

Physik in der Praxis:

Elektronik

1. Versuch:

Passive Schaltungen

Abgabe am	20.10.2010
Übungsgruppe	9 (Dienstagnachmittag)
Übungsleiter	Rainer Schurbert
Bearbeiter	Lucas Hackl Benjamin Maier

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	3
2	Filter und Bode-Diagramm	3
2.1	Simulation der Schaltung	3
2.2	Reale Schaltung	4
3	Eigenschaften von Dioden	6
3.1	Widerstandsmessung mit Digitalmultimeter	6
3.2	Direktaufnahme von Kennlinien	7
3.3	Einzelmessungen zur Aufnahme von Kennlinien	8
4	Differentieller Widerstand einer Diode	8
5	Anhang	10
5.1	Diodenkennlinien	10
5.2	Messwerte	13

Verwendete Geräte

Funktionsgenerator	FG1617
Oszilloskop	HM203-7 (hameg)
DMM	Voltcraft 4090
	Voltcraft GS 6510

1 Abstract

Im Versuch wurden einfache Formen passiver Schaltungen untersucht: Einerseits wurden Messungen an einem RC-Tiefpassfilter durchgeführt, der zunächst mittels Software simuliert wurde, andererseits wurden die Eigenschaften unterschiedlicher Dioden untersucht. Für den Tiefpassfilter, der ein lineares Bauelement darstellt, ergab sich gute Übereinstimmung mit der Simulation, was Bode-Diagramm und Grenzfrequenz anging – außerdem fand sich eine gewisse Signalverzerrung. Bei der Diode, die ein nicht-lineares Bauelement ist, konnten sowohl die materialabhängigen charakteristischen Kennlinien als auch die Sperr- und Durchlassrichtung vermessen werden. Filter und Dioden besitzen damit charakteristische Eigenschaften, welche sich vor allem zur Signalverarbeitung nutzen lassen, weshalb die hier erlernten Grundlagen für das Verständnis komplexerer Schaltungen essentiell sind.

2 Filter und Bode-Diagramm

2.1 Simulation der Schaltung

Mit der Simulationssoftware für elektronische Schaltungen Multisim 10 wurde ein RC-Tiefpass 1. Ordnung aufgebaut und mithilfe eines Bode-Plotters die Übertragungsfunktion $\frac{U_{aus}}{U_{ein}}$ sowie die Phasenverschiebung gemessen (für die Spannung über dem Kondensator). Dabei betrachten wir außer dem normalen Sinussignal unterschiedlicher Frequenz auch ein Rechtecksignal, um die Wirkung des Tiefpassfilters zu simulieren. In den Diagrammen lässt sich deutlich der 3dB-Punkt ablesen.

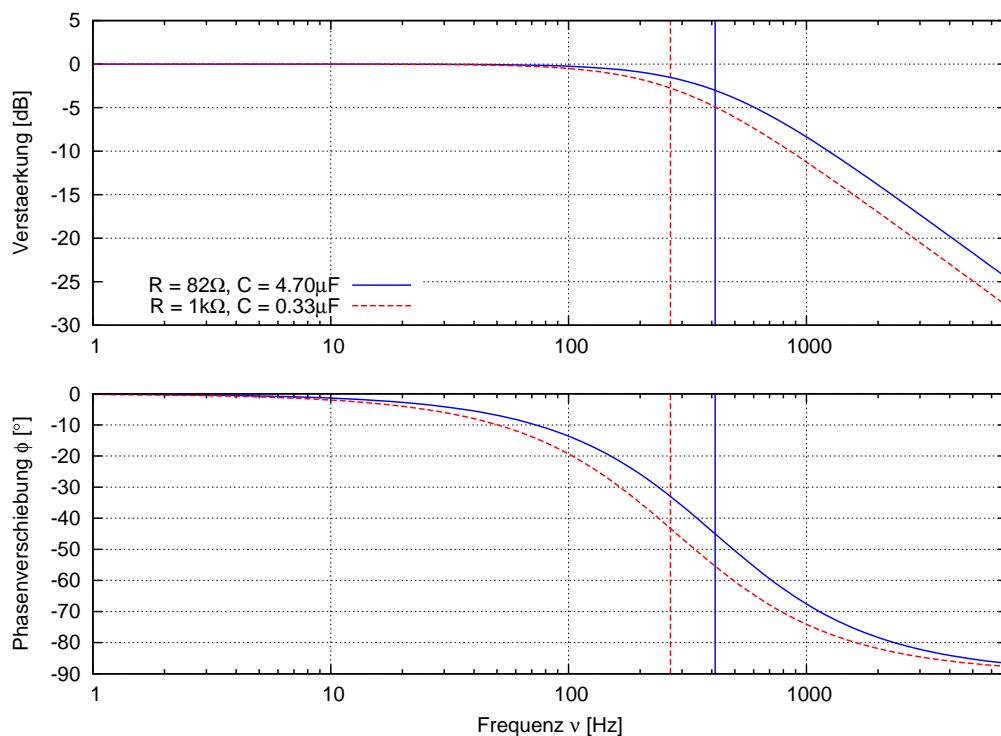


Abbildung 1: Bodeplot aus der Simulation für die angegebenen Konfigurationen. Die senkrechten Markierungen zeigen die Grenzfrequenzen, die Schnittpunkte mit den zugehörigen Kurven sind die 3dB-Punkte.

Für die Grenzfrequenz nimmt die Phasenverschiebung einen Wert von 45° an und entspricht damit genau dem theoretischen Schnittpunkt der Asymptote für große Frequenzen mit der waagerechten 0dB-Geraden. Für kleine Frequenzen verschwindet die Phasenverschiebung und es findet keine Abschwächung statt, während für große Frequenzen ungefähr ab der Grenzfrequenz die Verstärkung um 20dB pro Dekade abfällt und die Phasenverschiebung sich 90° nähert. Dieses Verhalten lässt sich aus dem Modell der Elektrodynamik herleiten und entspricht damit unserer Hypothese.

Des Weiteren haben wir auch die Wirkung des Tiefpassfilters auf ein Rechtecksignal untersucht. Da die Wirkung des Filters, welcher ein lineares Bauelement ist, als linearer Operator auf dem Raum der Signalfunktionen aufgefasst werden kann, erscheint es zur Analyse sinnvoll die Signalfunktion der Rechteckspannung in der Eigenbasis des Operators darzustellen, also in einer Fourierreihe zu entwickeln. Dabei fällt auf, dass die hochfrequenten Anteile des Signals, welche für die Kanten des Signals wichtig sind, stärker gedämpft werden, weshalb eine Abrundung der Kanten stattfindet (Abb.2, oben). Wenn die Frequenz der Rechteckspannung die Grenzfrequenz übersteigt, wird über die Abrundung hinaus das gesamte Signal gedämpft, da selbst die Fourieranteile mit niedrigerer Frequenz größer als die Grenzfrequenz sind (Abb.2, mittig). Zugleich macht sich der Kondensator bemerkbar, der gerade bei hohen Frequenzen nicht instantan entladen wird, sondern durch endlich große Lade- und Entladephasen zur weiteren Abrundung bzw. asymmetrischen Verzerrung des Signals beiträgt (Abb.2, unten).

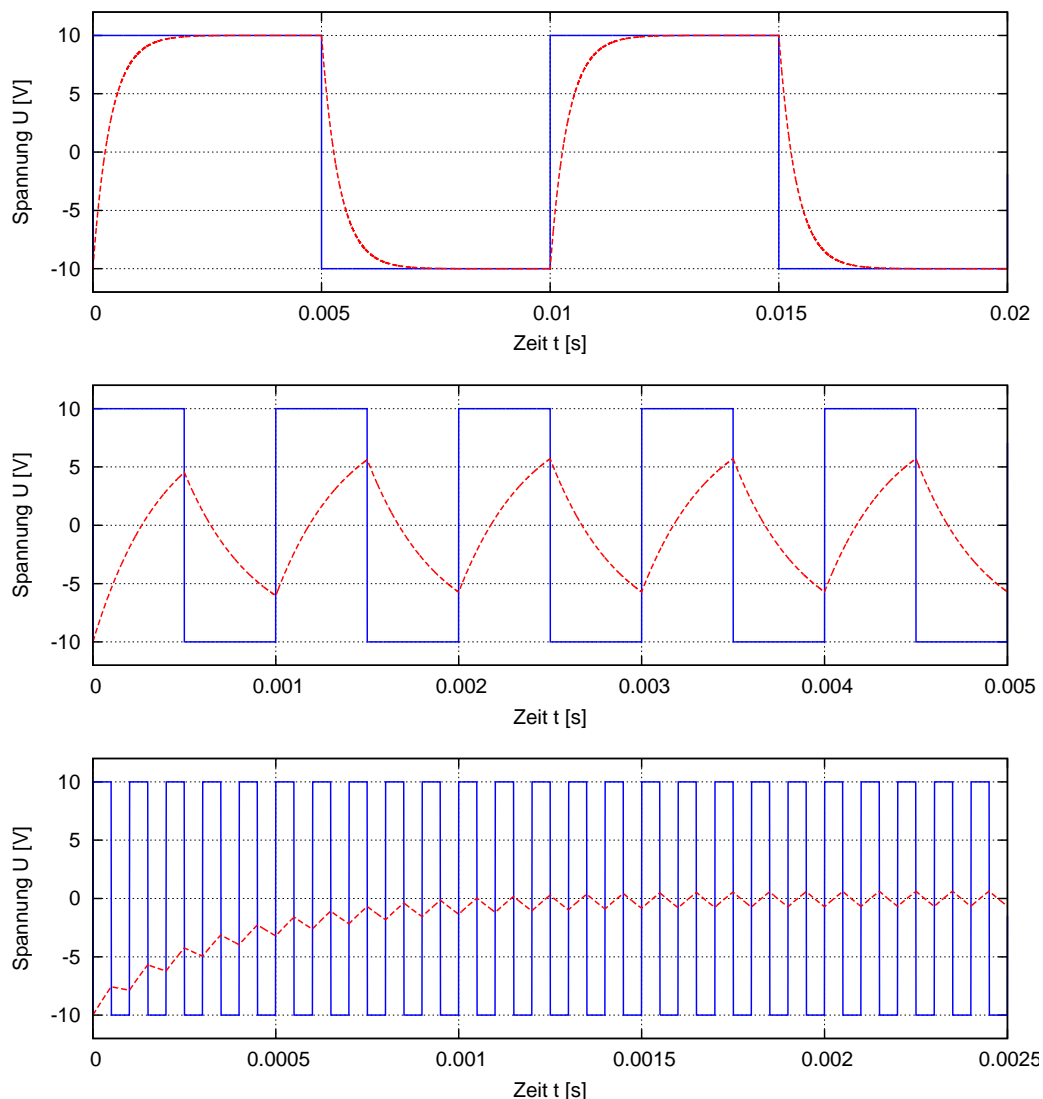


Abbildung 2: Modulation der Rechteckspannung durch den Kondensator bei oben) $\nu = 100\text{ Hz}$, mittig) $\nu = 1\text{ kHz}$, unten) $\nu = 10\text{ kHz}$

2.2 Reale Schaltung

Für die reale Schaltung verwenden wir zwei unterschiedliche Widerstände (in den Bereichen $[10\Omega, 50\Omega]$ und $[1\text{ k}\Omega, 5\text{ k}\Omega]$) und passen auf Empfehlung unseres Versuchsbetreuers die Kondensatoren daraufhin so an, dass Grenzfrequenzen in der Größenordnung von einigen Hundert Hertz liegen, um die Betrachtung am Oszillo-

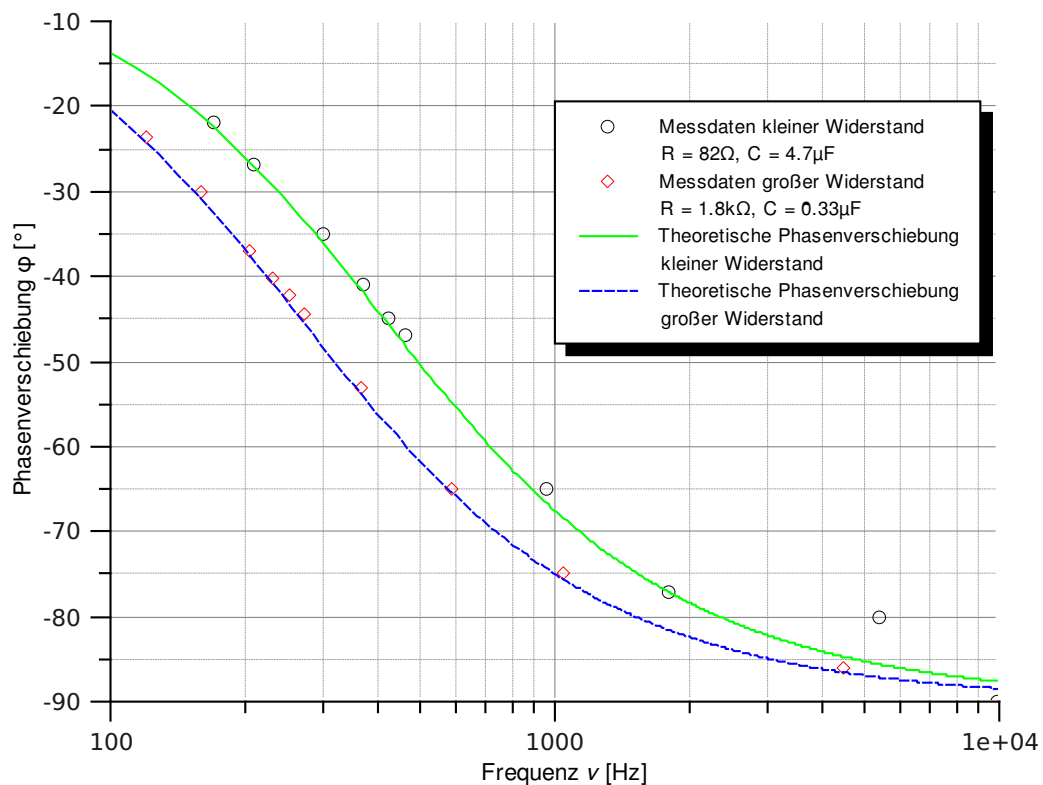
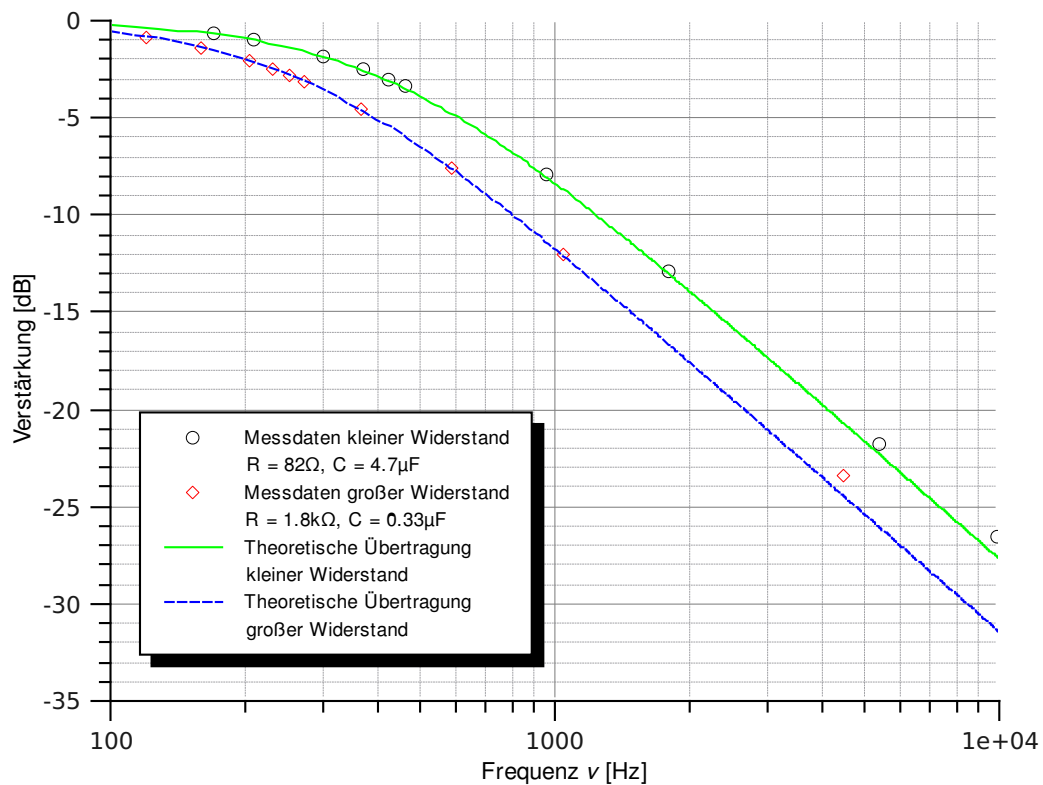


Abbildung 3: Messungen für beide Konfigurationen an der realen Schaltung

skop zu vereinfachen. Nach Auswahl von Widerständen und Kondensatoren messen wir die realen Werte und erhalten die folgenden Resultate:

$$R_1 = 82.14 \Omega, C_1 = 4.673 \mu\text{F}$$

$$R_2 = 1.02 \text{ k}\Omega, C_2 = 0.326 \mu\text{F}.$$

Damit zeigt sich eine kleine Abweichung von wenigen Prozent gegenüber den angegebenen Werten. Die Grenzfrequenzen lassen sich direkt gemäß

$$\nu = \frac{1}{2\pi RC}$$

berechnen:

$$\nu_1 = 413 \text{ Hz}$$

$$\nu_2 = 268 \text{ Hz}.$$

Aus der realen Schaltung erstellen wir die Bodediagramme für Spannungsverstärkung und Phasenverschiebung. Die Grenzfrequenz lässt sich besonders gut anhand der Phasenverschiebung von 45° ablesen und ist offenbar mit den berechneten Werten vereinbar. Zugleich führen wir in den Plots einen Vergleich mit den theoretischen Kurven durch, welche sich physikalisch zu

$$A(\nu) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi\nu CR)^2}}$$

$$\phi(\nu) = -\arctan(2\pi\nu CR)$$

ergeben. Es zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung der theoretischen Werte mit experimentellen Resultaten.

Da andere Kombinationen von Widerständen und Kondensatoren als in der Simulation verwendet wurde, lassen sich die Werte nicht direkt vergleichen. Dennoch lassen sich kleinere Abweichungen zur Theorie aus den Diagrammen entnehmen. Dies liegt zum einen daran, dass sich Widerstände und Kondensatoren auch nur mit einer gewissen Genauigkeit messen lassen, und zum anderen, dass die Simulation bzw. Theorie von idealen Bauelementen ausgeht, während im Experiment noch Widerstände, Induktivitäten und Kapazitäten durch die Kabel entstehen und der Frequenzgenerator keine vollkommenen Signale liefert.

Eine weitere Beobachtung, welche wir bei Verwendung des Oszilloskops machten, war der Abfall der Amplitude der Ausgangsspannung bei höheren Frequenzen für die Verwendung des niedrigeren Widerstands: Dies liegt im Innenwiderstand des Funktionsgenerators begründet, durch den mit dem externen Widerstand ein Spannungsteiler entsteht. Für große Frequenzen nimmt der fließende Strom über den Kondensator zu, weshalb gleichzeitig eine größere Spannung am Innenwiderstand abfällt und zu einer verringerten gemessenen Eingangsspannung führt. Dies ließ sich am Oszilloskop besonders gut beobachten, wenn man Eingangs- und Ausgangsspannung auf die beiden Kanäle legte und die Frequenz veränderte – auf diese Weise ließ sich gut beobachten, wie nicht nur die Ausgangsspannung stark abfiel, sondern auch die Eingangsspannung leichte Senkungen aufnahm. Dieser Effekt trat vornehmlich beim kleineren Widerstand R_1 auf, da der entstehende Spannungsteiler zwischen Innenwiderstand R_i und Widerstand R_1 dem Verhältnis der Widerstände zueinander entspricht – also der Effekt bei großem R_1 kleiner wird.

3 Eigenschaften von Dioden

3.1 Widerstandsmessung mit Digitalmultimeter

Im ersten Schritt führen wir eine Widerstandsmessung mithilfe eines Digitalmultimeters durch. Dabei wird der Messbereich unterschiedlich eingestellt, während an der Diode sowohl in Durchlass- als auch in Sperrrichtung gemessen wird. Dabei erhalten wir die Resultate aus Tabelle 1. Offenbar ist der gemessene Widerstand abhängig vom Messbereich: Da es sich um ein nichtlineares Bauelement handelt, verhält sich eine Diode nicht nach dem Ohmschen Gesetz. Zur vollständigen Beschreibung genügt nicht die Angabe eines Widerstands, der als Proportionalitätskonstante zwischen Spannung und Strom konstant bleibt, sondern es sollte eine vollständige Kurve dieser Verhältnisse aufgenommen werden – die sogenannte U - I -Kennlinie. Der Grund für die unterschiedlichen

Messbereich [Ω]	Widerstand in Durch- lassrichtung [$k\Omega$]	Widerstand in Sperr- richtung [$k\Omega$]
20	0.014	zu hoch
200	0.180	zu hoch
2k	0.190	zu hoch
20k	zu hoch	10.5
200k	0.100	75.2
2M	zu hoch	10.0
20M	9900.000	20.0

Tabelle 1: Direkte Widerstandsmessung mit dem Widerstandsmessgerät

Messergebnisse für den Widerstand für verschiedene Messbereiche liegt im Messverfahren selbst: Das Digitalmultimeter führt eine Spannungsmessung über dem Widerstand durch, wobei eine Konstantstromquelle einen möglichst von der Belastung unabhängigen Strom liefern soll – soll der Messbereich größer werden, so muss der Strom dieser Quelle erhöht werden, da in der Regel die minimal messbare Spannung konstant bleibt. Durch die Umstellung des Messbereichs wird also der Strom verändert, was sich auf den Messwert des Verhältnisses von Spannung und Strom an der Diode auswirkt, das eben nicht gleich bleibt. Folglich ist es nicht sinnvoll vom Widerstand einer Diode zu sprechen, welcher sich nicht mit einem Digitalmultimeter messen lässt, da nicht der der Messung zugrunde liegende Strom angezeigt wird – sinnvoll ist die Aufnahme der U - I -Kennlinie.

Bei der Messung in Sperrrichtung sollte eigentlich kein Strom fließen bzw. nur ein sehr geringer, da die Diode hier einen unendlichen bzw. sehr großen Widerstand besitzen sollte. Dies zeigt sich auch in unseren Messungen, bei denen der Widerstand entweder den Messbereich übersteigt oder sehr groß ist.

3.2 Direktaufnahme von Kennlinien

Nachdem wir verstanden haben, weshalb bei nichtlinearen Bauelementen wie Dioden die Kennlinie einer Widerstandsmessung vorzuziehen ist, wollen wir mithilfe des Transistortester-Systems (Computer mit Messgerät) die Kennlinien direkt aufnehmen. Dazu wird die Spannung über der Diode variiert, während zugleich der Strom gemessen wird. Als Ergebnis erhalten wir die Kennlinie. In den Diagrammen im Anhang sind die Kennlinien für Silizium-, Germanium- und Zener-Diode sowie die einiger LED aufgenommen worden – für die Zenerdiode wurde zusätzlich auch die Kennlinie in Sperrrichtung erstellt. Die Kennlinien sind charakteristisch für das entsprechende Material und es zeigt sich, dass der Punkt, ab dem der Strom mit steigender Spannung zunimmt, an unterschiedlichen Stellen ist. Bei den Leuchtdioden lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Farbe und Flussspannung (Spannung, bei der der Strom merklich zu fließen beginnt, z. B. 0.05 mA, übersteigt): Die Farbe der Leuchtdiode hängt nämlich wesentlich vom Bandabstand des eingesetzten Halbleitermaterials ab (aus dem Bandabstand resultiert die freiwerdende Energie pro Photon, welche dessen Wellenlänge und damit Farbe bestimmt). Während bei der roten Diode schon ab 1.8 V Strom fließt, geschieht dies bei der grünen (höhere Energie pro Photon und damit eine kürzere Wellenlänge) erst bei 2.2 V. Die sehr geringe Flussspannung der weißen LED überrascht hingegen: Eine Flussspannung von unter 1 V überrascht, da eher Werte von etwas über 3 V üblich sind¹.

Bei der Zener-Diode in Sperrrichtung beginnt der Strom erst bei im Vergleich zu den anderen Dioden in Durchlassrichtung sehr hohen Spannung zu fließen. Dies liegt am speziellen Aufbau der Zener-Diode, welche eine andere Dotierung und eine dünnere Sperrschicht besitzt (und deshalb nicht gänzlich sperrt). Eine Zener-Diode lässt sich sehr gut zur Stabilisierung verwenden, da sie bei unterschiedlichen Strömen einen konstanten Spannungsabfall aufweist. Hierzu muss das entsprechende Signal (also der zugehörige Strom) einfach durch die Zener-Diode geleitet werden.

¹http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode#Elektrische_Eigenschaften

3.3 Einzelmessungen zur Aufnahme von Kennlinien

Abschließend wollen wir noch durch Einzelmessungen die U - I -Kennlinien der Silizium- und Zener-Diode aufnehmen, wofür wir einen Widerstand von $R = 1004\Omega$ in Reihe mit einem Amperemeter und der Diode schalten und parallel die Spannung messen. Wir bestimmen damit für unterschiedliche Eingangsspannungen den Strom im Kreis und messen die Spannung an der Diode. Damit erhalten wir die in den Abb.4 dargestellten Kennlinien.

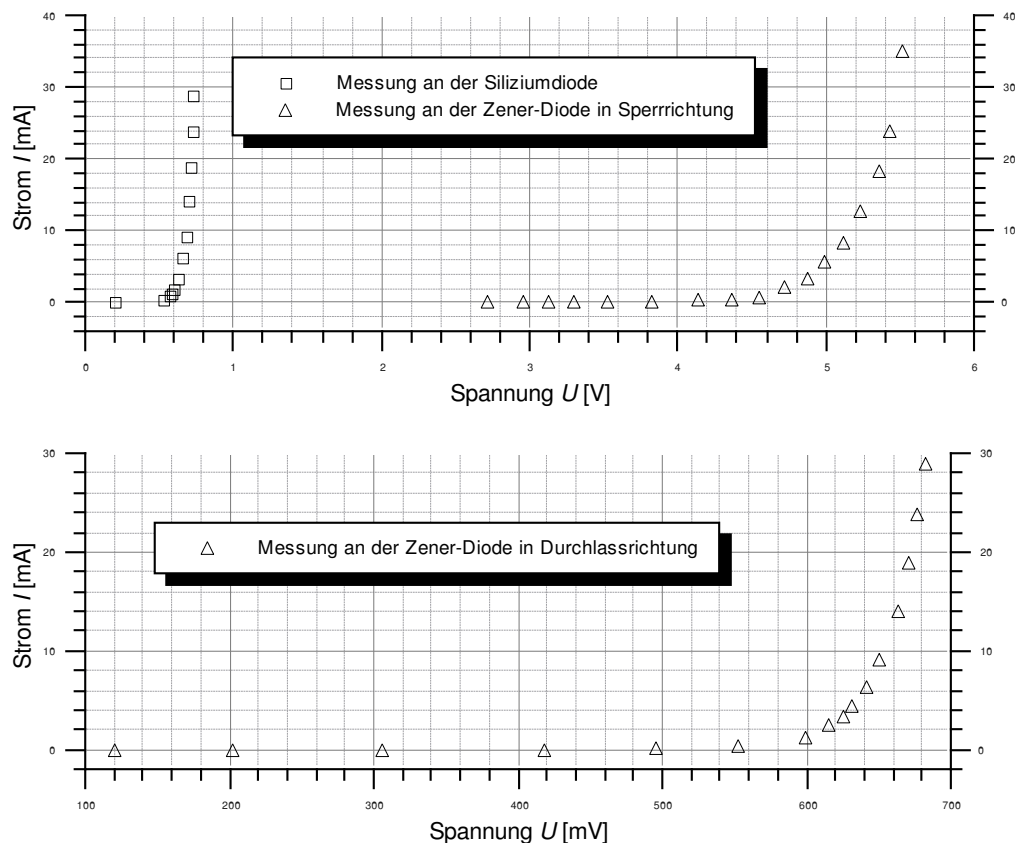


Abbildung 4: Kennlinien einer Siliziumdiode und einer Zenerdiode in Durchlass- und Sperrrichtung

4 Differentieller Widerstand einer Diode

Der Widerstand ist bei linearen Bauelementen als der Proportionalitätsfaktor zwischen Strom und Spannung definiert. Da für das nicht-lineare Bauelement der Diode dieses Verhältnis nicht unabhängig von Spannung bzw. Strom ist und sich deshalb kein allgemeiner Widerstand definieren lässt, spricht man vom differentiellen Widerstand, den die Diode für eine konkrete Kombination aus Spannung und Strom gerade besitzt. Dabei geht es nicht um das Verhältnis von Spannung und Widerstand an diesem Punkt, sondern um die Veränderung dieses Verhältnis – mathematisch gesehen also um die Steigung der Geraden am Punkt in der U - I -Kennlinie bzw. ihrem inversen Wert. Um den differentiellen Widerstand zu messen, bedienen wir uns der Überlagerung einer Gleichspannungsquelle (welche den Arbeitspunkt in Form der Grundspannung in der Kennlinie festlegt) mit einer Wechselspannung (anhand deren Amplitudenverzerrung der differentielle Widerstand abgelesen werden kann). Wir erhalten dabei die in Tabelle 4 im Anhang gegebenen Werte, woraus sich die in Abb. 5 dargestellte Kurve für den differentiellen Widerstand ergibt. Diese weicht mit ihrer scheinbaren Linearität vom erwarteten Verhalten ab. Ursache sind hier vermutlich die geringe Anzahl an Messwerten als auch der Versuchsaufbau. Die Kurven der Wechselspannungen ließen sich am Oszilloskop kaum scharf, bzw. stabil stellen, was die Aufnahme der Spannungsamplitude erschwerte.

Außerdem ist das dargestellte Intervall nicht in bester Weise geeignet den nicht-linearen Zusammenhang des dif-

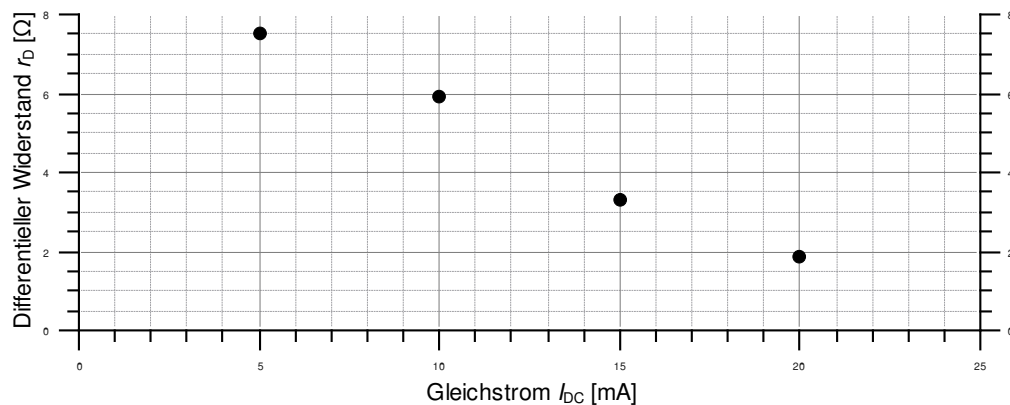


Abbildung 5: Aus den Messwerten errechneter differentieller Widerstand der Siliziumdiode für die geforderten Werte von I_{DC}

ferentiellen Widerstands (der sich je nach Arbeitspunkt deutlich, aber nicht-linear in Abhängigkeit von Strom und Spannung verändert) zu demonstrieren. Um hier Abhilfe zu schaffen und einen besseren Eindruck zu geben, haben wir uns deshalb entschieden aus dem Plot, den wir mit dem Transistortester gewonnen haben, eine zweite Kurve des differentiellen Widerstands zu extrapolieren (Abb.6). Auf dieser ist die Nicht-Linearität deutlich sichtbar.

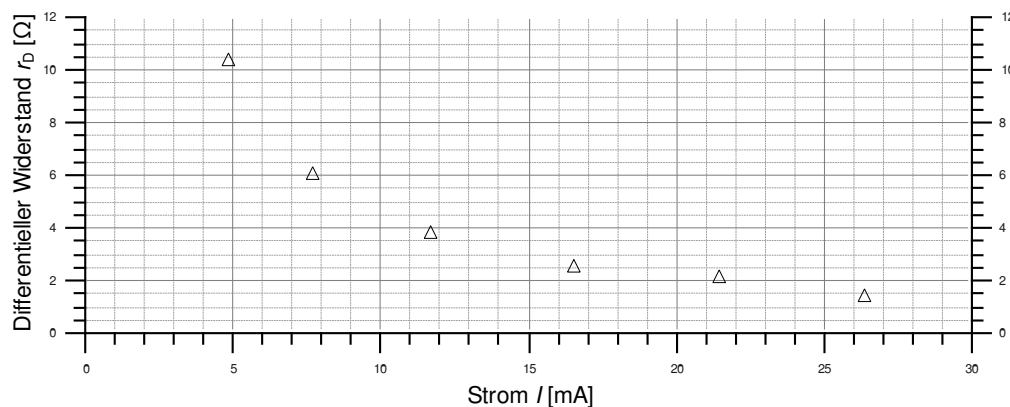


Abbildung 6: Aus der Kennlinie der Siliziumdiode näherungsweise berechneter differentieller Widerstand. Es wurde der Anstieg der Geraden zwischen zwei Messwerten bestimmt und in Beziehung zu dem Mittelwert von benachbarten Stromstärken gesetzt.

Wenn wir die Amplitude der Wechsellspannung vergrößern und zugleich den Arbeitspunkt mithilfe der Gleichspannung variieren, erkennen wir eine Signalverzerrung des Signals im unteren Spannungsbereich: Dies liegt daran, dass die Übertragungsfunktion, welche sich aus der Kennlinie der Diode ergibt, im Bereich niedriger Spannung nicht linear verläuft – folglich wird ein sinusförmiges Signal verzerrt. Für größere Spannungen (höhere Gleichspannung) verschiebt man den Arbeitspunkt immer weiter in den Bereich, dessen Übertragungsfunktion näherungsweise linear ist. Zugleich ist die Verzerrung davon abhängig, wie groß die Amplitude der Wechsellspannung ist, da sich die Krümmung der Übertragungsfunktion erst bei breiteren Bereichen bemerkbar macht. Insbesondere gilt dies bei der Einstellung der Wechsellspannung auf 500mV: Durch die große Amplitude tritt eine entsprechende Verzerrung auf, welche sich durch Erhöhung der Gleichspannung verbessern lässt, solange man nicht den Übertragungsbereich verlässt und die Sinuswellen abgeschnitten werden.

Auch diese Eigenschaft von Dioden ist für die Anwendung relevant, insbesondere erklärt sie Tonverzerrungen bei Verstärkern im niederfrequenten Bereich: Es gibt stets nur einen bestimmten ungefähr linearen Bereich, in dem der differentielle Widerstand zur Verstärkung genutzt werden kann ohne starke Tonverzerrungen in Kauf nehmen zu müssen.

5 Anhang

5.1 Diodenkennlinien

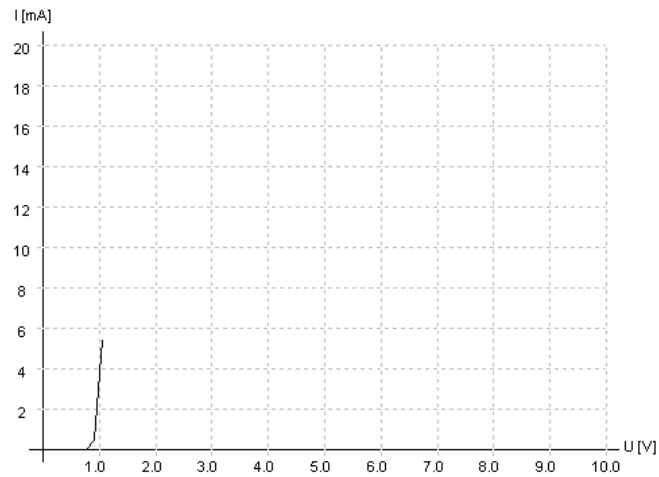


Abbildung 7: Kennlinie einer weißen LED

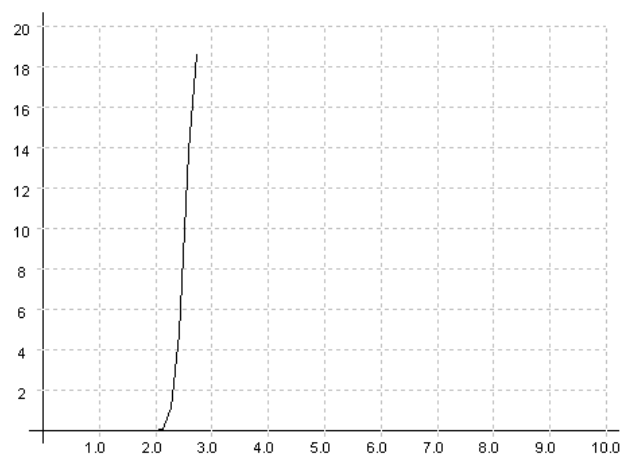


Abbildung 8: Kennlinie einer grünen LED

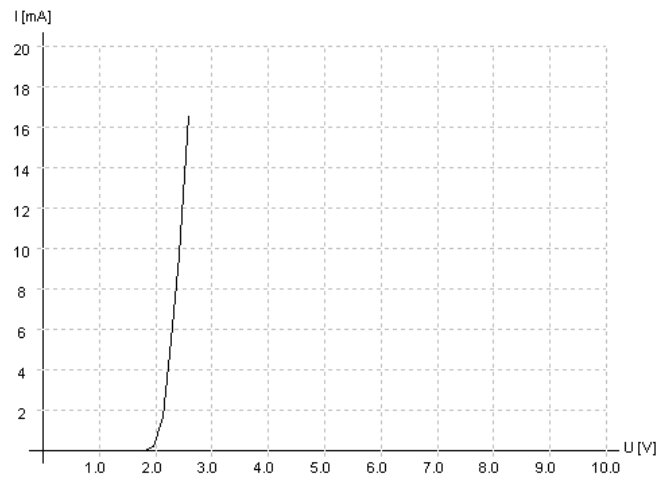


Abbildung 9: Kennlinie einer roten LED

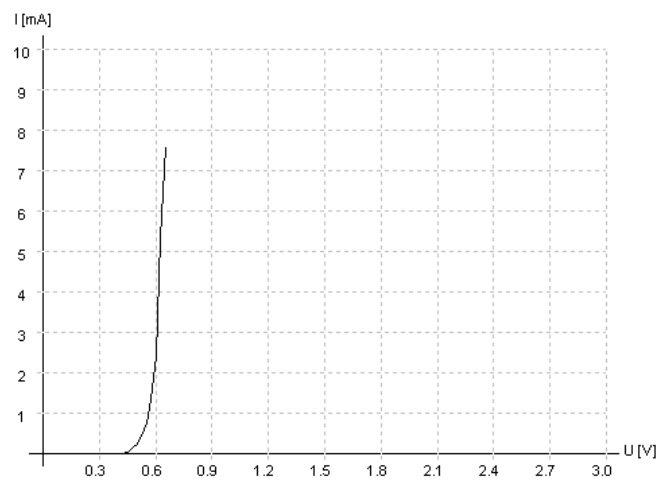


Abbildung 10: Kennlinie einer Siliziumdiode

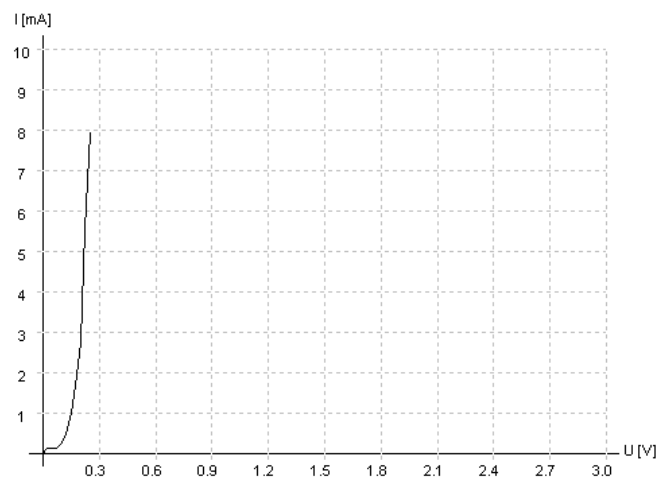


Abbildung 11: Kennlinie einer Germaniumdiode

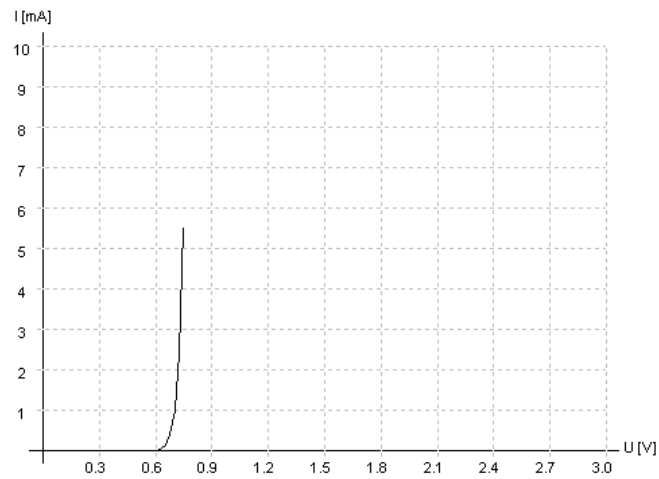


Abbildung 12: Kennlinie einer Zenerdiode in Durchlassrichtung

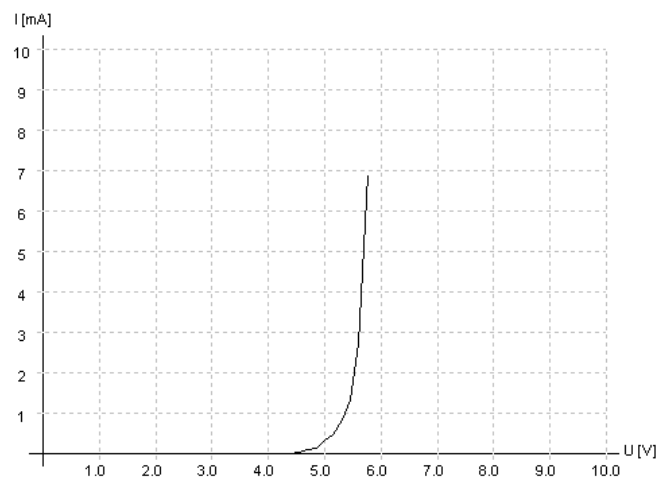


Abbildung 13: Kennlinie einer Zenerdiode in Sperrichtung

5.2 Messwerte

ν [Hz]	φ [°]	$2U_{\text{ein}}$ [V]	$2U_{\text{aus}}$ [V]	A [dB]
171	-21.8	9.8	9.1	-0.64
210	-26.8	9.4	8.4	-0.98
300	-35.1	8.67	7	-1.86
371	-41	8.2	6.17	-2.47
421	-45	7.9	5.6	-2.99
460	-47	7.8	5.27	-3.41
960	-65	6.99	2.81	-7.91
1810	-77	6.76	1.53	-12.91
5360	-80	6.68	0.5469	-21.74
9840	-90	6.68	0.3125	-26.60

Tabelle 2: Übertragungsfunktion und Phasenverschiebung am kleinen Widerstand

ν [Hz]	φ [°]	$2U_{\text{ein}}$ [V]	$2U_{\text{aus}}$ [V]	A [dB]
120	-23.7	7.6	6.9	-0.84
160	-30	7.62	6.44	-1.46
206.5	-37.1	7.6	5.97	-2.10
232.1	-40.1	7.57	5.7	-2.46
252.1	-42.1	7.58	5.5	-2.79
274	-44.5	7.54	5.27	-3.11
366	-53.2	7.54	4.45	-4.58
588	-65	7.5	3.13	-7.59
1043	-75	7.5	1.88	-12.02
4440	-86	7.5	0.507	-23.40

Tabelle 3: Übertragungsfunktion und Phasenverschiebung am großen Widerstand

U_{DC} [V]	I_{DC} [mA]	$u_{R,\text{AC}}$ [mV]	i_{AC} [mA]	$u_{\text{Diode,AC}}$ [mV]	r_{D} [Ω]
5.02	5	56	0.53	4.0	7.50
10.04	10	57	0.54	2.0	3.68
15.06	15	57	0.54	1.8	3.32
20.08	20	57	0.54	1.0	1.84

Tabelle 4: Mess- und errechnete Werte zur Bestimmung des differentiellen Widerstands, verwendete Widerstände in der Schaltung: $R_{\text{DC}} = 1004\Omega$, $R_{\text{AC}} = 105\Omega$

U [V]	I [mA]
0.197	0
0.521	0.34
0.568	0.9
0.589	1.38
0.603	1.87
0.631	3.37
0.661	6.25
0.679	9.2
0.698	14.15
0.710	18.9
0.721	24
0.728	28.8

Tabelle 5: Kennlinie der Siliziumdiode

U [V]	I [mA]
2.7	0.0
3.0	0.0
3.1	0.0
3.3	0.2
3.3	0.2
3.5	0.2
3.8	0.2
4.1	0.5
4.4	0.5
4.6	0.6
4.72	2.1
4.88	3.2
4.99	5.7
5.12	8.4
5.24	12.6
5.36	18.3
5.43	24.0
5.52	35.1
5.57	45.8
5.61	57.6
5.65	73.6
5.70	97.0
5.74	121.9

Tabelle 6: Kennlinie der Zener-Diode in Sperrrichtung

U [mV]	I [mA]
121	0
203	0
306	0.0002
418	0.003
496	0.0318
552	0.392
599	1.255
616	2.41
625	3.33
631	4.3
641	6.25
651	9.2
663	14.07
671	18.91
677	23.9
682	28.9

Tabelle 7: Kennlinie der Zener-Diode in Durchlassrichtung