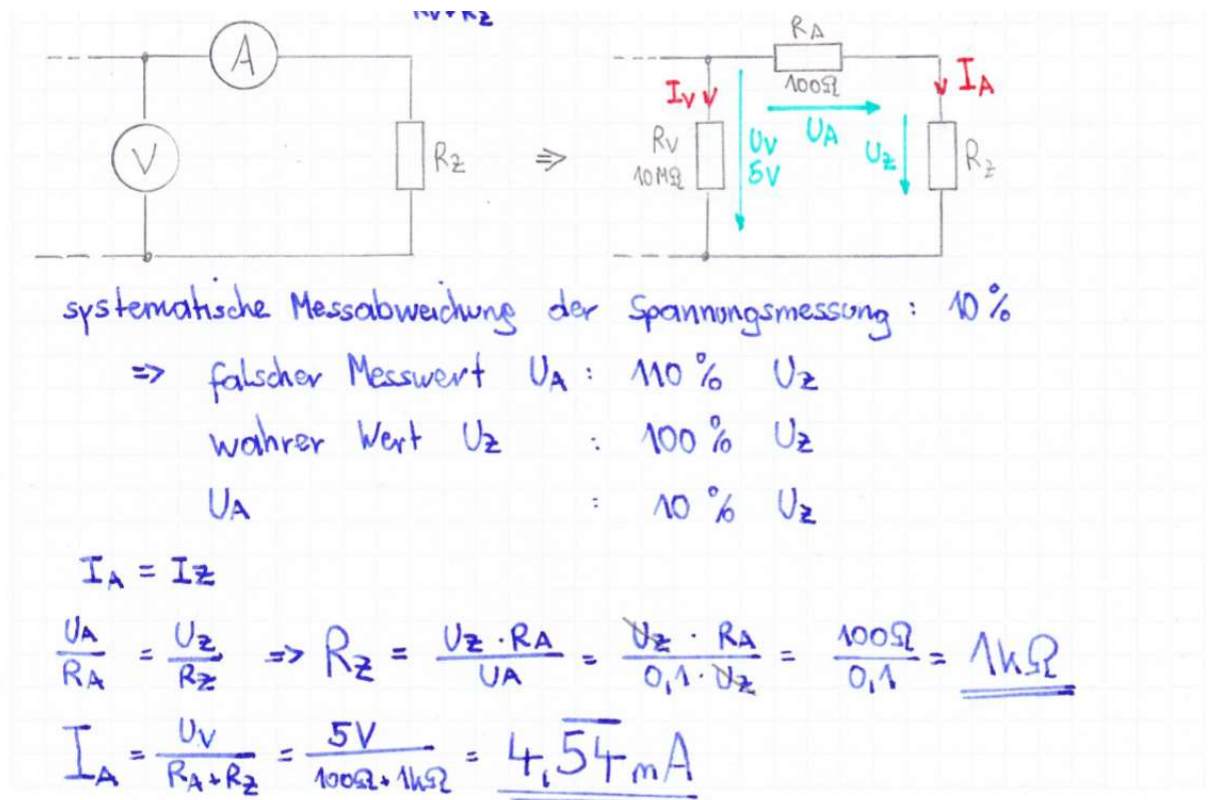
Stromrichtige Messung:

Abbildung 7 Berechnung des Widerstandswertes eines Zweipols, welcher bei einer stromrichtigen Messung eine systematische Messabweichung von 10% verursacht

Hier verhalten sich die Spannungen an R_A und R_Z gemäß dem Ohm'schen Gesetz. Die Spannungsaufteilung der 5V zwischen R_V und R_Z ist abhängig von deren Verhältnis. Wird der Widerstand R_Z vergrößert, verkleinert sich der Spannungsabfall an R_A . Damit ist die „Fehlervoltage“ an R_A kleiner und somit auch die relative Messabweichung.

• **Aufgabe 3: Angabe der Vertrauensbereiche für die DMM Fluke 87 V und Keysight 34461A innerhalb der Messbereiche in Aufgabe 2**

Ermittlung des Vertrauensbereichs:

$\pm([\% \text{ des angezeigten Messgerätwertes}] + [n \cdot 1 \text{ Digit}])$

1 Digit entspricht der Auflösung des Messbereiches

Fluke 87 V:

Funktion	Bereich	Auflösung	Genauigkeit	
			Modell 83	Modell 87
\overline{V}	6,000 V	0,001 V	$\pm (0,1 \% + 1)$	$\pm (0,05 \% + 1)$
	60,00 V	0,01 V	$\pm (0,1 \% + 1)$	$\pm (0,05 \% + 1)$
	600,0 V	0,1 V	$\pm (0,1 \% + 1)$	$\pm (0,05 \% + 1)$
	1000 V	1 V	$\pm (0,1 \% + 1)$	$\pm (0,05 \% + 1)$
\overline{mV}	600,0 mV	0,1 mV	$\pm (0,3 \% + 1)$	$\pm (0,1 \% + 1)$

Abbildung 9 tabellarische Auflistung der Genauigkeit des Fluke 87 für verschiedene Gleichspannungsmessbereiche (Quelle: Fluke Coporation, 80 Series V Multimeters Bedienungshandbuch, S. 46, May 2004 Rev 1)

Funktion	Bereich	Auflösung	Genauigkeit		Bürdenspannung (typisch)
			Model 83 ¹	Model 87 ^{2, 3}	
mA $\text{A} \sim$ (45 Hz bis 2 kHz)	60,00 mA	0,01 mA	$\pm (1,2 \% + 2)^5$	$\pm (1,0 \% + 2)$	1,8 mV/mA
	400,0 mA ⁶	0,1 mA	$\pm (1,2 \% + 2)^5$	$\pm (1,0 \% + 2)$	1,8 mV/mA
	6,000 A	0,001 A	$\pm (1,2 \% + 2)^5$	$\pm (1,0 \% + 2)$	0,03 V/A
	10,00 A ⁴	0,01 A	$\pm (1,2 \% + 2)^5$	$\pm (1,0 \% + 2)$	0,03 V/A
mA $\text{A} \overline{\sim}$	60,00 mA	0,01 mA	$\pm (0,4 \% + 4)$	$\pm (0,2 \% + 4)$	1,8 mV/mA
	400,0 mA ⁶	0,1 mA	$\pm (0,4 \% + 2)$	$\pm (0,2 \% + 2)$	1,8 mV/mA
	6,000 A	0,001 A	$\pm (0,4 \% + 4)$	$\pm (0,2 \% + 4)$	0,03 V/A
	10,00 A ⁴	0,01 A	$\pm (0,4 \% + 2)$	$\pm (0,2 \% + 2)$	0,03 V/A
$\mu\text{A} \sim$ (45 Hz bis 2 kHz)	600,0 μA	0,1 μA	$\pm (1,2 \% + 2)^5$	$\pm (1,0 \% + 2)$	100 $\mu\text{V}/\mu\text{A}$
	6000 μA	1 μA	$\pm (1,2 \% + 2)^5$	$\pm (1,0 \% + 2)$	100 $\mu\text{V}/\mu\text{A}$
$\mu\text{A} \overline{\sim}$	600,0 μA	0,1 μA	$\pm (0,4 \% + 4)$	$\pm (0,2 \% + 4)$	100 $\mu\text{V}/\mu\text{A}$
	6000 μA	1 μA	$\pm (0,4 \% + 2)$	$\pm (0,2 \% + 2)$	100 $\mu\text{V}/\mu\text{A}$

Abbildung 8 tabellarische Auflistung der Genauigkeit des Fluke 87 für verschiedene Gleichstrommessbereiche (Quelle: Fluke Coporation, 80 Series V Multimeters Bedienungshandbuch, S. 48, May 2004 Rev 1)

Fluke 87 V:

$$5V (6V\text{-Bereich}): \pm(0,05\% + 1) = \pm\left(\frac{5V \cdot 5}{10000} + 0,001V\right) = \pm 3,5mV = \pm \frac{3,5mV}{5V} \cdot 100\% = \pm 0,07\%$$

$$5,5\mu A: \pm(0,2\% + 4) = \pm\left(\frac{5,5\mu A \cdot 2}{1000} + 0,4\mu A\right) = \pm 0,41\mu A = \pm \frac{0,41\mu A}{5,5\mu A} \cdot 100\% = \pm 7,47\%$$

$$5mA: \pm(0,2\% + 2) = \pm\left(\frac{5mA \cdot 2}{1000} + 2\mu A\right) = \pm 12\mu A = \pm \frac{12\mu A}{5mA} \cdot 100\% = \pm 0,24\%$$

Abbildung 10 Berechnung der Vertrauensbereiche für das DMM Fluke 87 V innerhalb der Messbereiche in Aufgabe 2

Keysight 34461A:

Range ² /frequency	24 hour ³ I _{CAI} ± 1 °C	90 day I _{CAI} ± 5 °C	1 year I _{CAI} ± 5 °C	2 year I _{CAI} ± 5 °C	Temperature coefficient/°C ⁴	
DC voltage						
100 mV	0.0040 + 0.0060	0.0070 + 0.0065	0.0090 + 0.0065	0.0115 + 0.0065	0.0005 + 0.0005	
1 V	0.0030 + 0.0009	0.0060 + 0.0010	0.0080 + 0.0010	0.0105 + 0.0010	0.0005 + 0.0001	
10 V	0.0025 + 0.0004	0.0050 + 0.0005	0.0075 + 0.0005	0.0100 + 0.0005	0.0005 + 0.0001	
100 V	0.0030 + 0.0006	0.0065 + 0.0006	0.0085 + 0.0006	0.0110 + 0.0006	0.0005 + 0.0001	
1000 V	0.0030 + 0.0006	0.0065 + 0.0010	0.0085 + 0.0010	0.0110 + 0.0010	0.0005 + 0.0001	
True RMS AC voltage ^{2,5,6}						
100 mV, 1 V, 10 V, 100 V, and 750 V ranges						
3 – 5 Hz	1.00 + 0.02	1.00 + 0.03	1.00 + 0.03	1.00 + 0.03	0.100 + 0.003	
5 – 10 Hz	0.38 + 0.02	0.38 + 0.03	0.38 + 0.03	0.38 + 0.03	0.035 + 0.003	
10 Hz – 20 kHz	0.07 + 0.02	0.08 + 0.03	0.09 + 0.03	0.10 + 0.03	0.005 + 0.003	
20 – 50 kHz	0.13 + 0.04	0.14 + 0.05	0.15 + 0.05	0.16 + 0.05	0.011 + 0.005	
50 – 100 kHz	0.58 + 0.08	0.63 + 0.08	0.63 + 0.08	0.63 + 0.08	0.060 + 0.008	
100 – 300 kHz	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.200 + 0.020	
Resistance ⁷						
Test current						
100 Ω	1 mA	0.0040 + 0.0060	0.011 + 0.007	0.014 + 0.007	0.017 + 0.007	0.0006 + 0.0005
1 kΩ	1 mA	0.0030 + 0.0008	0.011 + 0.001	0.014 + 0.001	0.017 + 0.001	0.0006 + 0.0001
10 kΩ	100 μA	0.0030 + 0.0005	0.011 + 0.001	0.014 + 0.001	0.017 + 0.001	0.0006 + 0.0001
100 kΩ	10 μA	0.0030 + 0.0005	0.011 + 0.001	0.014 + 0.001	0.017 + 0.001	0.0006 + 0.0001
1 MΩ	5 μA	0.0030 + 0.0010	0.011 + 0.001	0.014 + 0.001	0.017 + 0.001	0.0010 + 0.0002
10 MΩ	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 + 0.001	0.060 + 0.001	0.0030 + 0.0004
100 MΩ	500 nA 10 MΩ	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.1500 + 0.0002
DC current						
Burden voltage						
100 μA	<0.011 V	0.010 + 0.020	0.040 + 0.025	0.050 + 0.025	0.060 + 0.025	0.0020 + 0.0030
1 mA	<0.11 V	0.007 + 0.006	0.030 + 0.006	0.050 + 0.006	0.060 + 0.006	0.0020 + 0.0005
10 mA	<0.05 V	0.007 + 0.020	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.060 + 0.020	0.0020 + 0.0020
100 mA	<0.5 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.060 + 0.005	0.0020 + 0.0005
1 A	<0.7 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.120 + 0.010	0.0050 + 0.0010
3 A	<2.0 V	0.180 + 0.020	0.200 + 0.020	0.200 + 0.020	0.230 + 0.020	0.0050 + 0.0020

Abbildung 11 tabellarische Auflistung der Genauigkeit des Keysight 34460A für verschiedene Gleichspannungs- und Gleichstrommessbereiche (Quelle: Agilent Technologies, Truevolt series Digital Multimeters Agilent 34461A/34460A, S. 8, April 5, 2013)

Keysight 34461A:

$$5V: \pm(0,01\% + 0,0005\%) = \pm\left(\frac{5V}{10000} + \frac{10V \cdot 5}{1000000}\right) = \pm 0,55mV = \pm \frac{0,55mV}{5V} \cdot 100\% = \pm 0,11\%$$

$$5,5mA: \pm(0,06\% + 0,025\%) = \pm\left(\frac{5,5mA \cdot 6}{10000} + \frac{100mA \cdot 2,5}{10000}\right) = \pm 0,028mA = \pm \frac{0,028mA}{5,5mA} \cdot 100\% = \pm 0,51\%$$

$$5mA: \pm(0,06\% + 0,02\%) = \pm\left(\frac{5mA \cdot 6}{10000} + \frac{10mA \cdot 2}{10000}\right) = \pm 5\mu A = \pm \frac{5\mu A}{5mA} \cdot 100\% = \pm 0,1\%$$

Abbildung 12 Berechnung der Vertrauensbereiche für das DMM Keysight 34461A innerhalb der Messbereiche in Aufgabe 2

Interpretation der Ergebnisse:

Die systematische Messabweichung ist abhängig vom Verhältnis und der Schaltungsweise der Innenwiderstände des Volt- bzw. Amperemeters zum Messwiderstand. Bei stromrichtiger Messung liegt eine Serienschaltung, bei spannungsrichtiger Messung eine Parallelschaltung zwischen Innenwiderstand und Messwiderstand vor.

Somit sollte bei hochohmigen Widerständen eher stromrichtig (R_i des Voltmeters ist im Verhältnis zum Messwiderstand vernachlässigbar) und bei niederohmigen eher spannungsrichtig gemessen werden (R_i des Voltmeters ist im Verhältnis zum Messwiderstand vernachlässigbar).

Ein Sonderfall bildet das Laboratorium: Da hier oft mit niedrigen Spannungen gearbeitet wird, sind auch die resultierenden Ströme entsprechend niedrig. Das Multimeter Fluke 87 V hatte oben beispielsweise im 600 μA Messbereich eine Messunsicherheit von ±7,5%. Diese große Unsicherheit ergibt sich, da die Strommessung im Prinzip eine Spannungsmessung am R_i des Amperemeters ist. Sehr kleine Ströme haben auch kleine Spannungen am Innenwiderstand des Amperemeters zur Folge. Diese niedrigen Spannungen können nur mit entsprechenden Fehlern erfasst und verstärkt werden. Daher kann im Labor meist eine spannungsrichtige Messung empfohlen werden.

2. Laborübung

2.1. Widerstandsmessung Glühlampe

2.1.1 Aufgabenstellung

- Ermitteln Sie den Widerstand des Lampendrahtes einer Glühlampe über verschiedenen Methoden mit verschiedenen Messgeräten.

2.1.2 Messschaltungen

Direkte Widerstandsmessung mit einem Ohmmeter (2-Draht-Messung):

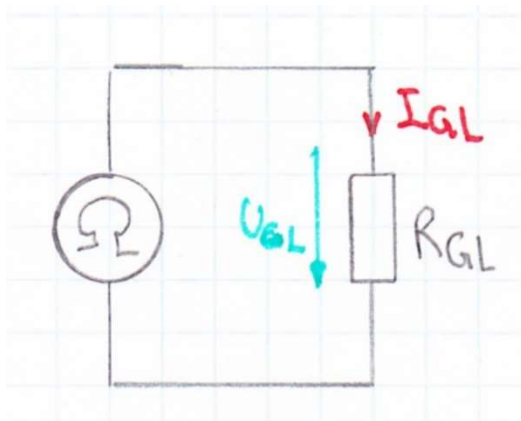


Abbildung 13 Ersatzschaltbild einer 2-Draht-Messung eines Widerstandes mittels Ohmmeter

Direkte Widerstandsmessung mit einem Ohmmeter (4-Draht-Messung):

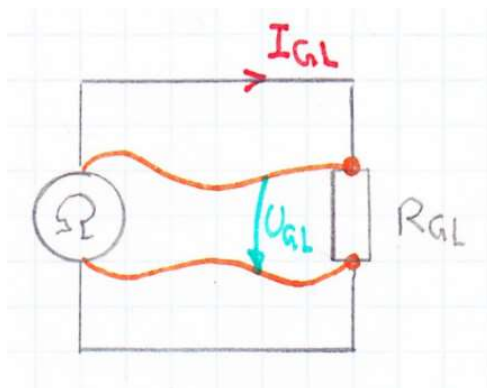


Abbildung 14 Ersatzschaltbild einer 4-Draht-Messung eines Widerstandes mittels Ohmmeter

**Indirekte Widerstandsbestimmung mittels Strom- und Spannungsmessung:
(spannungsrichtige Messung, $U_q = 0,2V$)**

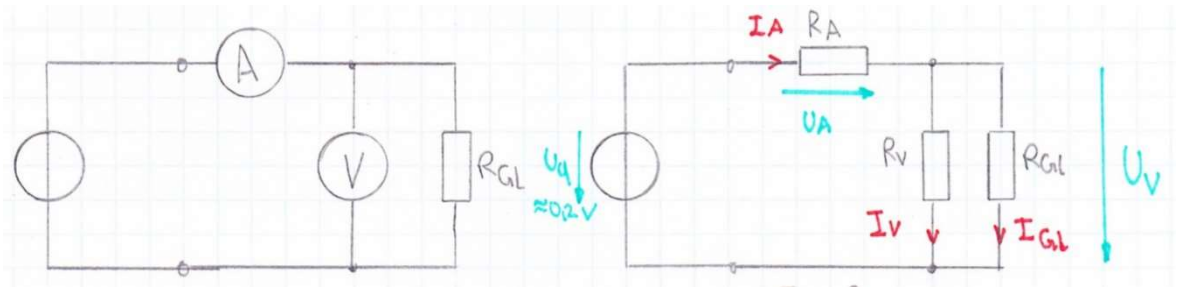


Abbildung 15 Ersatzschaltbild einer spannungsrichtigen U-I-Messung zur Widerstandsbestimmung

**Indirekte Widerstandsbestimmung mittels Strom- und Spannungsmessung:
(stromrichtige Messung, $U_q = 0,5V$)**

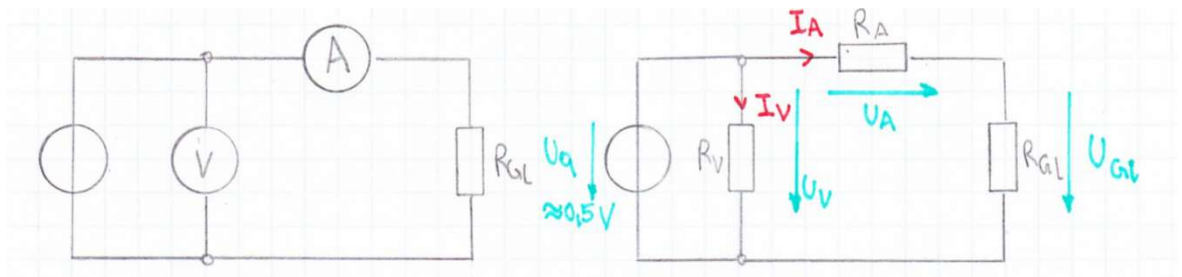


Abbildung 16 Ersatzschaltbild einer stromrichtigen U-I-Messung zur Widerstandsbestimmung

2.1.2. Messtabelle

Widerstandsmessung Glühlampe			
	RL in Ohm		
Handmultimeter Fluke 87 V	11,4		
Tischmultimeter Keysight 34461A - 2 Drahtmessung	11,354		
Tischmultimeter Keysight 34461A - 4 Drahtmessung	11,32		
	I in mA	U in V	RL in Ohm ($R=U/I$)
Indirekte Messung - spannungsrichtig	10,5	0,178	16,95238
Indirekte Messung - stromrichtig	16,1	0,497	30,86957

Die Widerstandswerte weichen stark voneinander ab. Ursache hierfür ist die Nichtlinearität des Drahtwiderstandes der Glühlampe.

2.1.3 Statistische Auswertung

Berechnung der Messunsicherheit und des Vertrauensbereiches aus den 5 Messwerten der Widerstandsmessung unter aus Kapitel 2.1.2 Messtabelle:

	Messabweichung	quadratische
Messwerte	(zu Mittelwert)	Messabweichung
11,4	-4,9788	24,78844944
11,354	-5,0248	25,24861504
11,32	-5,0588	25,59145744
16,95	0,5712	0,32626944
30,87	14,4912	209,9948774

MITTELWERT
16,3788

empirische Varianz
71,4874172

Anzahl der
Messungen
5

Standardabw.
8,455023193

Parameter t-Verteilung (aus Tabelle)	Vertrauensbereich	
2,8 bei 95%	10,5873637	absolut
	64,64065562	in %
	min Wert	max. Wert
	5,791436297	26,9661637
Messunsicherheit:	21,17472741	absolut
(k=2)	129,2813112	in %

Abbildung 17 statistische Messauswertung von 5 Widerstandsmesswerten unter Excel (Quelle Vorlage: Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, messunsicherheit.xlsx, November 2018)

Die Messunsicherheit beträgt ca. 130%. Dieser Wert ist sehr hoch und spiegelt wieder, dass die Messung wenig Aussagekraft besitzt. Konkret liegt der Erwartungswert mit 95% innerhalb des Vertrauensbereiches von 16,3788Ohm \pm 10,59Ohm. Mit zusätzlichem Korrekturfaktor kommt man auf eine Messunsicherheit von 16,3788Ohm \pm 21,17Ohm. Auch hier ist die Ursache die Nichtlinearität des Lampendrahtes der Glühlampe. Diese macht eine reproduzierbare Messung unter verschiedenen Bedingungen nicht möglich.

Die zur Berechnung benötigten Formeln und Tabellen sind unter 1.2. Empfohlene Vorbereitung (freiwillig) ersichtlich.

2.2. Kennlinienvermessung passive, nichtlineare Bauelemente

2.2.1 Aufgabenstellung

Messen und zeichnen Sie die Spannungs- Stromkennlinie einer Siliziumdiode (1N4001) und einer weißen Leuchtdiode. Dabei darf ein maximaler Strom von $\pm 200\text{mA}$ und eine maximale Spannung von $\pm 10\text{V}$ nicht überschritten werden.

2.1.2 Messschaltung

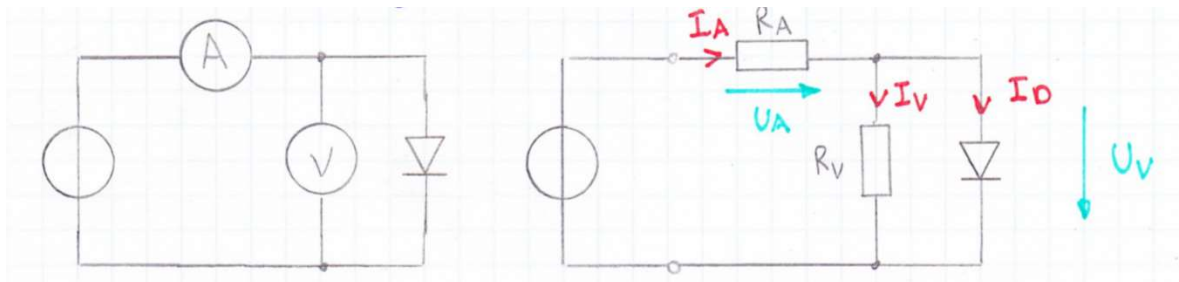


Abbildung 18 Messschaltung und Ersatzschaltbild einer spannungsrichtigen U-I-Messung einer Diode

2.1.3 Messtabellen

Siliziumdiode (1N4001); $I=f(U)$		
Uq in V	U in V	I in mA
-10	-10	-0,02
-5	-5	-0,02
0	0	0,02
0,1	0,0986	0,02
0,3	0,293	0,02
0,5	0,493	0,19
0,6	0,593	1,35
0,65	0,639	3,5
0,7	0,682	8,68
0,75	0,71	15,9
0,8	0,737	28,58
1	0,792	98,6
1,2	0,822	187,4
1,24	0,82	200

Abbildung 19 Messtabelle U-I Messung einer Siliziumdiode (1N4001)

weiße Leuchtdiode; $I=f(U)$		
Uq in V	U in V	I in mA
-8,55	-8,14	-197,3
-8	-7,837	-80,4
-7,9	-7,756	-57,4
-7,8	-7,724	-36,4
-7,7	-7,669	-16,64
-7,5	-7,5	0,06
-5	-5	0,02
0	0	0,02
1	1	0,02
2	2	0,02
2,4	2,39	0,09
2,5	2,498	0,58
2,6	2,591	4,45
2,7	2,657	19,41
2,8	2,699	44,8
2,9	2,731	76,7
3	2,757	111,8
5	2,806	199,3

Abbildung 20 Messtabelle U-I Messung einer weißen Leuchtdiode

2.1.4 Kennlinie Siliziumdiode (1N40001); $I = f(U)$

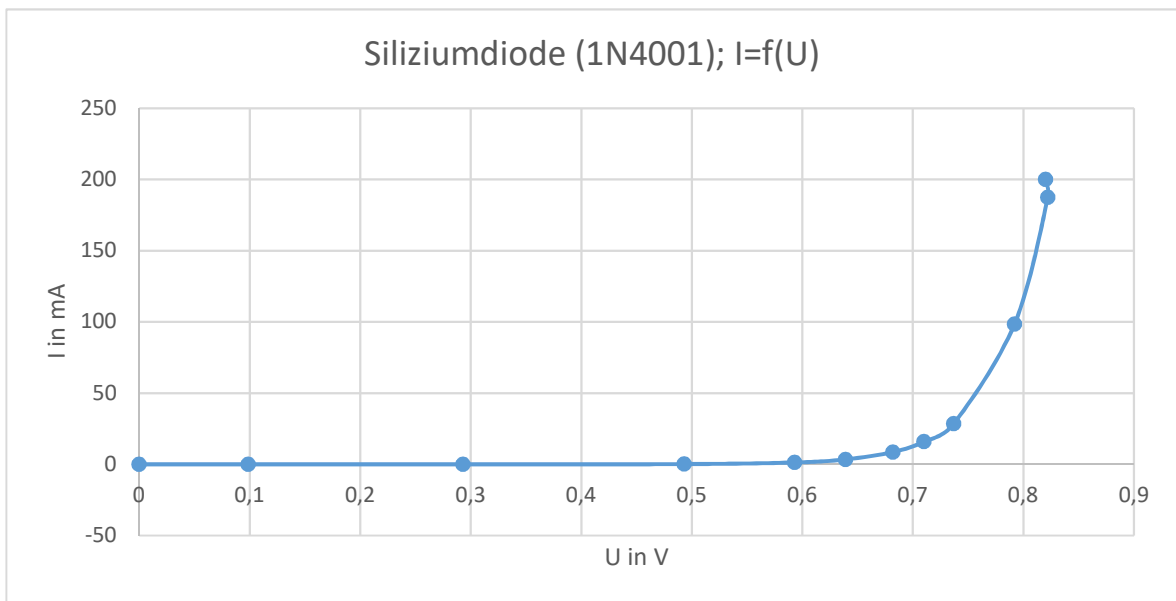


Abbildung 21 Kennlinie Siliziumdiode (1N40001); $I=f(U)$

Zur besseren Lesbarkeit des Diagrammes wurden die Werte $I(-5)$ und $I(-10)$ nicht dargestellt. Die Kennlinie zeigt ein „klassisches Diodenverhalten“ für einfache Dioden. Negative Spannungen werden gesperrt (Sperrspannung). Ab einer Spannung von 0,6V bis 0,7V wird die Diode leitend (Durchlassspannung, Schwellenspannung) und zeigt danach ein lineares Verhalten.

Der letzte Messwert $I(0,82)$ ist ein Messfehler bzw. Ablesefehler. Die Kennlinie sollte progressiv weiterverlaufen.

2.1.5 Kennlinie weiße Leuchtdiode; $I = f(U)$

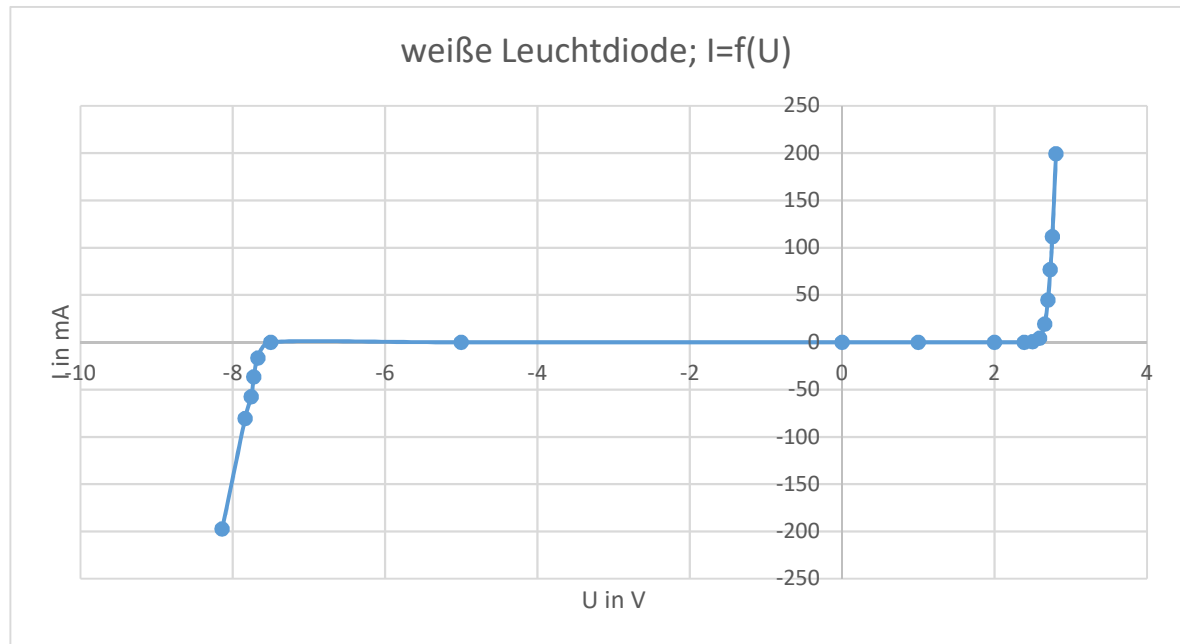


Abbildung 22 Kennlinie weiße Leuchtdiode; $I=f(U)$

In Durchlassrichtung zeigt die weiße Leuchtdiode ein ähnliches Verhalten wie die Siliziumdiode. Für die Herstellung von Leuchtdioden werden andere Halbleitermaterialien als Silizium verwendet. Daher stellt sich auch eine andere Schleienspannung als bei der Siliziumdiode ein. (laut Messung ca. 2,5-2,6 V)

In Sperrrichtung bricht die Leuchtdiode bei einer Spannung von ca. -7,5V durch und wird leitend. Die meisten Dioden sind für den Betrieb in Sperrrichtung nicht ausgelegt. Da der Sperrstrom sehr schnell ansteigt und durch die hohe Spannung an der Diode eine hohe Leistung umgesetzt wird, besteht die Gefahr der Zerstörung des Bauteils.

Eine für den Sperrbetrieb ausgelegte Diode ist z.B. die Zener-Diode. Mit ihr werden einfache Spannungsstabilisierungen realisiert.

2.3. Kennlinienvermessung Batterie

2.3.1 Aufgabenstellung

Messen und Zeichnen Sie die Strom- Spannungskennlinie einer AA – Batterie. Dabei darf ein maximaler Strom von 500mA nicht überschritten werden. „Bedenken Sie auch, dass chemisch basierte Effekte einen zeitlichen Verlauf haben! Belasten Sie daher die Batterie immer nur kurz für die Messung!“¹

2.3.2 Messschaltung

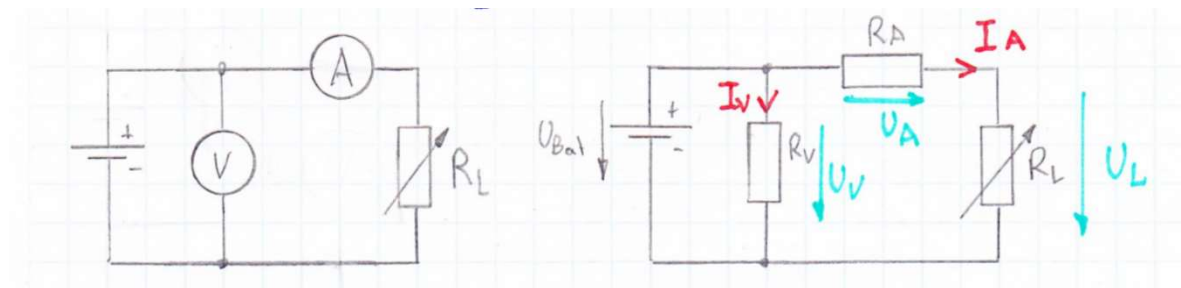


Abbildung 23 Messschaltung und Ersatzschaltbild einer spannungsrichtigen U-I-Messung einer AA-Batterie

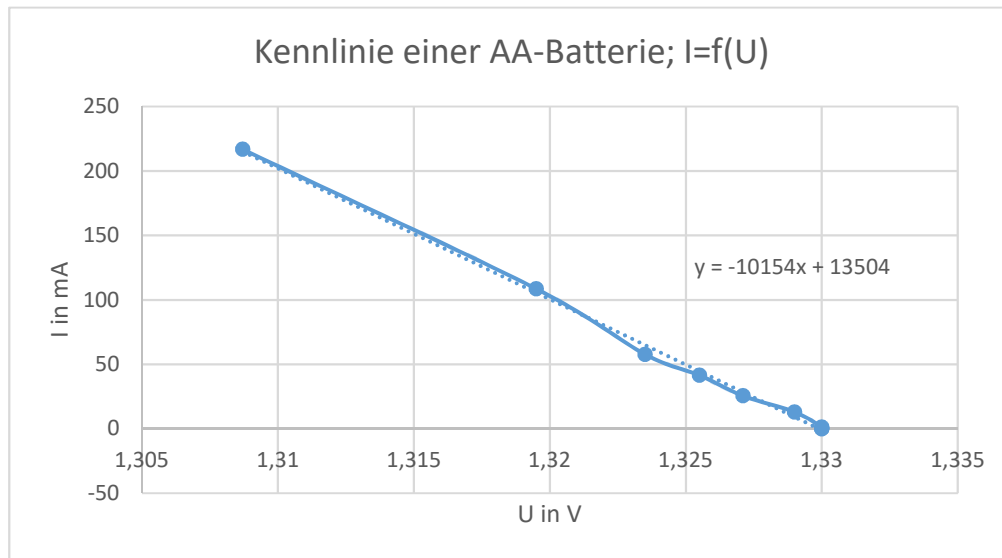
2.3.3 Messtabelle

Kennlinie einer AA-Batterie; $I=f(U)$		
RL in Ohm	U in V	I in mA
unendlich (100k)	1,33	0,03
10k	1,33	0,15
1k	1,33	1,35
100	1,329	13
50	1,3271	25,57
30	1,3255	41,52
20	1,3235	57,75
10	1,3195	108,6
4	1,3087	216,8

Abbildung 24 Messtabelle U-I Messung einer AA-Batterie

¹Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Schneider, Aufgabenstellung Labor 3, Lab3.pdf, S. 3, November 2018

2.3.4 Kennlinie $I=f(U)$

Abbildung 25 Kennlinie AA-Batterie; $I=f(U)$

Betrag der Steigung der Interpolation	10154	= Leitwert der Batterie in mS
Innenwiderstand (Kehrwert Leitwert)	0,098483	Ohm
	98,48	mOhm
Leerlaufspannung	1,33	V

Abbildung 26 Ermittlung des Innenwiderstands der AA-Batterie über eine Interpolierte Kennliniensteigung

Bei der Batterie handelt es sich um eine reale Spannungsquelle.

Die ermittelte $I=f(U)$ -Kennlinie ist fast eine Gerade, deren Steigung vom Innenwiderstand der Batterie abhängig ist. Aus der Interpolation ergibt sich ein Leitwert von 10154mS und somit über den Kehrwert ein Innenwiderstand von ca. 100mOhm. Dieser Wert ist sehr gut. Was bedeutet, dass die Spannung der Batterie im betrachteten Bereich kaum einbricht und nahezu konstant ist. Siehe folgendes Diagramm:

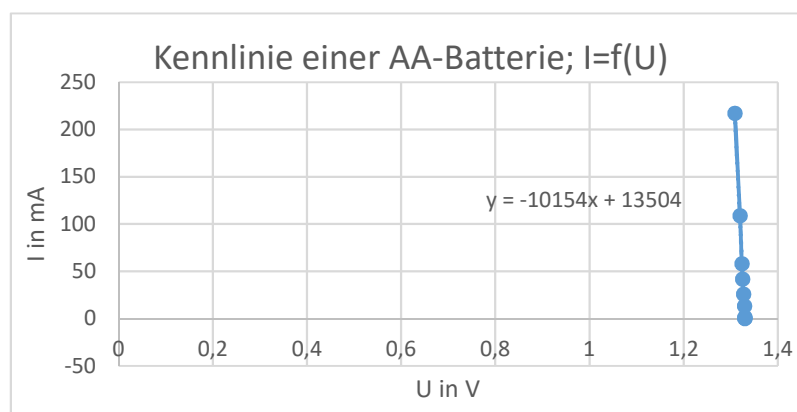


Abbildung 27 veranschaulichte Dartstellung des Spannungsquellenverhalten der AA-Batterie im I-U-Diagramm

Es ist anzunehmen, dass der Einbruch der Spannung mit zunehmendem Alter (und regelmäßiger Belastung) der Batterie größer wird. Aus elektrischer Sicht steigt somit auch der Innenwiderstand. Das bedeutet die Batterie kann ab einem bestimmten Zeitpunkt, z.B. in einem Gerät, die Mindestspannung für den benötigten Versorgungsstrom nicht mehr halten und wird somit unbrauchbar.

Der Kurzschlusspunkt der Kennlinie wurde bewusst nicht gemessen, da dort die thermische Belastung sehr groß ist. Es besteht die Gefahr der thermischen Zerstörung der Batterie

2.4. Kennlinienvermessung Solarmodul

2.4.1 Aufgabenstellung

Stellen Sie die den Verlauf einer Solarzellenspannung in Abhängigkeit zum Belastungsstrom in einem Diagramm dar. Aus der ermittelten Spannungs- Stromkennlinie lässt sich ein $P=f(I)$ Diagramm berechnen. Stellen Sie beide Kennlinien in einem Diagramm dar.

2.4.2 Messschaltung

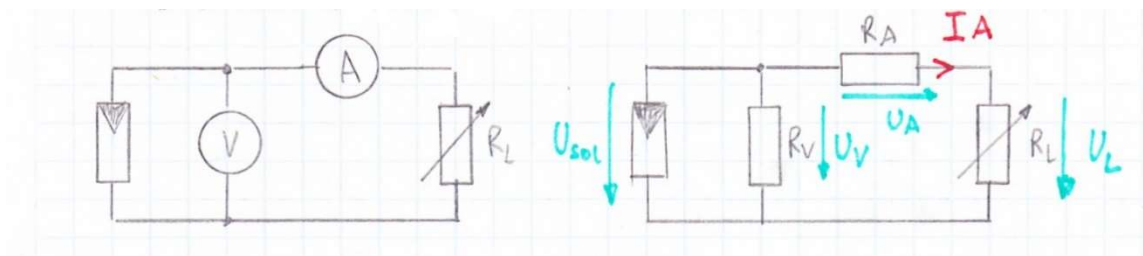


Abbildung 28 Messschaltung und Ersatzschaltbild einer spannungsrichtigen I-U-Messung eines Solarmoduls

2.4.3 Messtabelle

Kennlinie des Solarmoduls; $U=f(I)$; $P=f(I)$				
eingestellt	gemessen		berechnet $P=U \cdot I$	
R_L in Ohm	I in μA	U in V	P in W	P in mW
unendlich (900k)	7,5	6,62	4,97E-05	0,050
200k	30	6,134	0,000184	0,184
150k	39,3	5,862	0,00023	0,230
100k	54	5,391	0,000291	0,291
50k	85,3	4,267	0,000364	0,364
30k	108,8	3,272	0,000356	0,356
20k	124,8	2,476	0,000309	0,309
10k	142,3	1,433	0,000204	0,204
5k	152,1	0,771	0,000117	0,117
1k	159,3	0,176	2,8E-05	0,028
500	161,3	0,096769	1,56E-05	0,016
100	162,4	0,032662	5,3E-06	0,005
0	164,2	0,01663	2,73E-06	0,003

Abbildung 29 Messtabelle I-U-Messung eines Solarmoduls inkl. Berechnung der jeweiligen durch das Solarmodul abgegeben Leistung zum Messzeitpunkt

2.4.4 Kennlinie $U=f(I)$

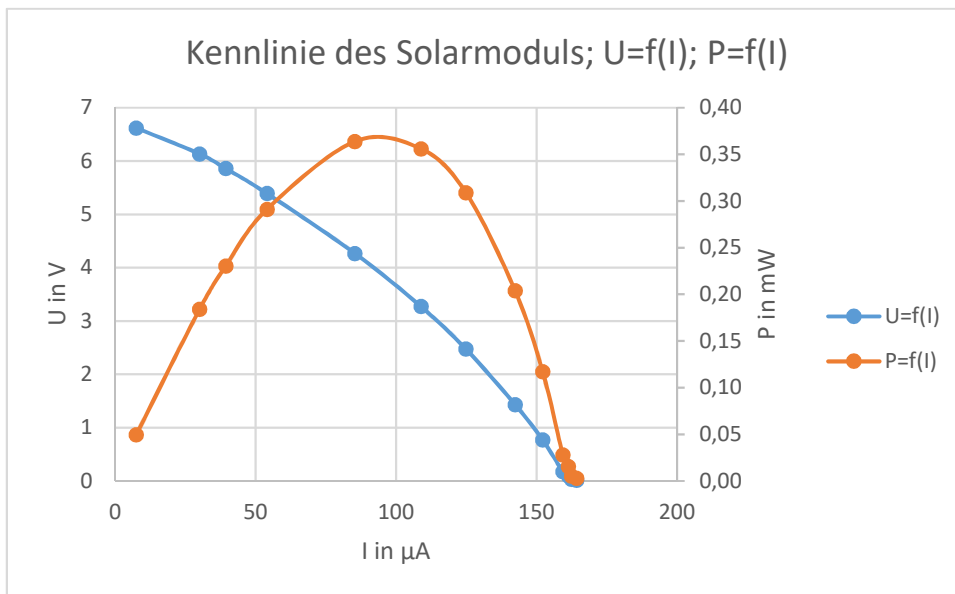


Abbildung 30 Kennlinie Solarmodul; $U=f(I)$; $P=f(I)$

Die Beleuchtungsstärke während der Messung der Kennlinie betrug ca. 1550lux (ermittelt über den Helligkeitssensor eines Smartphones (Oneplus One)).

Die Solarzelle ist eine reale Stromquelle. Aufgrund der geringen Beleuchtungsstärke während der Messung ergibt sich eine abgeflachte Kennlinie. Zum Vergleich folgt die Messung einer baugleichen Solarzelle unter voller Beleuchtungsstärke des Halogenscheinwerfers im e-lab (Messung für Phaeton-Projekt):

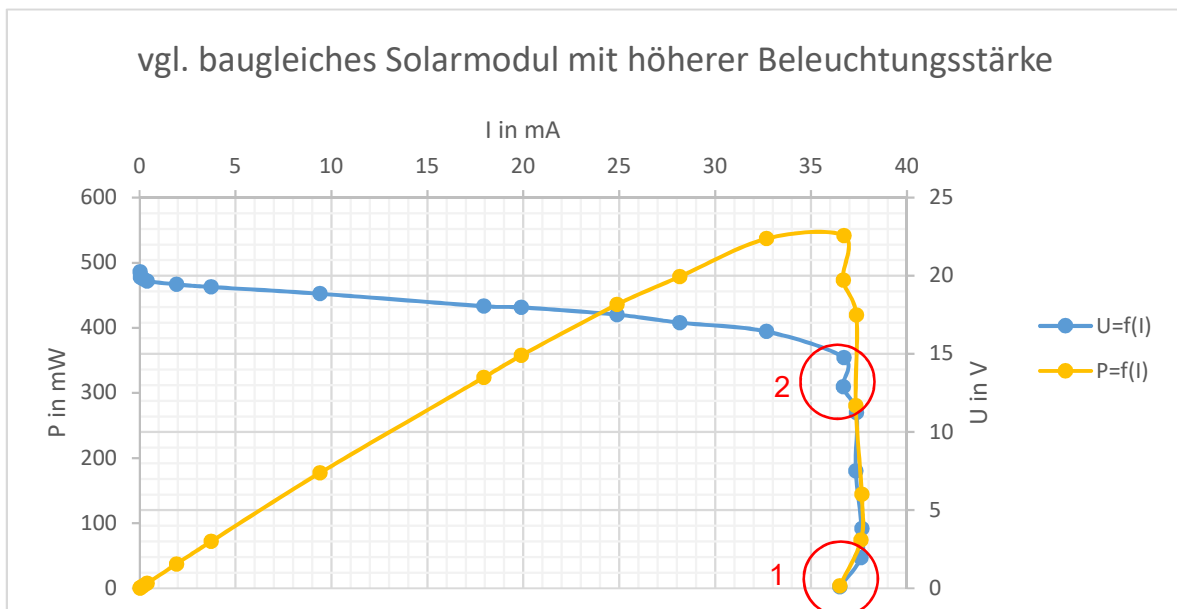


Abbildung 31 Vergleichskennlinie eines baugleichen Solarmoduls, gemessen mit höherer Beleuchtungsstärke; $U=f(I)$; $P=f(I)$

Bei der Vergleichskennlinie ist deutlich das Konstantstromverhalten des Solarmoduls ersichtlich.

Die zwei eingezeichneten Punkte weichen vom erwarteten Verlauf der Kennlinie ab. Beim Punkt 1 ist die Solarzelle noch nicht vom Halogenscheinwerfer erwärmt. Durch die Erwärmung verschiebt sich die Kennlinie leicht nach rechts. Der zweite Punkt ist ein Messfehler, vermutlich durch Umwelteinflüsse (kurzfristige Änderung der Solarzellentemperatur) verursacht, oder ein Ablesefehler.

Die I-U-Kennlinie der Solarzelle ist von der Beleuchtungsstärke abhängig. Werden Strom und Spannung der Solarzelle multipliziert ergibt sich abhängig von der nichtlinearen I-U-Kennlinie eine von der Beleuchtungsstärke abhängige nichtlineare Leistungskennlinie.

Die Leistungsabgabe der Solarzelle ist beim Maximum der Leistungskennlinie am größten. Dieser Punkt wird auch Maximum Power Point genannt. (kurz MPP bzw. MPPT)

3. Abschließender Kommentar

Die Laborübung hat gut den Unterschied zwischen spannungs- und stromrichtiger Messung verdeutlicht. Interessant war, dass die AA-Batterie nur einen Innenwiderstand von ca. 0,1 Ohm hat und somit sehr nah an eine ideale Spannungsquelle kommt. Schwerwiegende Probleme traten bei der Laborübung keine auf.

Jedoch hatte ich zuerst einen Denkfehler bei der Vorbereitung. Für die Berechnung der 10% systematischen Messabweichung nahm ich für den wahren Wert I_z bzw. U_z 90% statt 100% an.