

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

# **LABORÜBUNGEN 2: ELEKTRIZITÄT, MAGNETISMUS, OPTIK**

Übungsnummer: PHYC03UF

Übungstitel: Halbleiterdiode

Betreuer: Diwoky Clemens

Gruppennummer: 1

Name: PHILIPP Maximilian

Name: STARK Matthias

Mat. Nr.: 11839611

Mat. Nr.: 12004907

Datum der Übung: 22 Oktober

WS 2021/2022

## Inhaltsverzeichnis

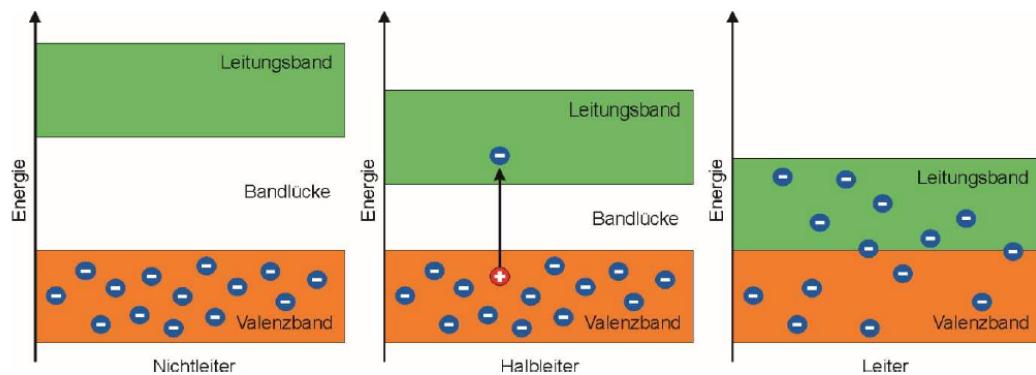
1	Aufgabenstellung . . . . .	3
2	Grundlagen . . . . .	3
3	Versuchsanordnung . . . . .	5
4	Geräteliste . . . . .	7
5	Versuchsdurchführung & Messergebnisse . . . . .	8
5.1	Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode . .	8
5.1.1	in Durchlassrichtung . . . . .	8
5.1.2	in Sperrrichtung . . . . .	10
5.2	Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode . . . . .	11
5.3	Untersuchung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen . . . . .	13
5.4	Untersuchung der Spannungsverläufe in einer Spannungsverdopplerschaltung . . . . .	16
6	Auswertung . . . . .	18
6.1	Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode .	19
6.1.1	in Durchlassrichtung . . . . .	19
6.1.2	in Sperrrichtung . . . . .	20
6.2	Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode . . . . .	21
6.3	Untersuchung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen . . . . .	22
6.4	Untersuchung der Spannungsverläufe in einer Spannungsverdopplerschaltung . . . . .	27
7	Diskussion . . . . .	30
7.1	Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode .	30
7.1.1	in Durchlassrichtung . . . . .	30
7.1.2	in Sperrrichtung . . . . .	30
7.2	Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode . . . . .	30
7.3	Untersuchung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen . . . . .	30
7.4	Untersuchung der Spannungsverläufe in einer Spannungsverdopplerschaltung . . . . .	31
7.5	Verbesserungsvorschläge . . . . .	32
8	Zusammenfassung . . . . .	32

## 1 Aufgabenstellung

- Messtechnische Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode.
  - a) in Durchlassrichtung
  - b) in Sperrrichtung
- Automatisierte Aufnahme der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode in Durchlass- und Sperrrichtung.
- Messtechnische Untersuchung von Spannungs- und Stromverläufen in einer Einweg-Gleichrichterschaltung mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen
- Messtechnische Untersuchung von Spannungsverläufen in einer Spannungsverdoppler-Schaltung.

## 2 Grundlagen

Unter einem Halbleiter versteht man einen kristallinen Festkörper, dessen Leitfähigkeit zwischen der eines Nichtleiters und der eines Leiters liegt. Die Leitfähigkeit lässt sich anhand des Bändermodells durch freie Ladungsträger erklären, die vom Valenzband über die Bandlücke in das Leitungsband gelangen. Die Menge an Energie, die dafür aufgewendet werden muss, hängt dabei von der Größe der Bandlücke ab und ist in folgender Skizze in Abbildung 1 veranschaulicht.

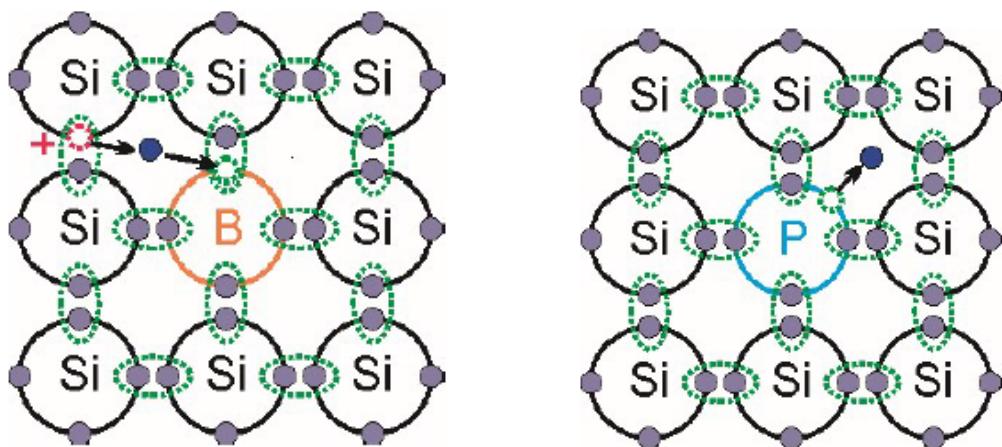


**Abbildung 1:** Skizze des Bändermodells [6]

Bei den Halbleitern ist die Bandlücke, wie in Abbildung 1 sichtbar, so klein, dass diese überwunden werden kann. Diese Leitfähigkeit ist allerdings stark temperaturabhängig. Jedes ins Leitungsband angehobene Elektron hinterlässt ein positives „Loch“ im Valenzband, sodass der Halbleiterkristall insgesamt elektrisch neutral ist.

Soll nun die Leitfähigkeit der Halbleiterkristalle gezielt verändert werden, wird dies mit der sogenannten Dotierung erreicht. Darunter versteht man das Einbringen von Fremdatomen in den Halbleiterkristall. Dabei wird zwischen p- und n- Dotierung unterschieden.

Bei der p-Dotierung wird ein Element, welches ein Valenzelektron weniger als der Rest hat, eingebunden, wodurch dieses zu Elektronenakzeptor wird. Die n-Dotierung bewirkt das Gegenteil, wodurch sich durch das zusätzliche Valenzelektron das Valenzband negativ lädt und so zu Elektronendonator wird. Eine schematische Skizze dieses Dotierungsverfahrens von Silizium ist in folgender Abbildung 2 für die p-Dotierung und in Abbildung 3 für die n-Dotierung ersichtlich.

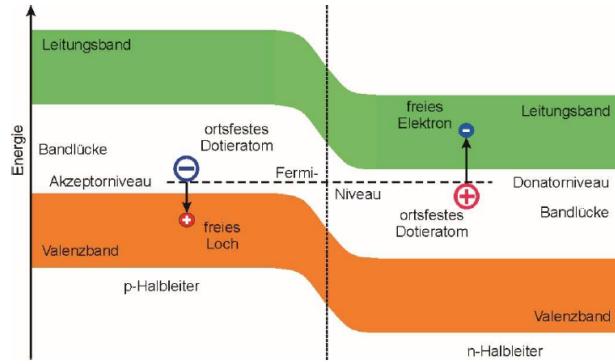


**Abbildung 2:** Skizze von p-Dotierten Silizium [6]

**Abbildung 3:** Skizze von n-Dotierten Silizium [6]

Die Stellen des Halbleiterkristalls, an denen der p- und n-dotierte Bereich zusammenkommen, wird p-n Übergang genannt. An der so entstehenden Grenzfläche treten die Elektronen aus dem n-Bereich in den p-Bereich über. In der Sperrsicht entsteht dadurch eine Verarmung an Ladungsträgern, was schließlich zum Verlust der Leitfähigkeit führt.

Eine Skizze dieses p-n-Übergangs ist in folgender Abbildung 4 sichtbar.

**Abbildung 4:** Skizze des p-n-Übergangs [6]

Wird nun der Pluspol einer Spannungsquelle an die p-Dotierte Seite der Halbleiter und der Minuspol an die n-Dotierte Seite geschlossen, fließen die Elektronen zur Raumladungszone, wodurch diese abgebaut wird und so ein Durchlassstrom entsteht.

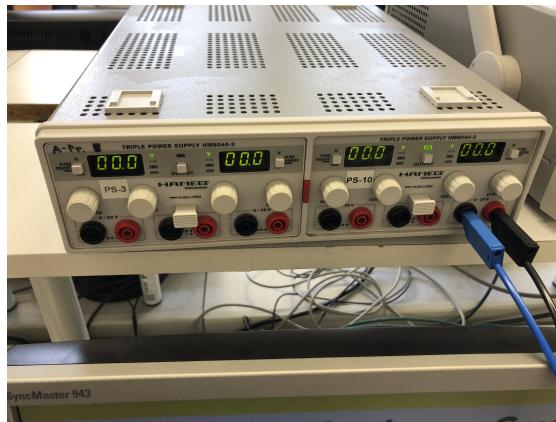
Wird die Spannungsquelle allerdings mit dem Pluspol zur n-dotierten Seite und mit dem Minuspol zur p-dotierten Seite geschlossen, entfernen sich die Ladungsträger von der Sperrsicht, wodurch diese wächst und so kein Strom fließt, weshalb diese Ausrichtung auch Sperrrichtung der Diode genannt wird. [2] [3]

### 3 Versuchsanordnung

Im Rahmen dieses Versuchs wurden verschiedene Schaltungen dimensioniert. Eine jeweilige Skizze des Schaltplans und eine kurze Erklärung finden sich, der besseren Übersicht halber, immer am Anfang des entsprechenden Versuchs im Abschnitt 5.

Um die Signale für die entsprechenden Schaltpläne zu erzeugen und auszuwerten wurden folgende Geräte verwendet.

Es handelt sich dabei um einen "Power Supply", in Abbildung 5 und ein Oszilloskop mit 4 Eingängen, siehe Abbildung 6

**Abbildung 5:** Verwendeter "Power Supply"**Abbildung 6:** Verwendetes Oszilloskop

Zusätzlich wurden ein Transformator, siehe Abbildung 7 und digitale Multimeter, siehe Abbildung 8, verwendet.



**Abbildung 7:** Verwendeter Transformator



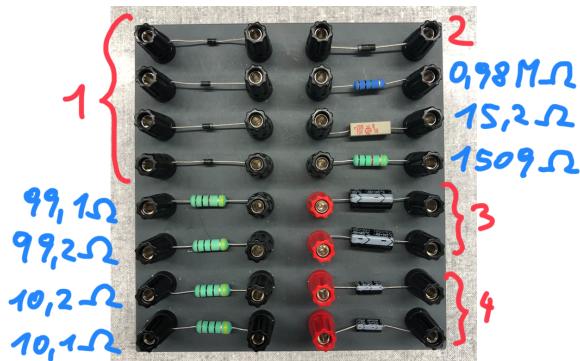
**Abbildung 8:** Verwendetes digitales Multimeter

Um die entsprechenden Schaltungen zu verwirklichen wurden folgende Bauteile im Steckbrett verwendet, siehe Abbildung 9. Dabei handelt es sich um verschiedene Widerstände, die mithilfe des Multimeters aus Abbildung 8 gemessen und die entsprechenden Werte bei der Abbildung in Blau gleich notiert wurden. Weiters sind 4 Gleichrichterdioden (1), eine Zenerdiode (2), 2 Kondensatoren mit  $100 \mu$  Farad (3) und 2 Kondensatoren mit  $10 \mu$  Farad (4) sichtbar.

Um die Schaltungen zu verwirklichen wurden normale Kabel verwendet. Für den letz-

ten Teil des Versuchs wurden zusätzlich noch Tastkabel, wie in Abbildung 10 sichtbar, verwendet, um das Oszilloskop entsprechend in die Schaltung zu integrieren.

2mm



**Abbildung 9:** Verwendete Bauteile im Steckbrett



**Abbildung 10:** Verwendete Tastkabel

## 4 Geräteliste

Für die Messungen wurden folgende Geräte verwendet:

**Tabelle 1:** Verwendete Geräte

Gerät	Typ	Hersteller	Seriennummer
Oszilloskop	DSO-X 2004A	Agilent Technologies	MY53400209
“Power Supply“	HM8040-3	Hameg Instruments	PS-10
2 Multimeter	175 True RMS	Fluke	AP-08 & AP-13
Transformator			
Kabel	60 V DC 16 A		
Tastkabel	N2862B 300 VRMS CATI	Agilent	
Steckbrett			
Gleichrichterdioden	1N4007		
Zenerdioden	1N5337		
2 Widerstände	100 Ω		
2 Widerstände	10 Ω		
Widerstand	1000000 Ω		
Widerstand	15 Ω		
Widerstand	1500 Ω		
2 Kondensatoren	100 μ Farad		
2 Kondensatoren	10 μ Farad		

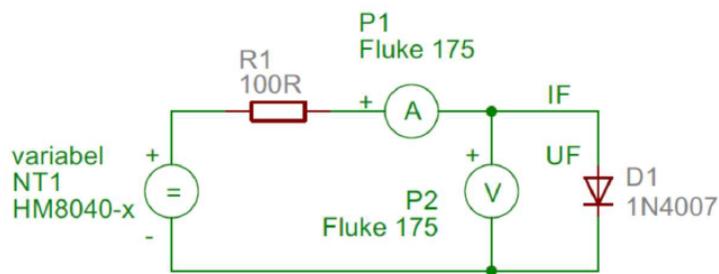
## 5 Versuchsdurchführung & Messergebnisse

Zunächst werden die genauen Werte der Widerstände mithilfe eines Multimeters gemessen. Die so erhaltenen Werte werden, der besseren Übersicht halber in Blau in Abbildung 9 ergänzt.

### 5.1 Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode

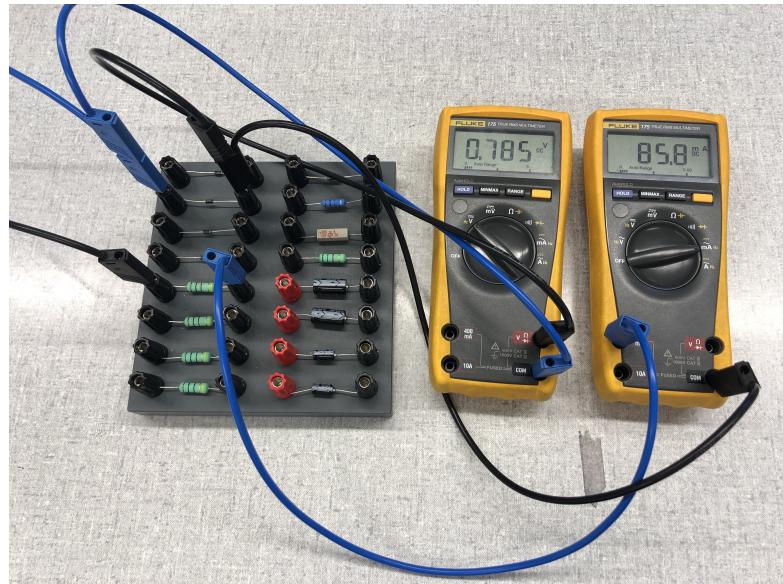
#### 5.1.1 in Durchlassrichtung

Zunächst wird der Stromkreis nach folgenden Schaltplan in Abbildung 11 aufgebaut. Dabei ist vor allem zu beachten, dass die Diode richtig in den Stromkreis geschlossen wird. Dies kann mit dem kleinen Diodenring an dessen Rand überprüft werden.



**Abbildung 11:** Skizze des Schaltplans, der für die erste Aufgabe benötigt wird [6]

Der tatsächliche Aufbau ist in folgender Abbildung 12 sichtbar.



**Abbildung 12:** Versuchsaufbau für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode in Durchlassrichtung

Der Ausgang der Signalquelle war dabei durch das “Hameg Power Supply“ gegeben. Um die Kennlinie aufzunehmen, wurden 14 Datenpunkte aufgezeichnet, die in folgender Tabelle 2 aufgelistet sind. Zunächst wurde dabei die Spannung reguliert, bis diese bei einem aufgezeichneten Wert von  $(0,70 \pm 0,05)$  mV am “Power Supply“ zunächst nicht mehr anwuchs. Dann wurde der Strom von einem Wert von  $(8,0 \pm 0,5)$  mA bis zu  $(100,0 \pm 0,5)$  mA erhöht und notiert. Die genauen Werte wurden dabei von den beiden Multimeter abgelesen.

**Tabelle 2:** Abgelesene Werte auf den Multimeter für die Spannung und die Stromstärke

$U_F$  ... abgelesener Wert der Spannung in mV

$\Delta U_F$  ... entsprechende Unsicherheit der Spannung in mV

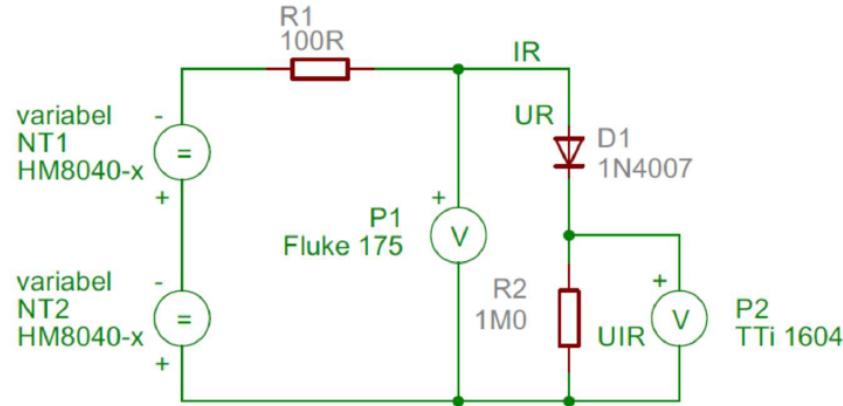
$I_F$  ... abgelesener Wert der Stromstärke in mA

$\Delta I_F$  ... entsprechende Unsicherheit der Stromstärke in mA

	$U_F$ / mV	$\Delta U_F$ / mV	$I_F$ /mA	$\Delta I_F$ /mA
Regulation der Spannung	0.3	0.3	0.0	0.2
	127.4	0.4	0.0	0.2
	213.5	0.6	0.0	0.2
	376.2	0.8	0.0	0.2
	499.6	1.0	0.0	0.3
	545.8	1.1	0.3	0.3
	596.1	1.1	1.0	0.3
	614.5	1.2	1.5	0.3
Regulation der Stromstärke	707	4	11.3	0.4
	706	4	12.6	0.4
	747	4	30.4	0.6
	766	4	52.2	0.8
	782	4	77.3	1.0
	793	4	102.2	1.3

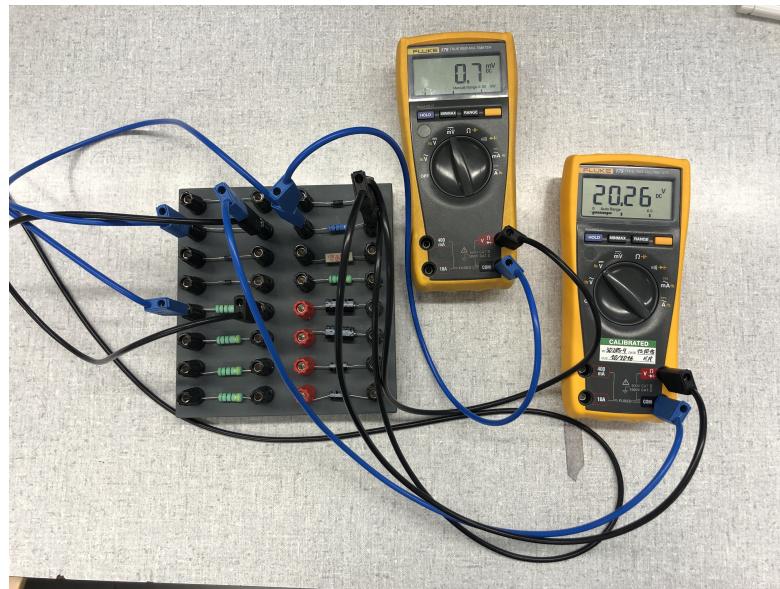
### 5.1.2 in Sperrrichtung

Nun wird der Stromkreis nach folgenden Schaltplan in Abbildung 13 aufgebaut. Weil das "TTi 1604" Gerät nicht zur Verfügung stand, wurde auch hier wieder ein zweites Multimeter zur Bestimmung der Spannung verwendet.



**Abbildung 13:** Skizze des Schaltplans, der für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode in Sperrrichtung benötigt wird [6]

Der tatsächliche Aufbau ist in folgender Abbildung 14 sichtbar.



**Abbildung 14:** Versuchsaufbau für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode in Sperrrichtung

Als Signalausgang dient, wie auch zuvor, das "Hameg Power Supply". Die Ausgangsspannung wird dabei im Bereich von  $(0,0 \pm 0,5)$  V bis  $(40,0 \pm 0,5)$  V variiert und die genauen Werte wieder an den Multimeter abgelesen, was in Tabelle 3 sichtbar ist. Der

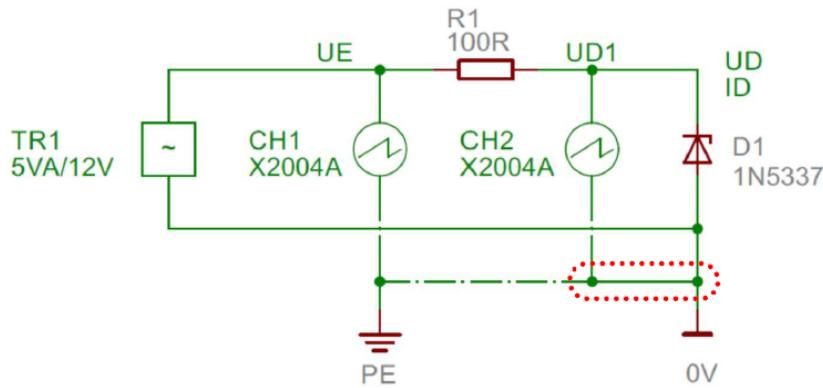
Sperrstrom  $I_{Sperr}$  errechnet sich dabei als  $\frac{U_{IR}}{R}$  und wird der besseren Übersicht halber ebenfalls schon dieser Tabelle 3 beigefügt.

**Tabelle 3:** Abgelesene Werte auf den Multimeter für die beiden Spannungen  
 $U_R$  ... abgelesener Wert der Gesamtspannung in V  
 $\Delta U_R$  ... entsprechende Unsicherheit der Gesamtspannung in V  
 $U_{IR}$  ... abgelesener Wert der Spannung am Widerstand in V  
 $\Delta U_{IR}$  ... entsprechende Unsicherheit der Spannung am Widerstand in V  
 $I_{Sperr}$  ... errechneter Wert des Sperrstroms in A  
 $\Delta I_{Sperr}$  ... entsprechende Unsicherheit des Sperrstroms in A

	$U_R$	$\Delta U_R$	$U_{IR}$	$\Delta U_{IR}$	$I_{Sperr}$	$\Delta I_{Sperr}$
0	-0,0017	0,0003	0,0	0,03	-0,000 000	$4 \cdot 10^{-8}$
1	-5,127	0,010	0,4	0,04	$-4,1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
2	-10,06	0,04	0,5	0,04	$-5,1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
3	-15,07	0,05	0,6	0,04	$-6,1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
4	-20,17	0,06	0,7	0,04	$-7,1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
5	-25,08	0,06	0,8	0,04	$-8,1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
6	-30,08	0,07	0,9	0,04	$-9,2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
7	-35,13	0,08	0,9	0,04	$-9,2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$
8	-40,05	0,09	1,0	0,04	$-1,02 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-8}$

## 5.2 Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode

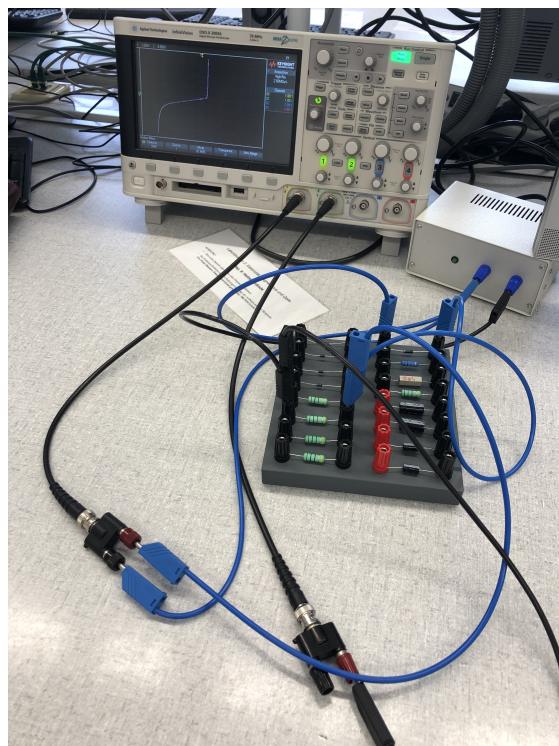
Um die Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode bestimmen zu können, wird der Stromkreis nach folgenden Schaltplan in Abbildung 15 aufgebaut.



**Abbildung 15:** Skizze des Schaltplans, der für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode benötigt wird [6]

Der tatsächliche Aufbau ist in folgender Abbildung 16 sichtbar. Weil leider keine passenden Adapterstücke für die Koaxialanschlüsse des Oszilloskops zu den vorhanden waren, wurden im Versuchsaufbau Koaxialkabel verwendet. Bei den Adapterstücken von den

Bananenbuchsen zum Koaxialkabel wird dabei immer nur der rote Steckplatz verwendet. Der schwarze dient dabei immer der Erdung und wird nur bei einem Stecker (Channel 1) angeschlossen.



**Abbildung 16:** Versuchsaufbau für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode

Um den Stromkreis nicht zu überlasten, wird am Oszilloskop nur ein “single-shot“ mithilfe der gleichnamigen Einstellung aufgezeichnet. Der Trafo kann dadurch sofort wieder ausgeschaltet werden, während das, vom Oszilloskop aufgezeichnete Signal, ausgewertet wird. Dieses wird mithilfe eines USB-Sticks gespeichert und ist in folgender Abbildung 17 sichtbar. Zusätzlich werden die so erhaltenen Daten auch als CSV-Datei gespeichert, um so mit dem entsprechenden Auswertungsprogrammen weiterverarbeitet werden zu können.

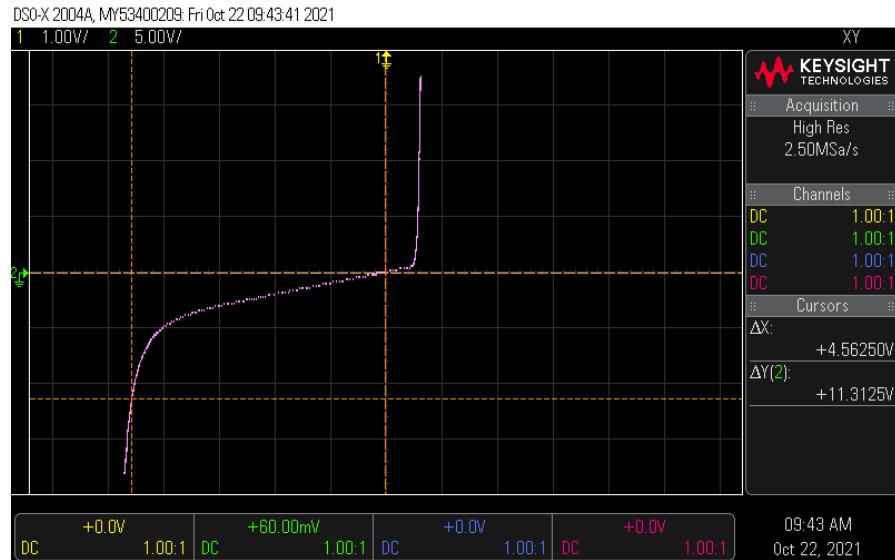


Abbildung 17: Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten für die Kennlinie der Zenerdiode

### 5.3 Untersuchung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen

Um die Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen bestimmen zu können, wird der Stromkreis nach folgenden Schaltplan in Abbildung 18 aufgebaut.

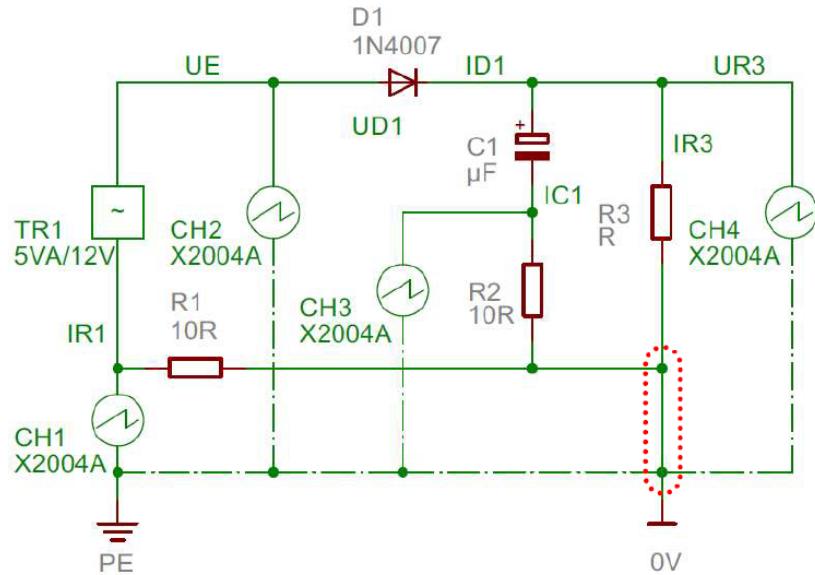
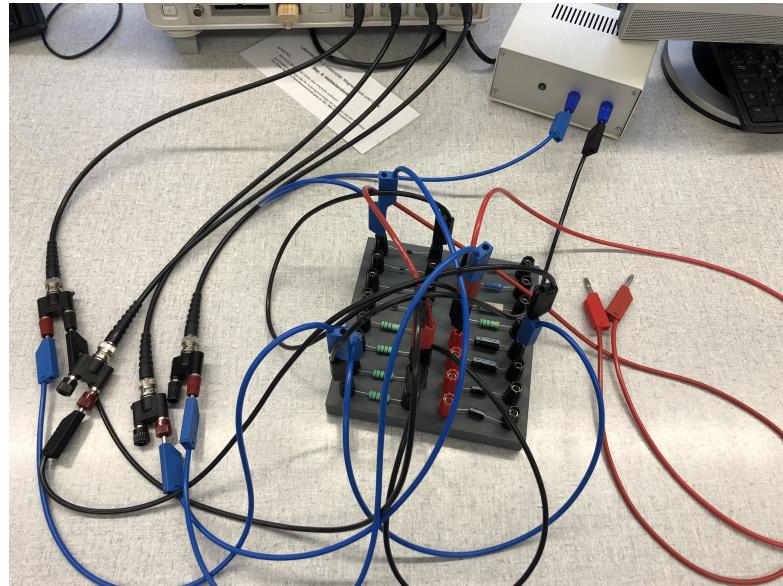


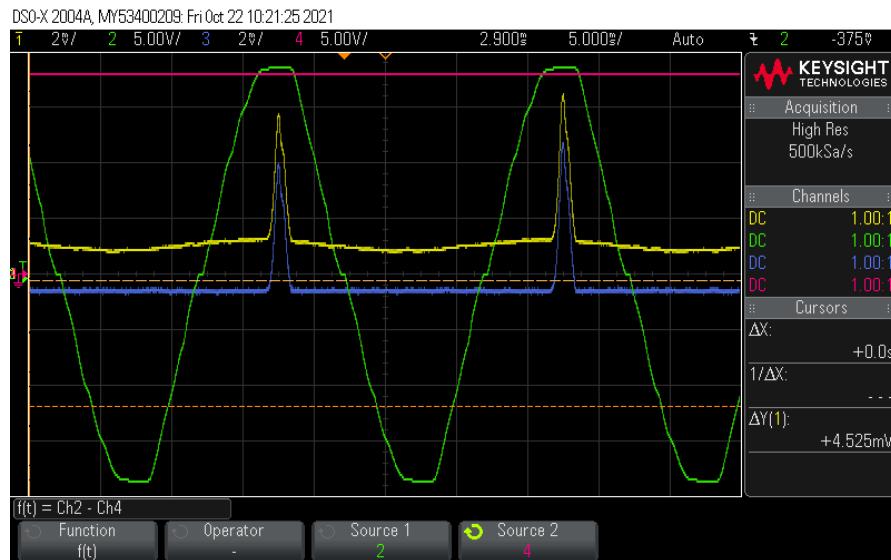
Abbildung 18: Skizze des Schaltplans, der für die Ermittlung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen benötigt wird [6]

Der tatsächliche Aufbau ist in folgender Abbildung 19 sichtbar. Die roten Kabel wurden dabei verwendet, um die unterschiedlichen Widerstände zu realisieren.



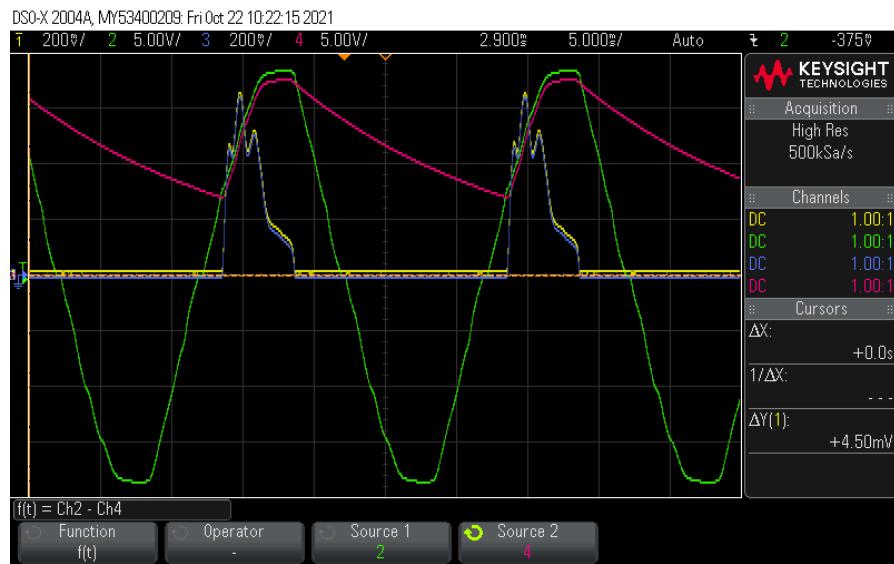
**Abbildung 19:** Versuchsaufbau für die Ermittlung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen

Zunächst wird als Kondensator der Elektrolyt-Kondensator mit  $10 \mu\text{F}$  Farad benutzt. Der Widerstand  $R_3$  wird im Verlauf des Versuchs durch Umstecken der roten Kabel variiert. Zunächst wird dieser als  $\infty$  angenommen, was durch Trennen der beiden Kabel erreicht wird. Das dabei vom Oszilloskop erfasste Signal ist in folgender Abbildung 20 sichtbar.

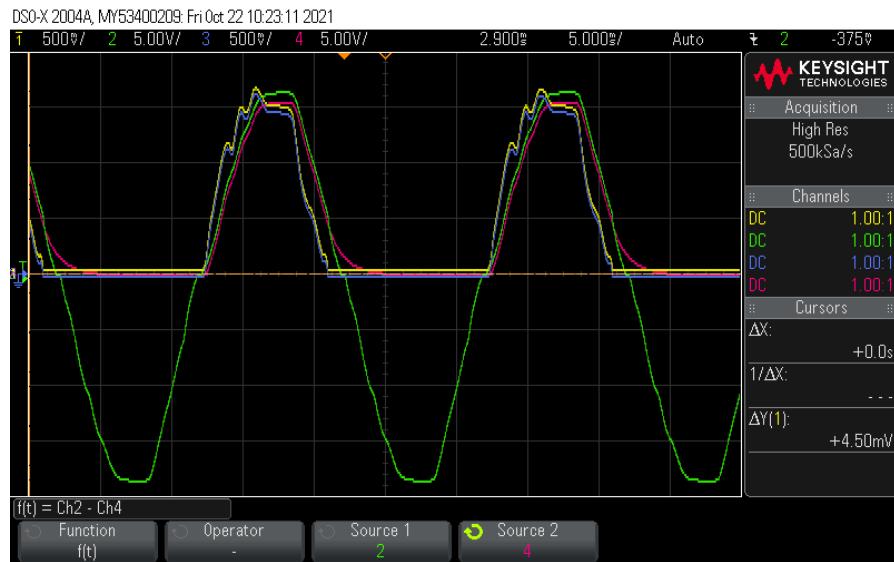


**Abbildung 20:** Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei einem  $\infty$  Widerstand

Nun werden der Reihe nach zunächst der Widerstand von  $(1509 \pm 15) \Omega$ , siehe Abbildung 21 und schließlich mit einem Widerstand von  $(99,2 \pm 1,1) \Omega$ , siehe Abbildung 22, mithilfe der roten Kabel in den Aufbau geschlossen. Die genauen Werte der Widerstände wurden dabei, wie bereits erwähnt mithilfe des Multimeters zuvor gemessen. Alle vom Oszilloskop aufgezeichneten Daten wurden auch als CSV-Datei gespeichert, um für spätere Auswertungen zur Verfügung zu stehen.



**Abbildung 21:** Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei einem Widerstand von  $(1509 \pm 15) \Omega$



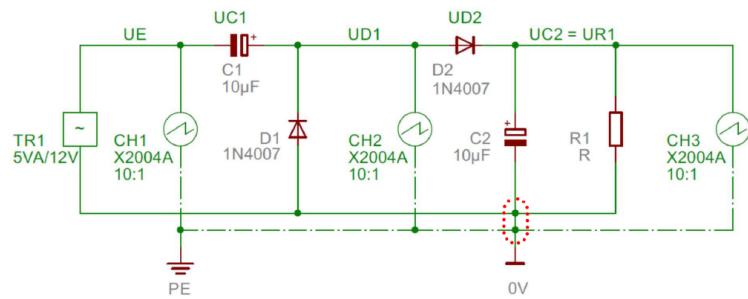
**Abbildung 22:** Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei einem Widerstand von  $99,2 \pm 1,1 \Omega$

Nun wurde der gesamte Versuch auch mit dem Elektrolyt-Kondensator mit  $100 \mu$  Farad wiederholt, um den Unterschied für die Welligkeit bei einen größeren Kondensator fest-

zustellen. Um den Rahmen dieses Protokolls nicht zu sprengen werden diese erhaltenen Daten bei der Auswertung unten angeführt und verglichen.

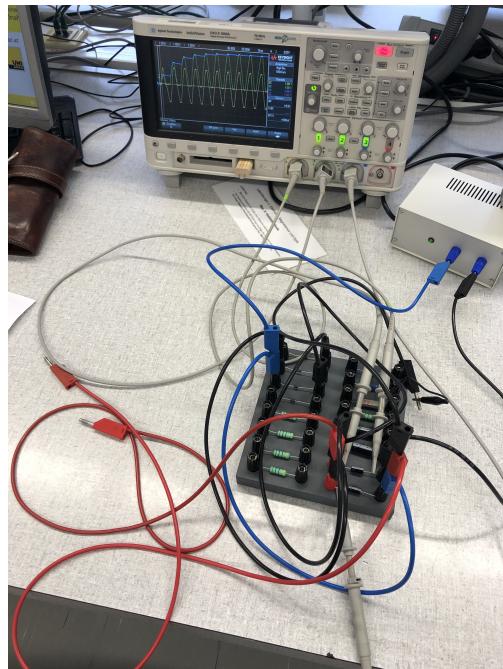
#### 5.4 Untersuchung der Spannungsverläufe in einer Spannungsverdopplerschaltung

Zuletzt wird noch der Spannungsverlauf einer Spannungsverdopplerschaltung untersucht. Dazu wird der Stromkreis nach folgenden Schaltplan in Abbildung 23 aufgebaut, der der Greinacher-Schaltung entspricht.



**Abbildung 23:** Skizze des Schaltplans für die Greinacher-Schaltung [6]

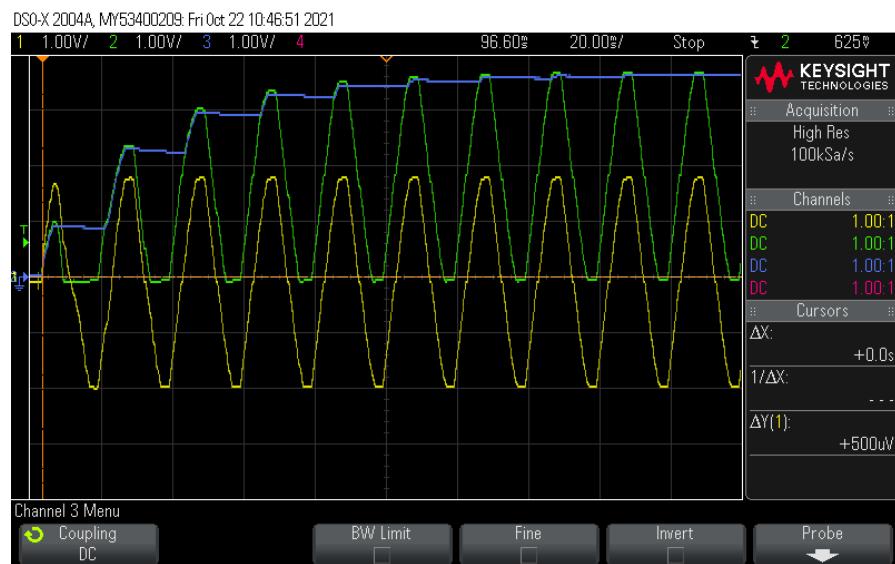
Der tatsächliche Aufbau ist in folgender Abbildung 24 sichtbar. Hier wird auch sichtbar, wie die Tastkabel in die Schaltung integriert werden.



**Abbildung 24:** Versuchsaufbau für die Ermittlung des Spannungsverlaufs einer Spannungsverdopplerschaltung

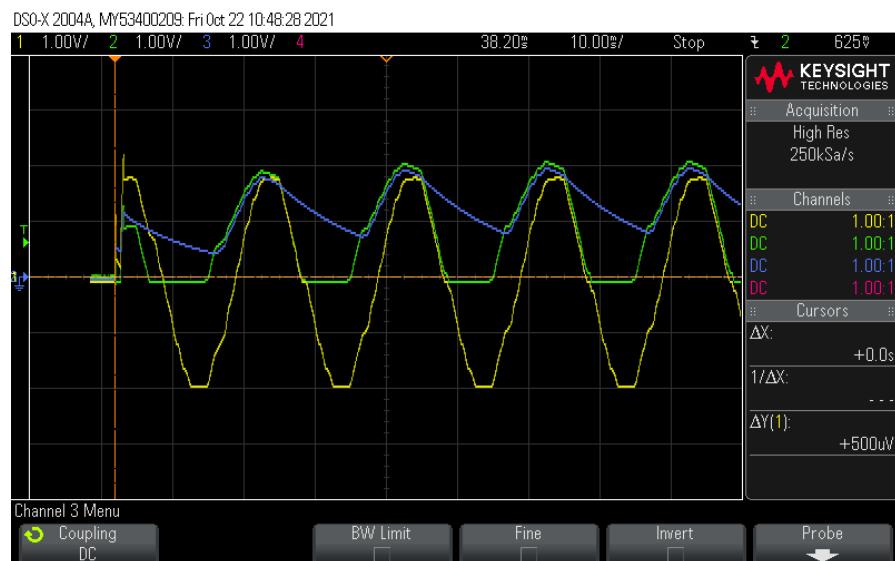
Auch bei der Greinacher-Schaltung werden die roten Kabel wieder verwendet, um den Widerstand R1 zu variieren. Wie bereits zuvor erwähnt, wird auch hier wieder nur ein "single-shot", zur Entlastung des Trafos, aufgenommen.

Nun wird der Widerstand R1 zunächst als  $\infty$  angenommen, was wie bereits erklärt durch Trennung der roten Kabel erreicht wird, was in Abbildung 25 sichtbar ist.



**Abbildung 25:** Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei Greinacher-Schaltung und einem  $\infty$  Widerstand

Nun wird mithilfe der roten Kabel ein Widerstand von  $(1509 \pm 15) \Omega$ , siehe Abbildung 26, in die Schaltung geschlossen.



**Abbildung 26:** Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei Greinacher-Schaltung und einem Widerstand von  $(1509 \pm 15) \Omega$

## 6 Auswertung

Um zu sehen wie sich die Unsicherheit der Messungen bis in die Ergebnisse fortplanzt, ist Gleichung 1 verwendet worden. Die Grundlagen dieser Gleichung stammen von den Powerpointfolien von GUM.[7] Die Verallgemeinerung ist von Wikipedia entnommen worden [4]. Für die Auswertung ist die Programmiersprache Python im speziellen das Packet `scipy`, zur Hilfe genommen worden.

$$V_y = J(x) \cdot V_x \cdot J^T(x) \quad (1)$$

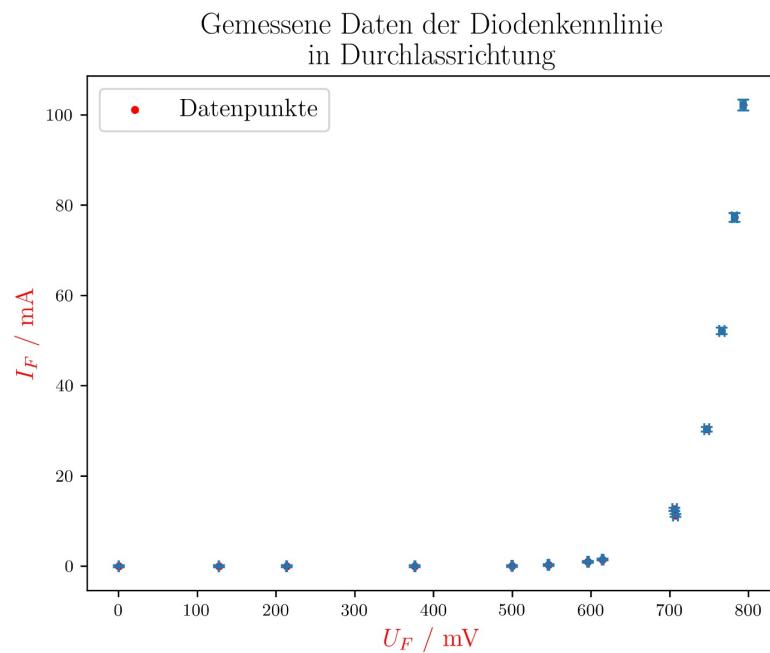
Wobei  $V_y$  und  $V_x$  die Kovarianzmatrizen von den Vektoren  $\mathbf{y}$  und  $\mathbf{x}$  sind.  $\mathbf{x}$  ist der Vektor der Eingangsvariablen und  $\mathbf{y}$  ist der Vektor der Ausgangsvariablen.  $J$  ist die Jakobimatrix der vektorwertigen Funktion  $\mathbf{y} = \vec{F}(\mathbf{x})$ . So lassen sich die Komponenten der Matrix relativ einfach anschreiben  $J_{ij}(x) = \frac{\partial y_i}{\partial x_j}(x)$ . Damit man die Unsicherheit der einzelnen Variablen  $y_i$  bekommt, muss nur die Quadratwurzel des i-ten Diagonalelementes der  $\mathbf{y}$ -Kovarianzmatrix genommen werden  $u_i = \sqrt{\text{diag}(V_y)_i}$ . Da in diesem Experiment meistens nur skalare Funktionen untersucht werden, vereinfacht sich die Gleichung 1 dramatisch und die Unsicherheit der Variable  $y$  lässt sich einfach so berechnen:

$$u_y = \sqrt{\text{grad}y^T \cdot V_x \cdot \text{grad}y} \quad (2)$$

## 6.1 Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode

### 6.1.1 in Durchlassrichtung

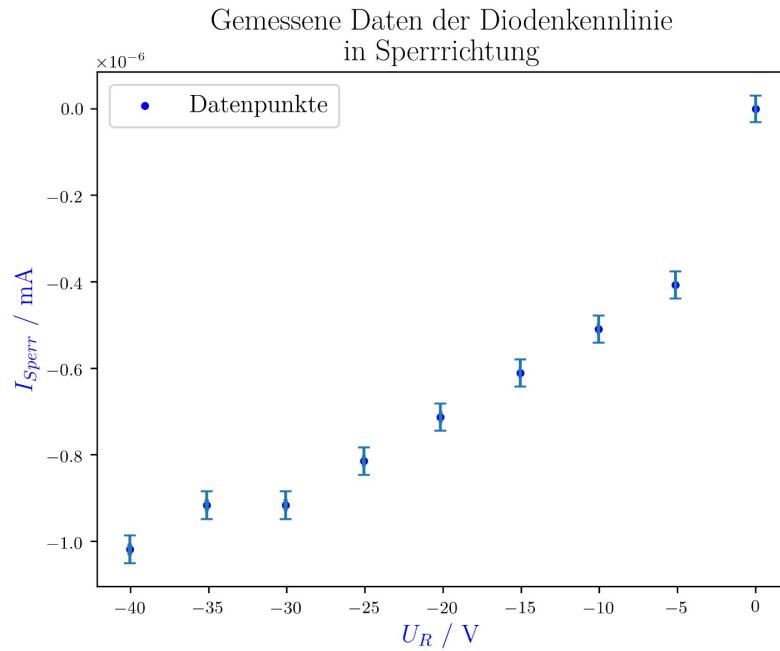
Um die Strom-Spannungskennlinie der Si-Gleichrichterdiode D1 in Durchlassrichtung zu ermitteln, wurden die aufgenommenen Daten aufgetragen, was in folgender Abbildung 27 sichtbar ist. Die ebenfalls ersichtlichen Unsicherheiten wurden dabei anhand des Gerätedatenblatt errechnet. [5]



**Abbildung 27:** Gemessene Daten zur Ermittlung der Diodenkennlinie in Durchlassrichtung

### 6.1.2 in Sperrrichtung

Um die Strom-Spannungskennlinie der Si-Gleichrichterdiode D1 in Sperrrichtung zu erhalten, werden, wie bereits zuvor, die gemessenen Daten inklusive der Unsicherheiten aus dem Datenblatt geplottet, was in folgender Abbildung 28 ersichtlich ist.



**Abbildung 28:** Gemessene Daten zur Ermittlung der Diodenkennlinie in Sperrrichtung

## 6.2 Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode

Um die Strom-Spannungskennlinie der Zenerdiode D1 in Durchlass- und Sperrrichtung zu bestimmen, wurden die gemessenen Daten, die auch in Abbildung 17 sichtbar sind und als CSV Datei gespeichert wurden, verwendet. Der Strom der Diode  $I_D$  wurde dabei nach folgender Formel bestimmt.

$$I_D = \frac{U_E - U_{D1}}{R_1} \quad (3)$$

Die so erhaltenen Werte wurden, der besseren Übersicht halber, nun interpoliert und so die Diodenkennlinie als I / U aufgetragen, was in Abbildung 29 ersichtlich ist.

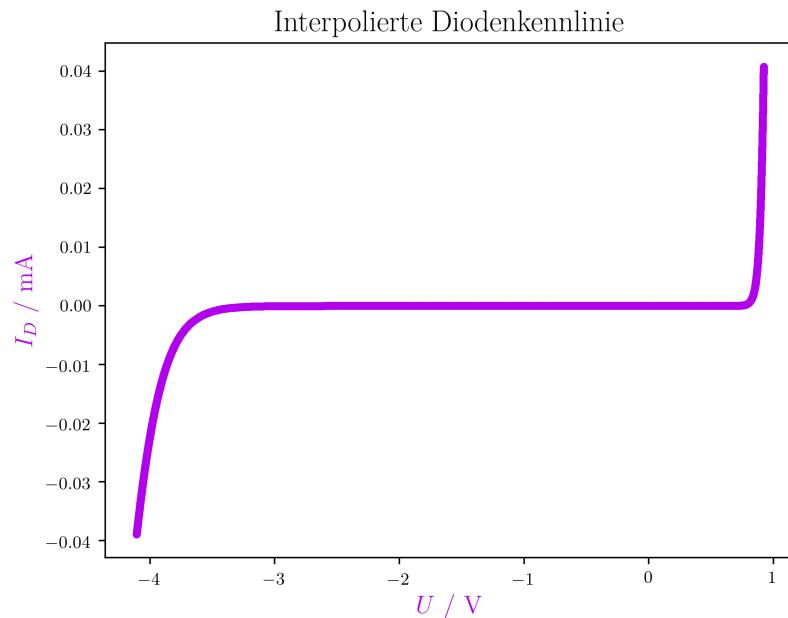


Abbildung 29: Interpolierte Diodenkennlinie als I / U

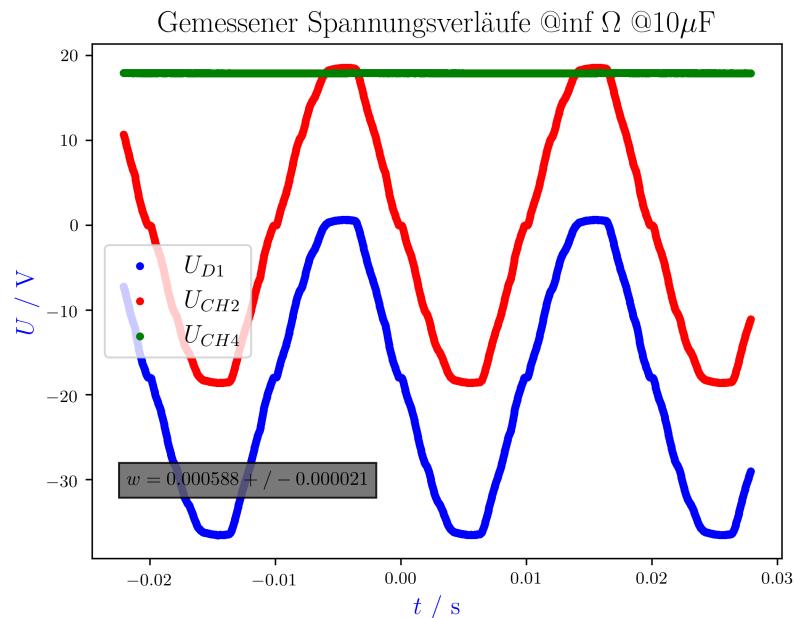
### 6.3 Untersuchung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen

Nun wurden die Spannungs- und Stromverläufe grafisch als Funktion der Zeit über mehrere Perioden dargestellt.

Um die Glättungsfunktion mit Hilfe der Welligkeit zu bewerten, wurde diese zunächst mit Gleichung 4 numerisch bestimmt und den Grafiken beigefügt.

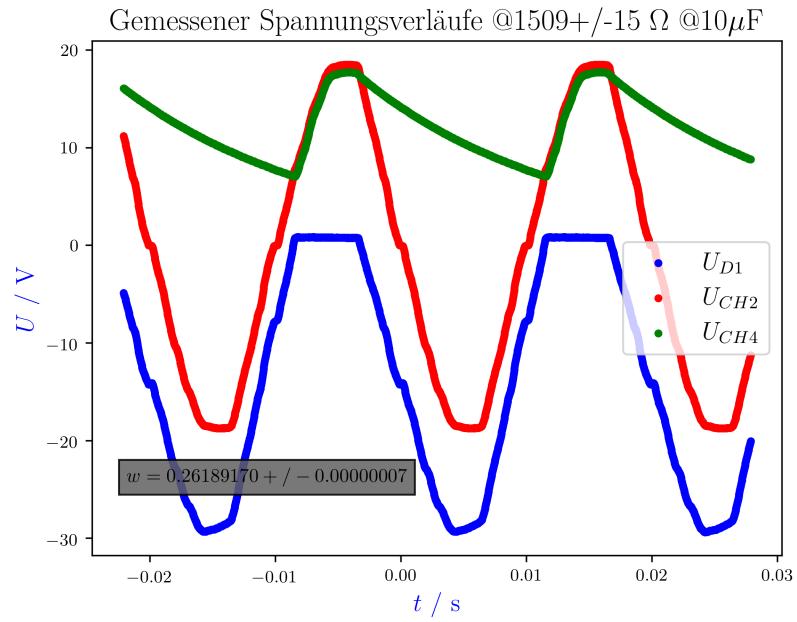
$$w = \frac{U_{\sim}}{|U_-|} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_2-T_1} \int_{T_1}^{T_2} (u(t) - |U_-|)^2 dt}}{\frac{1}{T_2-T_1} \int_{T_1}^{T_2} |u(t)| dt} \quad (4)$$

Die entsprechenden vom Oszilloskop aufgezeichneten Daten der beiden Spannungen  $U_{CH2}$   $U_{CH4}$ , sichtbar in Abbildung 20, wurden in folgenden Graphen aufgetragen. Zusätzlich wurde  $U_{D1} = U_{CH2} - U_{CH4}$  berechnet und auch in den selben Graphen gezeichnet, wodurch folgende Abbildung 30 entsteht.

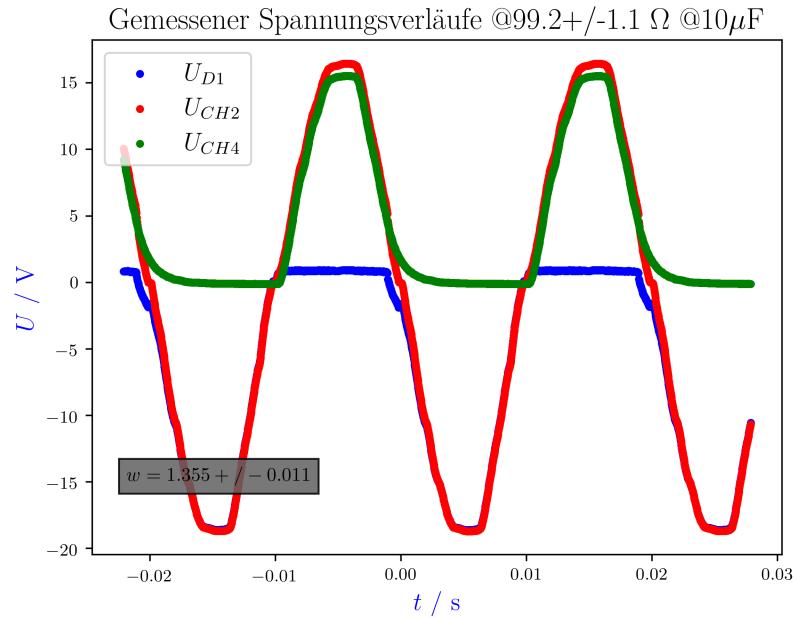


**Abbildung 30:** Erhaltene Spannungsverläufe bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $10 \mu$  Farad und einem  $\infty$  großen Widerstand

Dieser Vorgang wird nun für die anderen beiden Widerstände wiederholt.



**Abbildung 31:** Erhaltene Spannungsverläufe bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $10 \mu \text{F}$  und einem Widerstand von  $(1509 \pm 15)\Omega$



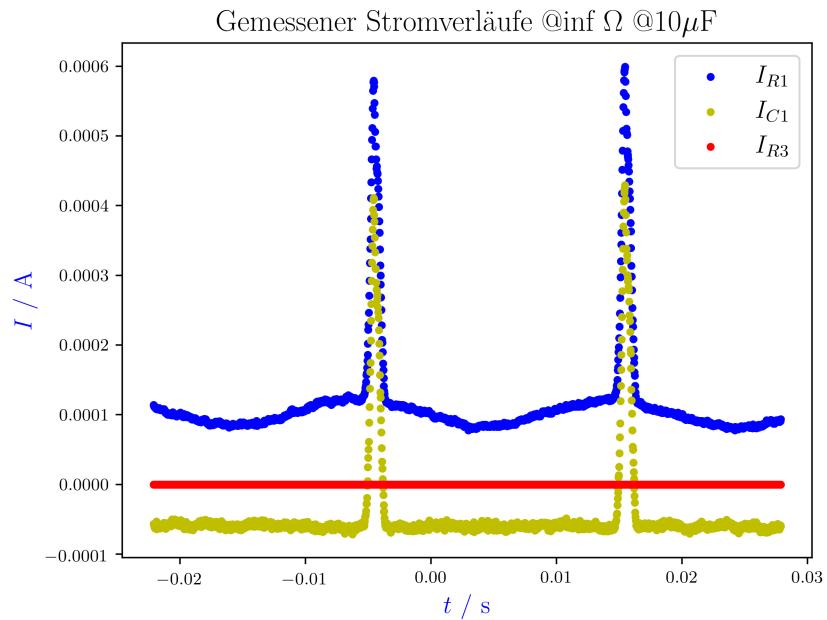
**Abbildung 32:** Erhaltene Spannungsverläufe bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $10 \mu \text{F}$  und einem Widerstand von  $99,2 \pm 1,1 \Omega$

Die Ströme  $I$  wurden nach folgenden Formeln berechnet.

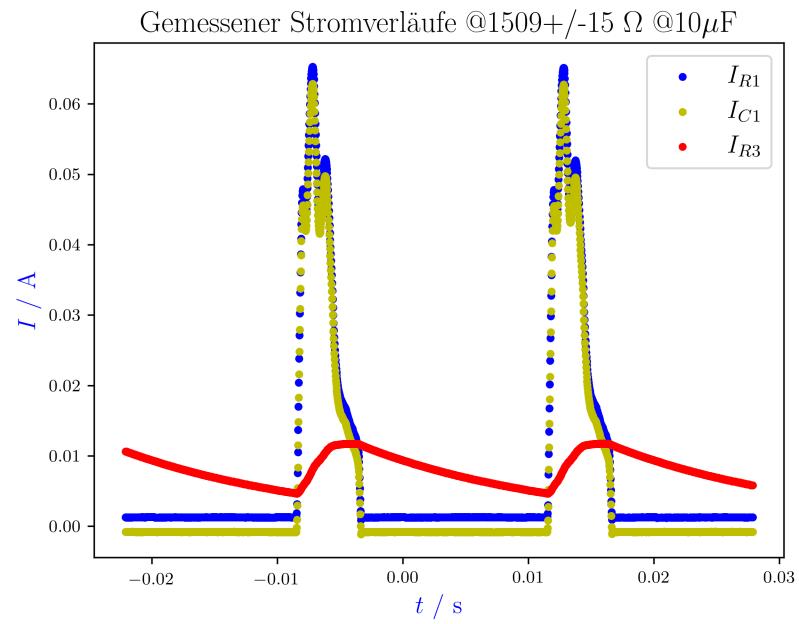
$$I_{R1} = I_{D1} = \frac{U_{CH1}}{R_1} \quad I_{R3} = \frac{U_{CH4}}{R_3} \quad I_{C1} = \frac{U_{CH3}}{R_2} \quad (5)$$

Die so erhaltenen Werte der Ströme wurden in Graphen veranschaulicht und sind im Folgenden ersichtlich.

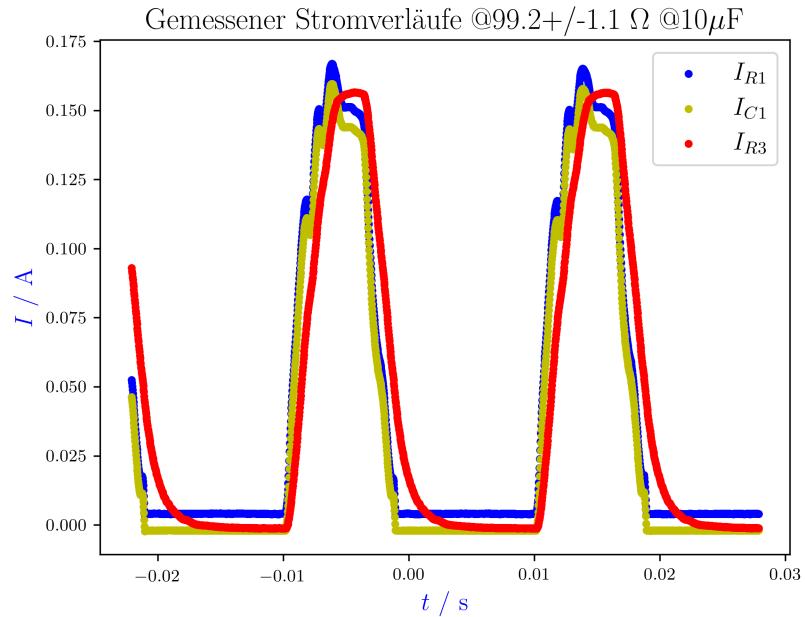
Dies wurde wieder für alle drei Widerstände wiederholt.



**Abbildung 33:** Erhaltene Ströme bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $10 \mu$  Farad und einem  $\infty$  großen Widerstand



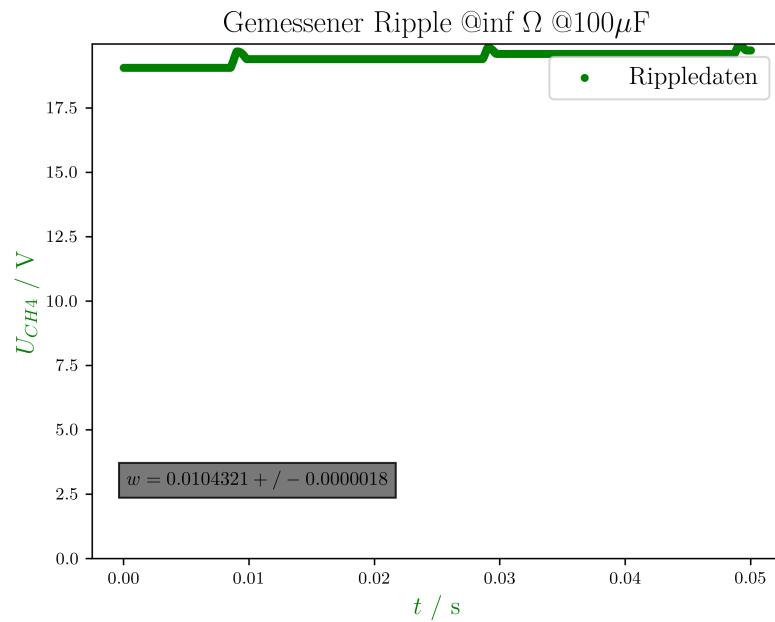
**Abbildung 34:** Erhaltene Ströme bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $10 \mu$  Farad und einem Widerstand von  $(1509 \pm 15) \Omega$



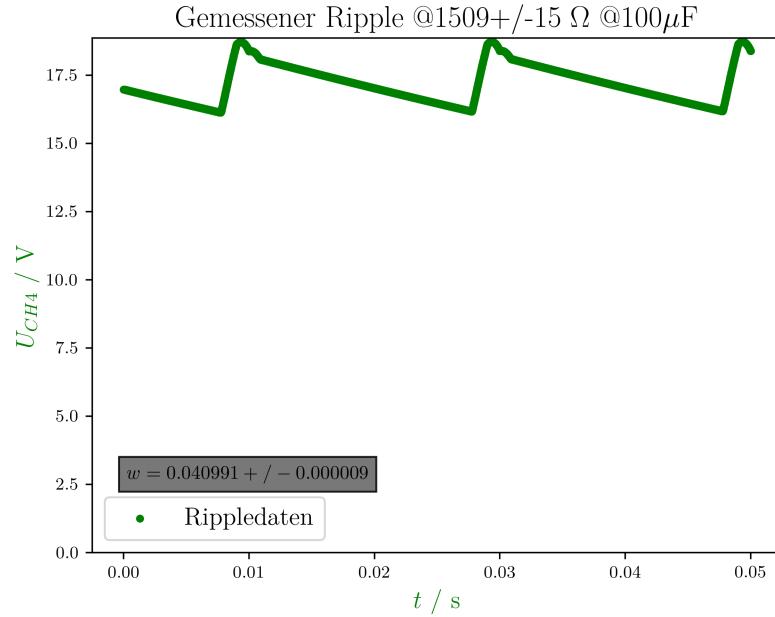
**Abbildung 35:** Erhaltene Ströme bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $10 \mu$  Farad und einem Widerstand von  $(99,2 \pm 1,1) \Omega$

Damit der Unterschied eines Größeren Kondensators für Glättung der Spannung untersucht werden kann wird die selbe Prozedur nochmals mit einem größeren Kondensator

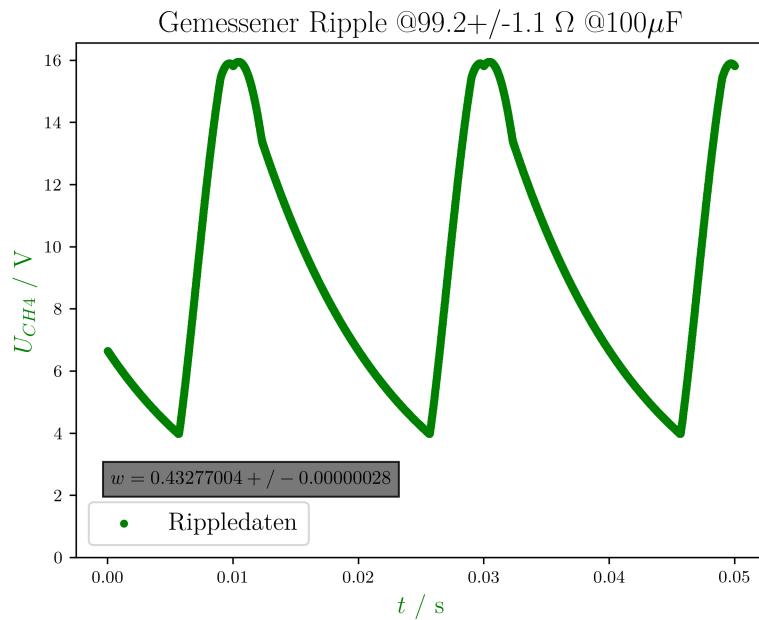
durchgeführt. Wie bereits erwähnt wurde hier nur die Welligkeit ausgewertet, was in folgenden Abbildungen ersichtlich ist.



**Abbildung 36:** Geglättete Spannungskurve bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $100 \mu$  Farad und einem  $\infty$  großen Widerstand



**Abbildung 37:** Geglättete Spannungskurve bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $100 \mu$  Farad und einem Widerstand von  $(1509 \pm 15) \Omega$

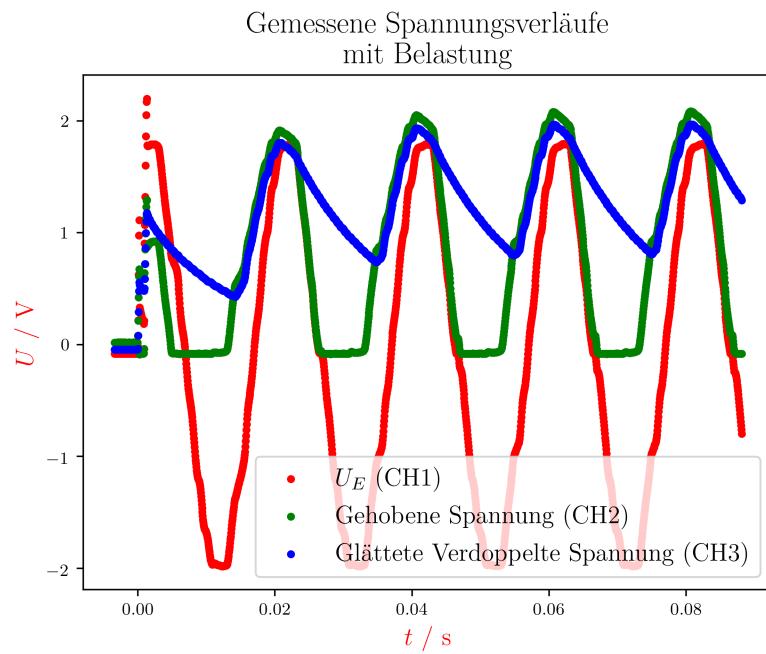
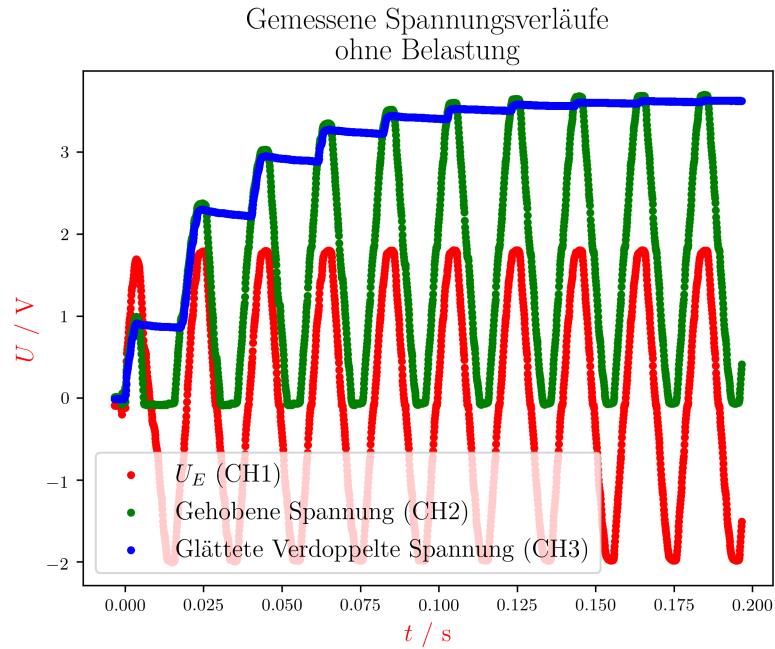


**Abbildung 38:** Geglättete Spannungskurve bei einem Kondensator mit einer Kapazität von  $100 \mu$  Farad und einem Widerstand von  $99,2 \pm 1,1 \Omega$

## 6.4 Untersuchung der Spannungsverläufe in einer Spannungsverdopplerschaltung

Zunächst wird die grafische Darstellung der Spannungsverläufe an den Bauteilen als Funktion der Zeit über mehrere Perioden für beide Belastungsfälle veranschaulicht.

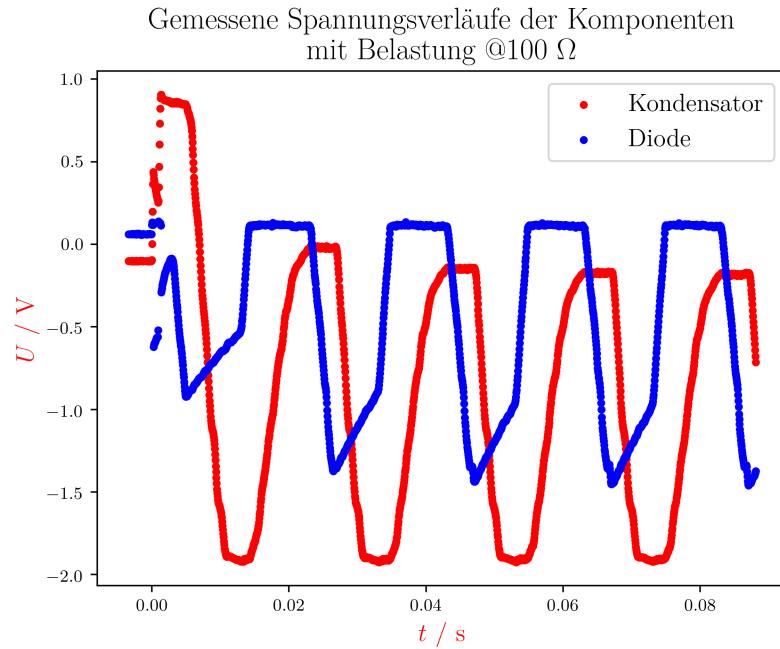
In den folgenden Abbildungen sind die aufgezeichneten Spannungsverläufe mit, Abbildung 39 und ohne, Abbildung 40, Belastung ersichtlich.

**Abbildung 39:** Gemessener Spannungsverlauf mit einer Belastung**Abbildung 40:** Gemessener Spannungsverlauf mit ohne Belastung

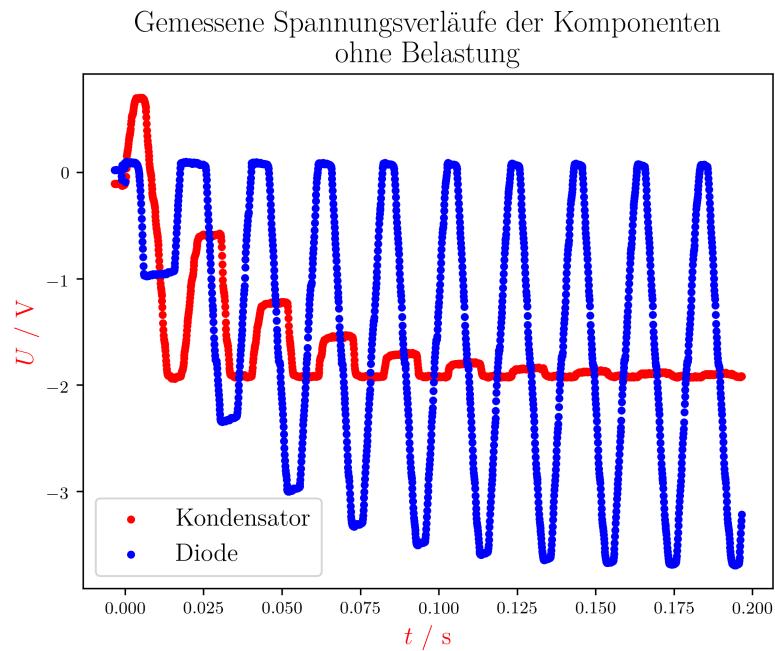
Die Spannung an den Komponenten wurde dabei, wie folgt, errechnet.

$$U_{C1} = U_{CH1} - U_{CH2} \quad U_{D2} = U_{CH2} - U_{CH3} \quad (6)$$

Die so erhaltenen Ergebnisse sind in folgenden Abbildung 41 mit Belastung und Abbildung 42 ohne Belastung ersichtlich.



**Abbildung 41:** Erhaltener Spannungsverlauf bei einer Belastung von  $(99,2 \pm 1,1)\ \Omega$



**Abbildung 42:** Erhaltener Spannungsverlauf ohne Belastung

## 7 Diskussion

### 7.1 Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode

#### 7.1.1 in Durchlassrichtung

Die erhaltene Diodenkennlinie entspricht genau der Erwartung.

Auch der erhaltener Wert für die “forward voltage” entspricht ungefähr jenem, der anhand des Datenblattes vorausgesagt wurde. [5]

#### 7.1.2 in Sperrrichtung

Die typische Form der Diodenkennlinie in Sperrrichtung ist im gemessenen Bereich leider nicht sichtbar.

Wie zu erwarten war, war zwar ein kleiner negativer Strom vorhanden, der in der Nähe des Nullpunkts bleibt. Gröbere Ausschwankungen werden, laut Datenblatt, erst ab 1000 Volt ersichtlich. [5]

Die erhaltenen Werte entsprechen also den Erwartung, weil die Durchbruchspannung mit der gegebenen Spannungsquelle nicht erzeugt werden kann.

Die gemessenen Sperrstromwerte sind alle kleiner als 1 mA also sind sie deutlich kleiner als 5 mA, was den vorgegebenen Werten laut Datenblatt entspricht. [5]

### 7.2 Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode

Die interpolierte Kurve der Messwerte entspricht genau der aus dem Datenblatt. [1]

Zusätzlich wurde noch die “break down voltage” 4.56 V, welche mit dem Cursor bestimmt wurden, mit den Werten aus dem Datenblatt (min 4.47 V nominal 4.7 V max 4.94V)[1] und verglichen. Auch dieser passen genau zu den vorausgesagten Wert.

### 7.3 Untersuchung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen

Aus dem bekannten Ohm’schen Gesetz folgt:

$$I = \frac{U}{R} \quad (7)$$

Daraus folgt der Schluss, dass wenn der Widerstand kleiner wird, der Strom anwächst. Aus diesem Grund wird der Kondensator mehr belastet, weil so mehr Ladung entzogen wird.

Ein größerer Kondensator kann mehr Ladungen speichern und dadurch den Widerstand besser versorgen wodurch die Welligkeit bei den verschiedenen Widerstandsphasen kleiner wird. Jedoch ist auch zu erwähnen, dass, bis sich das System einschwingt, eine längere Zeit benötigt wird, was in Abbildung 36 ersichtlich ist.

Es kann vorkommen, dass die Frequenz zu hoch ist, sodass der Kondensator in der Periodendauer nicht vollständig geladen werden kann, wie beispielsweise in Abbildung 36

ersichtlich. Die Kurve weißt eine deutlich höhere Welligkeit auf als die Kurve in Abbildung 30.

Durch einen größeren Widerstand fließt mehr Strom, wie es in Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35 ersichtlich ist.

Wenn das System eingeschwungen ist, wird die Spannung der Diode negativ, wie in allen Abbildungen der Spannung ersichtlich.

Am Stromverlauf wird auch sichtbar, dass wenn die Spannung in der Diode absinkt, der Strom beginnt durch den Kondensator zu fließen. Dadurch entlädt sich dieser und beginnt den Spannungsabfall zu kompensieren.

Die Welligkeit nimmt ab, wenn die Kapazität des Kondensators größer wird, weil dieser den Verbrauch besser decken kann. Weil ein großer Kondensator mehr Ladungen halten kann, kann er für längere Zeit bei gleichen Strom, oder bei höheren Strom für die gleiche Zeit, die Spannung erhalten.

Bei gar keiner Belastung fließt zwar Strom, aber nur aufgrund des Rests von Kondensatoren und Dioden, weil diese nicht perfekt sind, wie auch in Abbildung 33 ersichtlich.

## 7.4 Untersuchung der Spannungsverläufe in einer Spannungsverdopplerschaltung

Das Phänomen der Spannungsverdopplung lässt sich in 2 Phasen aufteilen.

Die 1. Phase ist die Phase, wo eine positive Spannung in Durchlassrichtung über die Diode 1 anliegt.

In Phase 2 wird über die Diode 1 eine Negative Spannung angelegt.

In Phase 1 ist der einzige Weg für Stromfluss der Weg über Diode 1 und Kondensator 1 zurück zum Transformator, wodurch sich dieser Kondensator auflädt. Dies gilt, weil alle anderen Wege durch Diode 2 blockiert sind.

Bei Phase 2 ist der einzige Weg für den Stromfluss über Kondensator 1, Diode 2 und Kondensator 2, wobei zusätzlich zur positive Spannung vom Trafo, noch die Spannung des geladenen Kondensators C1 hinzukommt, den Kondensator C2 zu laden.

Diese 2 Phasen wechseln sich so oft ab, bis C1 zur Eingangsspannung geladen ist und C2 die doppelte Spannung von C1 hat, wodurch nun eine Spannungsverdopplung entsteht. Dabei ist zu erwähnen, dass die Verdoppelung durch die Addition der Spannung von C1 und den Trafo ermöglicht wird.

Diese erklärte Schaltung zeigt nur den Fall von keiner Belastung. Gibt es jedoch eine Belastung so gibt es einen Weg für den Kondensator, sich über den Widerstand zu entladen, wie in Abbildung 39 ersichtlich.

Eine Verbesserung der Schaltung wäre, einen größeren Widerstand zu verwenden, wodurch die Belastung auf den Kondensator geringer wird, oder eine Vergrößerung der Kapazität der Kondensatoren.

Wie zu erwarten war, pendelt sich die Kondensatorspannung bei einen bestimmten Wert ein, siehe Abbildung 42. Dies ist jedoch nicht im Spannungsverlauf des Kondensators beim belasteten Fall ersichtlich, siehe Abbildung 41.

Der Spannungsverlauf über die Diode baut sich beim unbelasteten Fall auf, wie in Abbildung 42 ersichtlich. Beim belasteten Fall jedoch, wird erkennbar, dass der maximale Spannungsunterschied einigermaßen konstant bleibt, da es aufgrund des Entladens des Kondensators am Widerstand, keine Möglichkeit gibt, dass sich die Spannungen des Kondensators und des Trafos addieren.

### 7.5 Verbesserungsvorschläge

Ein Verbesserungsvorschlag wäre, die Tastkabel für alle Versuche zu verwenden, weil das Oszilloskop darauf eingestellt ist, den 10x Modus zu verwenden.

Wenn weiterhin die Bananenbuchsenstecker verwendet werden sollen, wäre es besser die entsprechenden Adapterstücke zu verwenden, um so die Koaxialkabel zu vermeiden.

## 8 Zusammenfassung

Die Diodenkennlinie in Durchlassrichtung stimmt mit der Referenzlinie aus dem Datenblatt überein. In Sperrrichtung wurde nur ein kleiner Strom, der viel kleiner als der Durchlassstrom war, aufgewendet. Dadurch konnte die charakteristische Linie nicht erzeugt werden, was auch zu erwarten war.

Auch der direkte Vergleich der erhaltenen Diodenkennlinie der Zenerdiode stimmt mit jener aus dem Datenblatt überein. Auch die verglichenen Werte der "break down voltage" und der "forwarding voltage" stimmen mit dem Datenblatt überein.

Wie anhand der Skizzen und Werten in den Diagrammen klar ersichtlich ist, nimmt die Welligkeit bei einem höheren Widerstand, sowie einer Erhöhung der Kapazität, ab.

## Literatur

- [1] *1N53 Series. 5 Watt Surmetic 40 Zener Voltage Regulators.* Onsemi. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/1n5333b-d.pdf> (besucht am 28.09.2021).
- [2] Franz Deimel. *Grundlagen der Elektrotechnik.* Linz: Veritas, 2015. ISBN: 9783710101342.
- [3] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2.* Springer-Verlag GmbH, 23. März 2018. ISBN: 978-3-662-55789-1. URL: [https://www.ebook.de/de/product/31029958/wolfgang\\_demtroeder\\_experimentalphysik\\_2.html](https://www.ebook.de/de/product/31029958/wolfgang_demtroeder_experimentalphysik_2.html).
- [4] *Fehlerfortpflanzung.* de. Page Version ID: 205827844. Nov. 2020. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Fehlerfortpflanzung&oldid=205827844> (besucht am 08.05.2021).
- [5] *Gleichrichterdioden mit Standard-Sperrverzug 1N4007.* Diotec Semiconductors. URL: [https://diotec.com/tl\\_files/diotec/files/pdf/datasheets/1n4001.pdf](https://diotec.com/tl_files/diotec/files/pdf/datasheets/1n4001.pdf) (besucht am 28.09.2021).
- [6] Franz Hanauer. *Halbleiterdiode.* de. Version 30.09.2020. Universitätsplatz 5/I, 8010 Graz, Karl-Franzens Universität Graz, 2020.
- [7] Braunschweig Wolfgang Kessel. *Die ISO/BIPM-GUM Sicht:Schätzwert & Messunsicherheit.* 2004.

## Abbildungsverzeichnis

1	Skizze des Bändermodells [6]	3
2	Skizze von p-Dotierten Silizium [6]	4
3	Skizze von n-Dotierten Silizium [6]	4
4	Skizze des p-n-Übergangs [6]	5
5	Verwendeter "Power Supply"	5
6	Verwendetes Oszilloskop	5
7	Verwendeter Transformator	6
8	Verwendetes digitales Multimeter	6
9	Verwendete Bauteile im Steckbrett	7
10	Verwendete Tastkabel	7
11	Skizze des Schaltplans, der für die erste Aufgabe benötigt wird [6]	8
12	Versuchsaufbau für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode in Durchlassrichtung	8
13	Skizze des Schaltplans, der für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode in Sperrrichtung benötigt wird [6]	10
14	Versuchsaufbau für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Gleichrichterdiode in Sperrrichtung	10
15	Skizze des Schaltplans, der für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode benötigt wird [6]	11

16	Versuchsaufbau für die Ermittlung der Strom-Spannungscharakteristik einer Zenerdiode . . . . .	12
17	Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten für die Kennlinie der Zenerdiode . . . . .	13
18	Skizze des Schaltplans, der für die Ermittlung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen benötigt wird [6] . . . . .	13
19	Versuchsaufbau für die Ermittlung der Strom- und Spannungsverläufe mit unterschiedlichen Glättungskondensatoren und Belastungswiderständen . . . . .	14
20	Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei einem $\infty$ Widerstand . . . . .	14
21	Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei einem Widerstand von $(1509 \pm 15) \Omega$ . . . . .	15
22	Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei einem Widerstand von $99,2 \pm 1,1 \Omega$ . . . . .	15
23	Skizze des Schaltplans für die Greinacher-Schaltung [6] . . . . .	16
24	Versuchsaufbau für die Ermittlung des Spannungsverlaufs einer Spannungsverdopplerschaltung . . . . .	16
25	Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei Greinacher-Schaltung und einem $\infty$ Widerstand . . . . .	17
26	Vom Oszilloskop aufgezeichnete Daten bei Greinacher-Schaltung und einem Widerstand von $(1509 \pm 15) \Omega$ . . . . .	17
27	Gemessene Daten zur Ermittlung der Diodenkennlinie in Durchlassrichtung . . . . .	19
28	Gemessene Daten zur Ermittlung der Diodenkennlinie in Sperrrichtung . . . . .	20
29	Interpolierte Diodenkennlinie als I / U . . . . .	21
30	Erhaltene Spannungsverläufe bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $10 \mu$ Farad und einem $\infty$ großen Widerstand . . . . .	22
31	Erhaltene Spannungsverläufe bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $10 \mu$ Farad und einem Widerstand von $(1509 \pm 15) \Omega$ . . . . .	23
32	Erhaltene Spannungsverläufe bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $10 \mu$ Farad und einem Widerstand von $99,2 \pm 1,1 \Omega$ . . . . .	23
33	Erhaltene Ströme bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $10 \mu$ Farad und einem $\infty$ großen Widerstand . . . . .	24
34	Erhaltene Ströme bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $10 \mu$ Farad und einem Widerstand von $(1509 \pm 15) \Omega$ . . . . .	25
35	Erhaltene Ströme bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $10 \mu$ Farad und einem Widerstand von $(99,2 \pm 1,1) \Omega$ . . . . .	25
36	Geglätete Spannungskurve bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $100 \mu$ Farad und einem $\infty$ großen Widerstand . . . . .	26
37	Geglätete Spannungskurve bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $100 \mu$ Farad und einem Widerstand von $(1509 \pm 15) \Omega$ . . . . .	26
38	Geglätete Spannungskurve bei einem Kondensator mit einer Kapazität von $100 \mu$ Farad und einem Widerstand von $99,2 \pm 1,1 \Omega$ . . . . .	27
39	Gemessener Spannungsverlauf mit einer Belastung . . . . .	28
40	Gemessener Spannungsverlauf mit ohne Belastung . . . . .	28
41	Erhaltener Spannungsverlauf bei einer Belastung von $(99,2 \pm 1,1) \Omega$ . . . . .	29
42	Erhaltener Spannungsverlauf ohne Belastung . . . . .	29

**Tabellenverzeichnis**

1	Verwendete Geräte . . . . .	7
2	Abgelesene Werte auf den Multimeter für die Spannung und die Stromstärke $U_F$ ... abgelesener Wert der Spannung in mV $\Delta U_F$ ... entsprechende Unsicherheit der Spannung in mV $I_F$ ... abgelesener Wert der Stromstärke in mA $\Delta I_F$ ... entsprechende Unsicherheit der Stromstärke in mA . . . . .	9
3	Abgelesene Werte auf den Multimeter für die beiden Spannungen $U_R$ ... abgelesener Wert der Gesamtspannung in V $\Delta U_R$ ... entsprechende Unsicherheit der Gesamtspannung in V $U_{IR}$ ... abgelesener Wert der Spannung am Widerstand in V $\Delta U_{IR}$ ... entsprechende Unsicherheit der Spannung am Widerstand in V $I_{Sperr}$ ... errechneter Wert des Sperrstroms in A $\Delta I_{Sperr}$ ... entsprechende Unsicherheit des Sperrstroms in A . . . . .	11