

Physikpraktikum für Naturwissenschaftler

Versuch: Kennlinien

Durchgeführt am 17. Januar 2019

Betreuer: Johannes Fendt

Gruppe 13

Felix Burr: felix.burr@uni-ulm.de

Johannes Spindler: johannes.spindler@uni-ulm.de

Wir bestätigen hiermit, das Protokoll selbstständig erarbeitet zu haben und in genauer Kenntnis über dessen Inhalt zu sein.

Felix Burr

Johannes Spindler

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Kennlinien von Metallfaden- und Kohlefadenlampe	4
2.1 Versuchsaufbau und Durchführung	4
2.2 Messwerte und Ergebnisse	4
2.3 Ergebnisdiskussion	7
3 Kennlinie einer Halbleiter-Diode	9
3.1 Versuchsaufbau und Durchführung	9
3.2 Messwerte und Ergebnisse	9
3.3 Ergebnisdiskussion	10
4 Halbleiter-Diode bei Wechselspannung	12
4.1 Versuchsaufbau und Durchführung	12
4.2 Ergebnisdiskussion	13
5 Kennlinie eines MOS-FET	15
5.1 Versuchsaufbau und Durchführung	15
5.2 Messwerte und Ergebnisse	16
5.3 Ergebnisdiskussion	18
6 Laborheft	21

1 Einleitung

Die Stromstärke I eines elektrischen Stroms ist definiert als die Ladungsmenge ΔQ , die pro Zeitintervall Δt durch einen Querschnitt des Stromkreises fließt:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

Das bedeutet, der in einem Material fließende Strom bei einer gegebenen Spannung hängt von der Fähigkeit des Materials ab, Ladungen zu transportieren. Diese mikroskopische Eigenschaft wird als elektrische Leitfähigkeit σ des Materials bezeichnet. Es besteht folgender Zusammenhang mit makroskopischen Größen:

$$\sigma = G \frac{l}{A} = \frac{I}{U} \cdot \frac{l}{A} \quad (2)$$

Hier bezeichnet $G = \frac{I}{U}$ den Leitwert, l die Leiterlänge und A die Querschnittsfläche. Diese makroskopischen Größen sind leicht messbar.

Das makroskopisch messbare elektrische Verhalten des Stromkreises wird in Form von Kennlinien dargestellt. Dazu wird eine Spannung angelegt, schrittweise variiert und jeweils der Stromfluss gemessen. Die Wertepaare werden in einem U - I -Diagramm aufgetragen. In diesem Versuch werden so die Bauteile Metallfaden- und Kohlefadenlampe, Halbleiter-Diode und MOS-FET untersucht.

2 Kennlinien von Metallfaden- und Kohlefadenlampe

2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

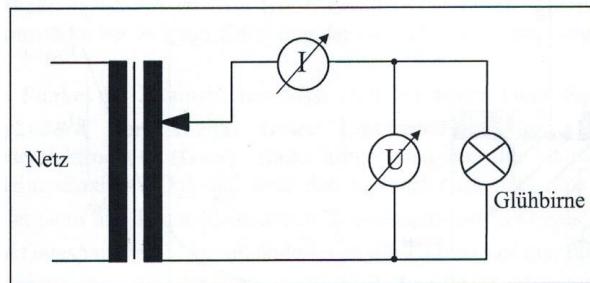


Abbildung 1: Schaltbild zur Messung an einer Lampe (aus der Versuchsanleitung)

Wie in Abbildung 1 gezeigt, wird die Lampe an ein Netzgerät angeschlossen, mit welchem Spannungen U zwischen -40V und +40V in 2,5V-Schritten angelegt werden (zwischen -5V und +5V aber 1V-Schritte). Mithilfe eines parallel-geschalteten Voltmeters kann die Spannung noch genauer eingestellt werden. Das in Reihe geschaltete Ampermeter dient zur Messung des Stroms I .

Anschließend werden für jede Spannung die Verlustleistung P und der Widerstand R berechnet:

$$P = U \cdot I \quad (3)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (4)$$

Für $U = 0V$ muss der Widerstand stattdessen als Inverses der Steigung in der Kennlinie bestimmt werden:

$$R(0V) = \frac{1V - (-1V)}{I(1V) - I(-1V)} = \frac{2V}{I(1V) - I(-1V)} \quad (5)$$

Damit werden die Kennlinie und das P - R -Diagramm erstellt und diskutiert.

Als Lampe wird zuerst eine Kohlefaden-, dann eine Metallfadenlampe verwendet.

2.2 Messwerte und Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die Messreihe für die Kohlefadenlampe, Tabelle 2 für die Metallfadenlampe. Abbildung 2 zeigt die diesen Tabellen entsprechenden U - I -Kennlinien und Abbildung 3 den Widerstand R aufgetragen über die Verlustleistung P beider Lampen.

Tabelle 1: Messwerte für I und daraus errechnete Werte für P und R bei schrittweise variierter Spannung U für eine Kohlefadenlampe.

U [V]	I [mA]	P [W]	R [Ω]
-40,0	-24,6	0,984	1630
-37,5	-22,9	0,859	1640
-35,0	-21,1	0,739	1660
-32,5	-19,5	0,634	1670
-30,0	-17,9	0,537	1680
-27,5	-16,2	0,446	1700
-25,0	-14,6	0,365	1710
-22,5	-13,1	0,295	1720
-20,0	-11,5	0,230	1740
-17,5	-9,9	0,173	1770
-15,0	-8,4	0,126	1790
-12,5	-7,0	0,087	1790
-10,0	-5,5	0,055	1820
-7,5	-4,0	0,030	1880
-5,0	-2,6	0,013	1920
-4,0	-2,1	0,0084	1900
-3,0	-1,6	0,0048	1880
-2,0	-1,0	0,0020	2000
-1,0	-0,5	0,0005	2000
0	0	0	2000
+1,0	+0,5	0,0005	2000
+2,0	+1,0	0,0020	2000
+3,0	+1,6	0,0048	1880
+4,0	+2,2	0,0088	1820
+5,0	+2,7	0,014	1850
+7,5	+4,1	0,031	1830
+10,0	+5,5	0,055	1820
+12,5	+7,0	0,088	1790
+15,0	+8,5	0,128	1760
+17,5	+10,0	0,175	1750
+20,0	+11,5	0,230	1740
+22,5	+13,0	0,293	1730
+25,0	+14,6	0,365	1710
+27,5	+16,2	0,446	1700
+30,0	+17,8	0,534	1690
+32,5	+19,5	0,634	1670
+35,0	+21,1	0,739	1660
+37,5	+22,8	0,855	1640
+40,0	+24,5	0,980	1630

Tabelle 2: Messwerte für I und daraus errechnete Werte für P und R bei schrittweise variierter Spannung U für eine Metallfadenlampe.

U [V]	I [mA]	P [W]	R [Ω]
-40,0	-24,5	0,980	1630
-37,5	-23,5	0,881	1600
-35,0	-22,5	0,788	1560
-32,5	-21,5	0,699	1510
-30,0	-20,5	0,615	1460
-27,5	-19,3	0,531	1420
-25,0	-18,3	0,458	1370
-22,5	-17,1	0,385	1320
-20,0	-15,9	0,318	1260
-17,5	-14,6	0,256	1200
-15,0	-13,3	0,200	1130
-12,5	-11,8	0,148	1060
-10,0	-10,3	0,103	970
-7,5	-8,6	0,065	870
-5,0	-6,7	0,034	750
-4,0	-6,2	0,025	650
-3,0	-5,3	0,016	570
-2,0	-4,2	0,0084	480
-1,0	-2,4	0,0024	420
0	0	0	410
+1,0	+2,5	0,0025	400
+2,0	+3,2	0,0064	630
+3,0	+4,9	0,015	610
+4,0	+6,0	0,024	670
+5,0	+6,6	0,033	760
+7,5	+8,6	0,064	870
+10,0	+10,3	0,103	970
+12,5	+11,9	0,149	1050
+15,0	+13,2	0,198	1140
+17,5	+14,6	0,256	1200
+20,0	+15,9	0,318	1260
+22,5	+17,0	0,383	1320
+25,0	+18,2	0,455	1370
+27,5	+19,3	0,531	1420
+30,0	+20,4	0,612	1470
+32,5	+21,4	0,696	1520
+35,0	+22,5	0,788	1560
+37,5	+23,4	0,878	1600
+40,0	+24,4	0,976	1640

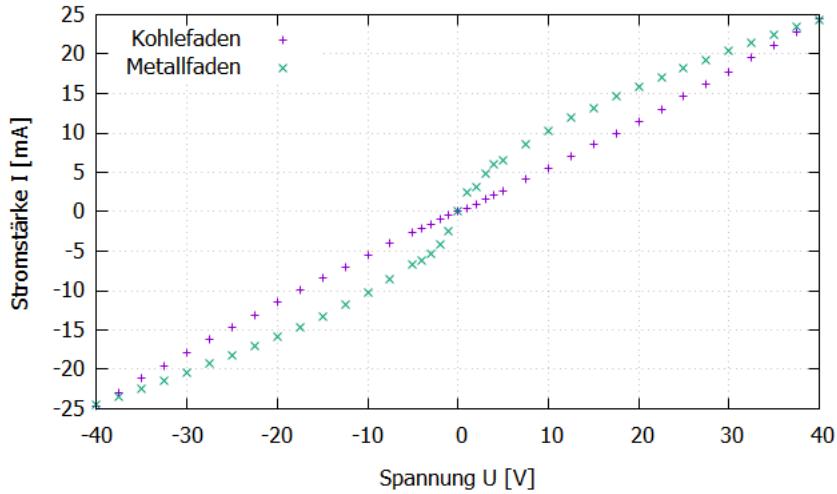


Abbildung 2: Die gemessenen U - I -Kennlinien für beide Lampen

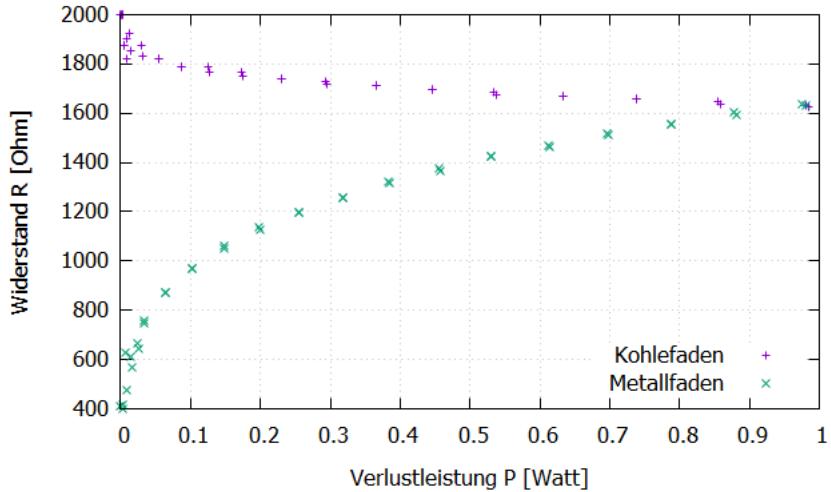


Abbildung 3: Widerstand R über Verlustleistung P aufgetragen für beide Lampen

2.3 Ergebnisdiskussion

Die Kennlinie der Kohlefadenlampe kann besser durch einen linearen Verlauf angenähert werden als die der Metallfadenlampe, welche einen stärkeren sigmoiden Charakter hat. Bei der Metallfadenlampe steigt der Strom im Bereich [-5V, +5V] am stärksten an. Im gemessenen Spannungsbereich liegt der Betrag des Stroms der Metallfadenlampe bei allen Spannungen über der Kohlefadenlampe, erst an den Randwerten nähern sich die Kurven einander an. Da der Widerstand das Inverse der Steigung der Kennlinie ist, bedeutet das, dass die Kohlefadenlampe im gemessenen Spannungsbereich einen höheren

Widerstand hat, was auch im P - R -Diagramm zu sehen ist. Dort liegt der Widerstand des Kohlefadens im ganzen Bereich über dem des Metallfadens, erst am Rand (etwa 1W) sind die Widerstände nahezu identisch. Das bedeutet, dass die Metallfadenlampe wegen ihres geringeren Widerstandes bei gleicher Leistung besser geeignet ist. Denn nach

$$G = \sigma \frac{A}{l} \Leftrightarrow R = \frac{l}{\sigma A} \quad (6)$$

ist der Widerstand proportional zu dem Inversen der Leitfähigkeit σ

3 Kennlinie einer Halbleiter-Diode

3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

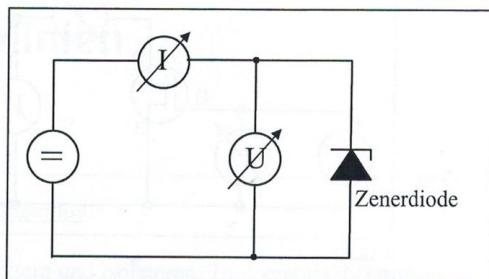


Abbildung 4: Schaltbild zur Messung an einer Halbleiter-Diode (aus der Versuchsanleitung)

Der Versuchsaufbau bleibt derselbe, nur wird jetzt statt einer Lampe eine Zenerdiode eingebaut und vermessen (siehe Abbildung 4). Ziel des Versuchs ist, die Kennlinie der Diode zu erstellen. Die Spannungswerte U werden so frei gewählt, dass der Verlauf der Kennlinie gut erkennbar ist, dazu wird die Stromstärke I gemessen. Laut Versuchsanleitung ist eine Kennlinie wie in Abbildung 6 zu erwarten. Allerdings darf der Strom nicht 200mA übersteigen, um die Diode nicht zu beschädigen.

3.2 Messwerte und Ergebnisse

Die Wertepaare der Kennlinie sind in Tabelle 3 aufgeführt und in Abbildung 5 eingetragen (bei den negativen Spannungen ist I konstant null).

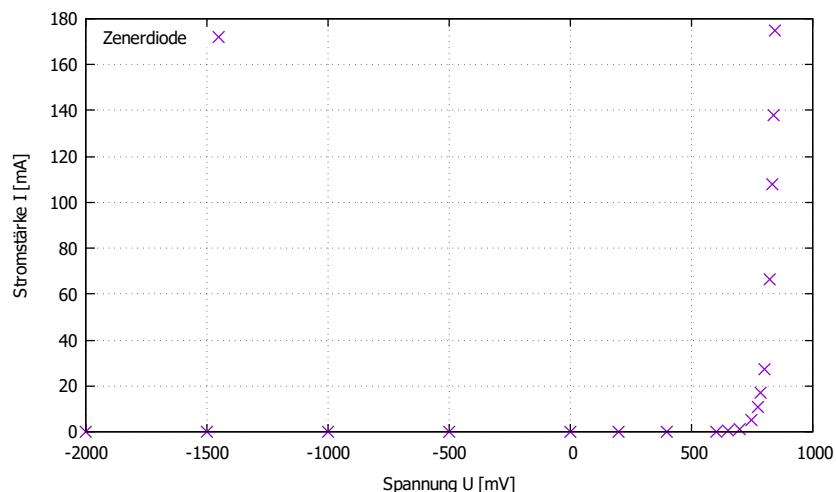


Abbildung 5: Die gemessene U - I -Kennlinien der Zenerdiode

Tabelle 3: Messwerte für I bei varierter Spannung U für eine np-Diode.

U [mV]	I [mA]
-2000	0,0
-1500	0,0
-1000	0,0
-500	0,0
0	0,0
+200	0,0
+400	0,0
+600	0,1
+650	0,4
+700	1,1
+750	5,2
+775	10,6
+785	16,9
+800	27,2
+825	66,7
+835	107,8
+840	138,0
+845	175,0

3.3 Ergebnisdiskussion

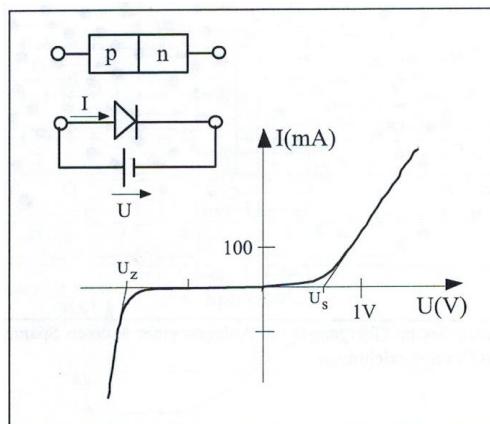


Abbildung 6: Kennlinie einer pn-Diode (aus der Versuchsanleitung)

Die ermittelte Kennlinie hat einen exponentiellen Verlauf wie in Abbildung 6 skizziert. Sie unterscheidet sich sehr stark von den Kennlinien im vorherigen Versuch: bis 400mV war kein Strom messbar, ab etwa 800mV erscheint die Kennlinie beinahe wie eine ver-

tikale Gerade. Diese scheinbare Gerade wird zur U -Achse verlängert, um die Schleusenspannung $U_S = 800mV$ abzuschätzen.

Damit eignet sich die Diode, um Strom nur bei einer gewünschten Spannung, der Schleusenspannung, durchfließen zu lassen. Ab dieser Spannung steigt der Strom mit zunehmender Spannung scheinbar linear (tatsächlich exponentiell) an. **Die Diode lässt den Strom bei der Schleusenspannung durchfließen, da die Sperrsicht am pn-Übergang schwindet und so die Sperrsicht dünn genug ist.**

4 Halbleiter-Diode bei Wechselspannung

4.1 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Versuch wird eine Diode unter Wechselstrom untersucht. Dazu schalten wir einen Widerstand und eine Diode in Reihe. Über die Variation der Spannungsamplitude bestimmen wir die Schleusenspannung. **Mit der Spannungskurve am Sinusgenerator messen wir die tatsächliche generierte Spannung. Mit U_R messen wir die Spannungsdifferenz zwischen vor und nach dem Widerstand, sodass wir ermitteln können, ob und wann Strom durch die Diode fließt**

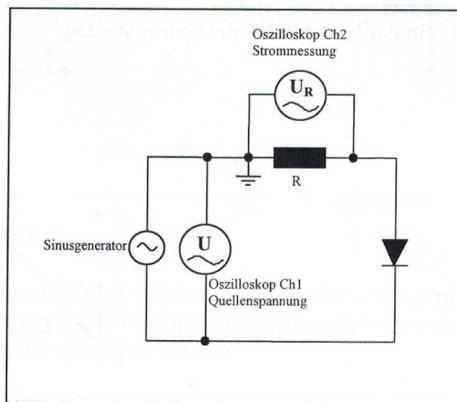


Abbildung 7: Schaltbild zur Messung mit Oszilloskop an einer Halbleiter-Diode (aus der Versuchsanleitung)

4.2 Ergebnisdiskussion

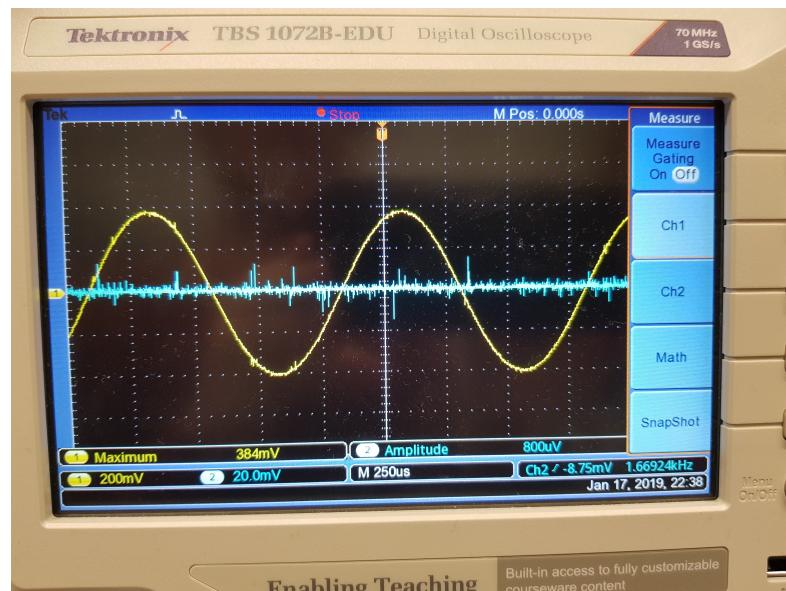


Abbildung 8: Diode bei $U = 400mV$

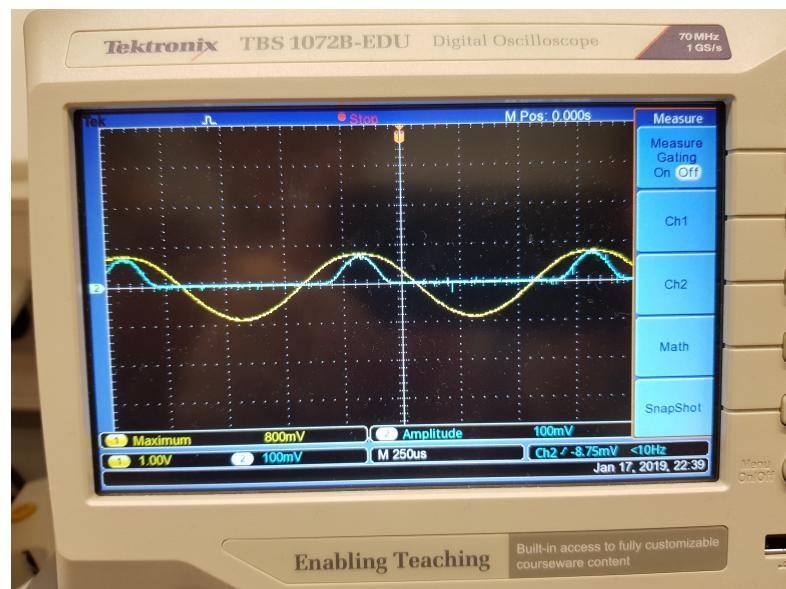


Abbildung 9: Diode bei $U = 800mV$

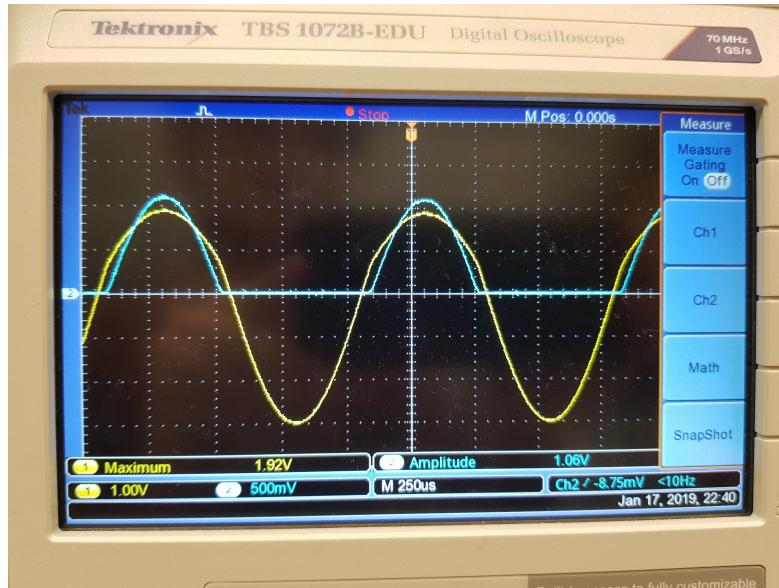


Abbildung 10: Diode bei $U = 2000mV$

Anhand der Abbildungen 8, 9 und 10 ist deutlich zu erkennen, dass die Durchschlagsspannung zwischen $400mV$ und $800mV$ liegen muss. Die blaue Linie ist hier U_R und die gelbe Linie ist U aus Abbildung 7. Durch Variation der Spannung zwischen $400mV$ und $800mV$ konnten wir eine Durchschlagsspannung von etwa $724mV$ auslesen, wobei allerdings der Übergang fließend war. Zu sehen ist außerdem, dass bei negativen Spannungen kein Strom durch die Diode fließt, da dies die Sperrschicht vergrößert. Bei einer angelegten Spannung von $2V$ erkennt man zudem, dass die Diode fast den gesamten Strom fließen lässt.

5 Kennlinie eines MOS-FET

5.1 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Versuch untersuchen wir ein MOS-FET. Dazu schließen wir wie in Abbildung 11 beschrieben den MOS-FET an die Spannungsquellen an. Wir messen den Spannungsverlauf zwischen Ground und Gate, und zwischen Ground und Drain. Zudem messen wir den Stromfluss durch das MOS-FET. Um die Steuerkennlinie zu ermitteln wählen wir zuerst U_D konstant mit 1V. Später, um die Arbeitskennlinie zu ermitteln, wählen wir U_G konstant mit von uns gewählten 2,4V.

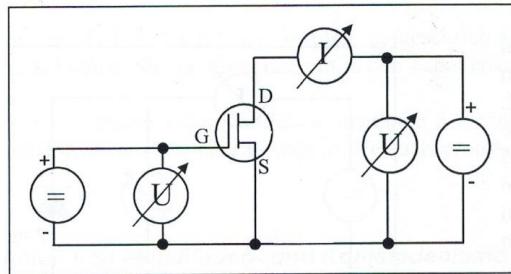


Abbildung 11: Schaltbild zur Messung an einem MOS-FET (aus der Versuchsanleitung)

5.2 Messwerte und Ergebnisse

Tabelle 4: Messwerte für I_D bei variiertter Spannung U_G und fester Spannung $U_D = 1V$ eines MOS-FETs

U_G [mV]	I_D [mA]
0	0,2
1	0
1,5	0
2	0
2,25	0,4
2,5	4,3
2,6	16,2
2,7	21
2,8	24,9
2,9	29,4
3	36,3
3,1	43
3,2	53,7
3,3	66
3,4	91,1
3,5	130,4
3,55	167,3
3,6	175,4
3,7	190

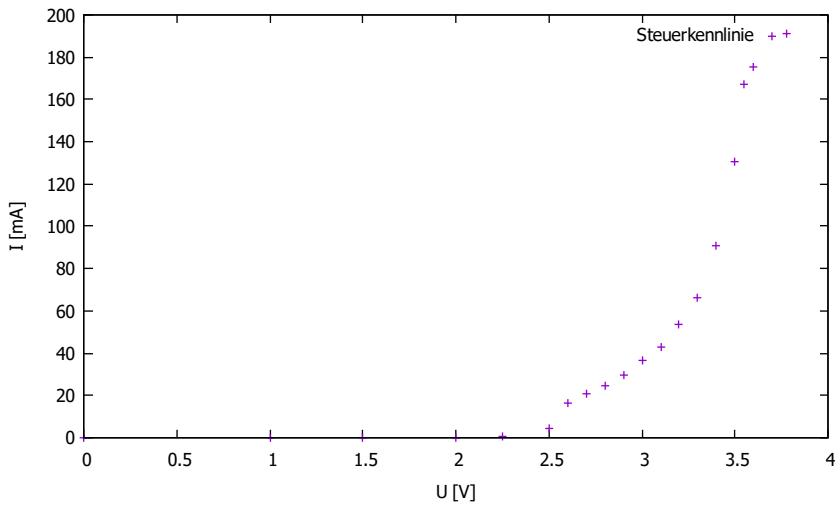


Abbildung 12: Steuerkennlinie unseres MOS-FETs mit $U_{DS} = 1V$

Tabelle 5: Messwerte für I_D bei variiertter Spannung U_D und fester Spannung $U_G = 2.4V$ eines MOS-FETs

U_D [mV]	I_D [mA]
0	0,4
0,2	1,5
0,4	1,6
0,6	1,8
0,8	2
1	2,3
1,2	2,6
1,4	3
1,6	3,6
1,8	4
2	4,6
2,2	5,1
2,4	5,7
2,6	6,1
2,8	6,5
3	6,8

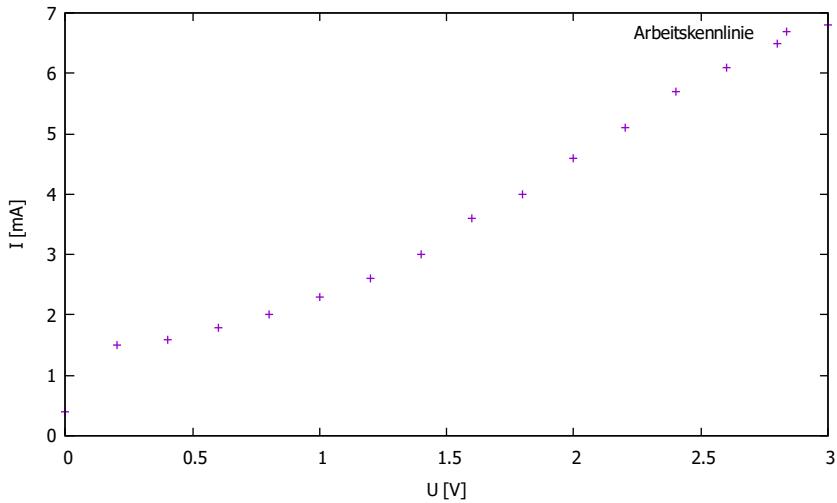


Abbildung 13: Arbeitskennlinie unseres MOS-FETs mit $U_{DS} = 2,4V$

5.3 Ergebnisdiskussion

Unsere gemessene Steuerkennlinie aus Abbildung 12 verläuft exponentiell wie in Abbildung 14 beschrieben. Denn falls die Gatespannung steigt, so steigt auch die Anzahl an Ladungsträgern im n-Kanal. So steigt damit auch der Strom über das MOS-FET. Die gemessene Arbeitskennlinie aus Abbildung 13 steigt wie in Abbildung 14 bis zu einem Abschnürpunkt, allerdings scheinen die Messpunkte nicht mit ausreichend hoher Spannung gemessen zu sein, sodass man den Steigungsabfall nicht sehen kann. Der Grund dafür ist, dass die Sperrsicht bei dieser Spannung so groß ist, sodass der n-Kanal abgeschnürt wird. Mittels dem Steigungsdiagramm aus 14 können wir die maximale Steigung der Steuerkennlinie auf $738 \frac{mA}{V}$ bestimmen. Diese Eigenschaften lassen sich nutzen, um elektrische Schaltungen zu realisieren, beispielsweise Gatter, Integrierte Schaltkreise oder Computer.

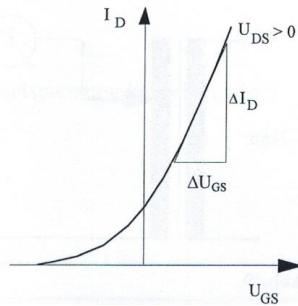


Abbildung 14: Steuerkennlinie eines selbstleitenden n-Kanal-MOS-FET (aus der Ver- suchsanleitung)

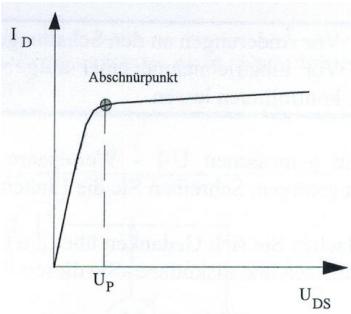


Abbildung 15: Arbeitskennlinie eines selbstleitenden n-Kanal-MOS-FET (aus der Ver- suchsanleitung)

6 Laborheft