

Halbleiterdioden

Studiengang: <u>KIT</u>	Datum: <u>22.06.2010</u>
Set: <u>2.08</u> Platz: <u>2</u>	
Teilnehmer: <u>Jürgen Döflinger, Michael Goldbach</u>	<i>gas. z/2</i>

Zielstellung

- Untersuchungen zur Gleichrichterwirkung von Halbleiterdioden
- Messung der Schaltzeiten
- Untersuchungen zur Spannungstabilisierung mit Z-Dioden

1. Begriffe und Formelzeichen

Sperrichtung, Durchlaßrichtung, Sperrspannung U_R , Sperrstrom I_R , Flußspannung U_F , Schwellspannung U_S , Durchbruchspannung U_{BR} , Restwechselspannung, Stromflußwinkel Θ , Sperrverzögerungszeit t_{tr} , Speicherzeit t_s , Abfallzeit t_f , Z-Spannung U_Z , Z-Strom I_Z , Glättungsfaktor G , Stabilisierungsfaktor S

2. Versuchsvorbereitung

- Wiederholen Sie den Vorlesungsabschnitt "Halbleiterdioden". Machen Sie sich mit den in Punkt 1. genannten Begriffen und Formelzeichen vertraut. Wiederholen Sie die Zusammenhänge zwischen den Begriffen.
- Stellen Sie die wichtigsten Kenn- und Grenzwerte der Dioden BY 255 und ZPD 6,2 anhand von Datenblättern zusammen und charakterisieren Sie die Dioden und deren Einsatzgebiete.
- Berechnen Sie für die Schaltung nach Bild 4 den Vorwiderstand R_V unter der Bedingung, daß der Strom I_Z für $0 \leq U_1 \leq 20$ V und beliebige Werte von R_L einen Höchstwert von 50 mA nicht überschreiten darf.
- Für den Glättungsfaktor einer Z-Dioden-Stabilisierung gilt näherungsweise:

$$G \approx 1 + \frac{R_V}{r_Z} \quad /1/$$

Der differentielle Widerstand r_Z berechnet sich über

$$r_Z = r_{Z1} + U_{Z0}^2 \alpha_Z R_{thU} \quad /2/$$

mit r_{Z1} - dynamischer differentieller Widerstand
 U_{Z0} - Nennwert der Z-Spannung
 α_Z - Temperaturkoeffizient der Z-Spannung
 R_{thU} - Wärmeübergangswiderstand pn-Übergang / Umgebung

Berechnen Sie für die Schaltung nach Bild 4 den Glättungsfaktor für den in Punkt 2.3. berechneten Vorwiderstand. Gehen Sie bei der Berechnung von r_Z von den Maximalwerten für α_Z und R_{thU} aus und verwenden Sie für r_{Z1} den Wert, der für den Bereich $0,1 \cdot I_{Zmax} \leq I_Z \leq I_{Zmax}$ gilt.

2.5. Bereiten Sie auf Millimeterpapier ein Diagramm zur Darstellung der Funktion $U_2=f(U_1)$ vor. Es empfiehlt sich folgende Einteilung der Achsen:

Diagramm zu 3.3. U_1 : $0 \text{ V} \leq U_1 \leq +20 \text{ V}$ 2 V/cm
 U_2 : $0 \text{ V} \leq U_2 \leq +8 \text{ V}$ 1 V/cm

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

3.1. Diode als Gleichrichter

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 1 zunächst mit $R_L=1 \text{ k}\Omega$ und ohne den Kondensator C_L auf. Stellen Sie am Wechselspannungsnetzteil (AC 7000) $U_1 \approx 2 \text{ V}_{\text{eff}}$ ein. Messen und notieren Sie den genauen Wert der Spannung. Bilden Sie eine Periode der Eingangs- und Ausgangsspannung U_1 und U_2 auf dem Oszilloskop ab und achten Sie darauf, daß deren Nulllinien zur Deckung gelangen. Messen Sie die Schwellspannung, eine Flußspannung und die maximale in Sperrrichtung über der Diode abfallende Spannung. Plotten Sie die Darstellung und tragen Sie dort die gemessenen Werte ein. Erklären Sie die Unterschiede zwischen beiden Spannungsverläufen.

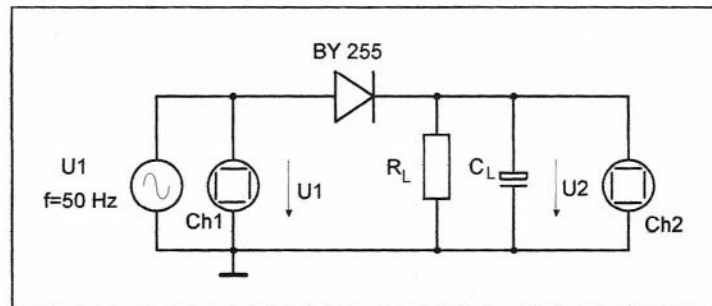


Bild 1: Gleichrichterschaltung

Stellen Sie $U_1 \approx 10 \text{ V}_{\text{eff}}$ ein, messen und notieren Sie den genauen Wert der Spannung. Untersuchen Sie die Gleichrichterschaltung mit kapazitiver Teillast, indem Sie den Kondensator $C_L=4,7 \mu\text{F}$ in die Schaltung einsetzen. Stellen Sie am Oszilloskop etwa zwei Perioden des Signals dar und plotten Sie die Darstellung. Wiederholen Sie die Messung mit dem Kondensator $C_L=220 \mu\text{F}$ und zeichnen Sie den Spannungsverlauf in die geplottete Darstellung. Wiederholen Sie diese Messung für beide Kondensatorwerte mit dem Widerstand $R_L=10 \text{ k}\Omega$. Interpretieren Sie die Ergebnisse.

Messen Sie für den Fall der geringsten Restwechselspannung den Spitze-Spitze-Wert der Restwechselspannung. Ermitteln Sie für diesen Fall die maximale über der Diode in Sperrrichtung abfallende Spannung. Vergleichen Sie diesen Wert mit dem ohne kapazitive Last ermittelten Wert und ziehen Sie Schlußfolgerungen für die Dimensionierung von Dioden in Gleichrichterschaltungen.

Zur Bestimmung des Stromes durch die Diode und des Stromflußwinkels bauen Sie die Schaltung nach Bild 2 auf. **Beachten Sie die veränderte Lage des Bezugspunktes für die Messung!**

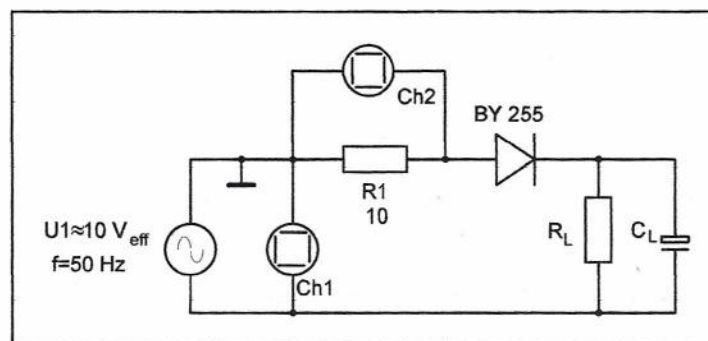


Bild 2: Meßschaltung zum Strom durch die Diode und Stromflußwinkel

Stellen Sie entsprechend der folgenden Tabelle die Spitzenwerte der Ströme durch die Diode und die Stromflußwinkel zusammen. Vergleichen Sie die Meßwerte untereinander. Interpretieren Sie die Meßwerte der Spitzenströme in Bezug auf ihre Bedeutung für die Dimensionierung von Dioden in Gleichrichterschaltungen.

R_L	C_L	U_{R1}/mV	I_{FRM}	$\Delta t/\mu s$	Θ
1 k Ω	0	154.0	0,154 mA	3,80	176,4°
	4,7 μF	324.0	0,324 mA	6,35	114,3°
	220 μF	1260,0	1,26 mA	3,35	60,3°
10 k Ω	0	15,6	1,56 μA	3,70	174,6°
	4,7 μF	232,0	23,2 μA	3,64	65,52°
	220 μF	216,0	21,6 μA	2,25	40,5°

3.2. Bestimmung der Sperrverzögerungszeit

Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Sperrverzögerungszeit von dem in Sperrichtung fließenden Strom. Bauen Sie dazu die Meßschaltung nach Bild 1 mit $R_L=510 \Omega$ und ohne den Kondensator C_L auf. Als Spannungsquelle verwenden Sie den Funktionsgenerator, an dem Sie eine symmetrische Rechteckspannung mit einer Frequenz von $f=5 \text{ kHz}$ einstellen. Die einzustellenden Spannungswerte entnehmen Sie der folgenden Tabelle.

Form der Eingangsspannung			
$U_{eAC} [V_{ss}]$	8	10	12
$U_{eDC} [V]$	+1	0	-1
$t_s [\mu s]$	11,10	7,48	5,64
$t_f [\mu s]$	5,28	5,24	4,26
$t_{rr} [\mu s]$	16,38	12,72	9,90

Bestimmen Sie die Sperrverzögerungszeit t_{rr} , die Speicherzeit t_s und die Abfallzeit t_f für die vorgegebenen Eingangsspannungen. Bilden Sie dazu im Digitalbetrieb des Oszilloskopes den im Bild 3 markierten Bereich möglichst formatfüllend ab und nutzen Sie die auf dem Bildschirm angegebenen Prozent-Marken. Plotten Sie für einen Fall der vorgegebenen Eingangsspannungen die Darstellung und tragen Sie die entsprechenden Werte in die geplottete Darstellung ein.

Stellen Sie für alle angegebenen Fälle der Eingangsspannung die Meßwerte in der Tabelle zusammen. Begründen Sie die Änderung der gemessenen Zeiten bei Änderung der Spannung in Sperrichtung. Wie würde sich eine Erhöhung der Eingangsspannung in Flußrichtung auf die Zeiten auswirken?

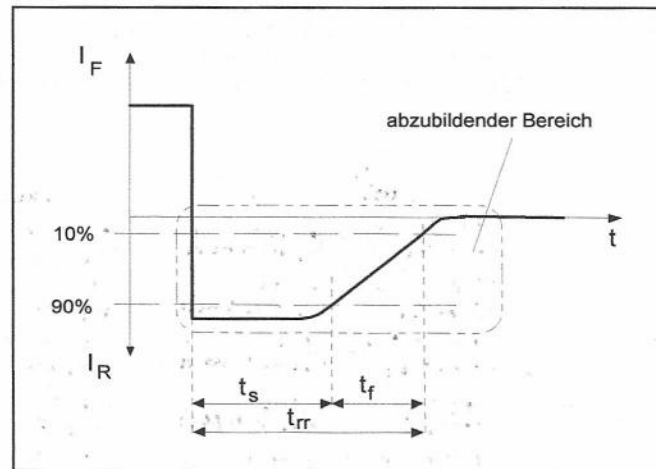


Bild 3: Definition von Speicherzeit und Sperrverzögerungszeit

3.3. Stabilisierung mit Z-Dioden

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 4 mit dem in der Vorbereitung dimensionierten Vorwiderstand R_V auf. Verwenden Sie für R_V einen einstellbaren Widerstand, den Sie auf den berechneten Wert einstellen.

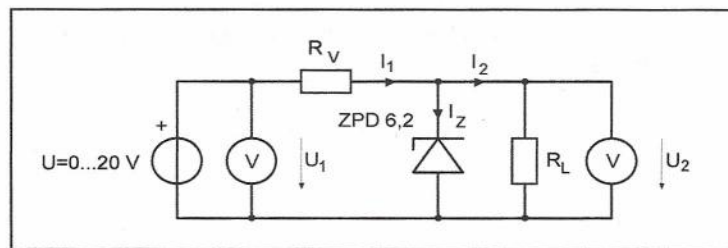


Bild 4: Stabilisierungsschaltung

Messen Sie die Funktion $U_2=f(U_1)$ für $R_L=510 \Omega$ und $R_L=1,8 \text{ k}\Omega$. Tragen Sie die Meßwerte in das vorbereitete Diagramm ein.

Bestimmen Sie den Glättungsfaktor G und den Stabilisierungsfaktor S für $U_1=15 \text{ V} \pm 20 \%$ und die o.g. Lastwiderstände. Auf Grund des flachen Kurvenverlaufes ist es günstig, die für die Berechnung erforderlichen Werte für U_1 und U_2 nicht aus der graphischen Darstellung zu entnehmen, sondern diese direkt zu messen.

Vergleichen Sie die ermittelten Werte für den Glättungsfaktor mit dem in der Vorbereitung berechneten Wert. Diskutieren Sie den Einfluß des Lastwiderstandes.

Berechnen Sie mit Hilfe der Gleichung /1/ aus den gemessenen Werten für den Glättungsfaktor den Widerstand r_Z . Diskutieren Sie Einflußgrößen, die zu einer Abweichung zu dem in der Vorbereitung berechneten Wert führen können.

Berechnen Sie den Spitze-Spitze-Wert der Restwechselspannung, wenn eine gleichgerichtete und geglättete Spannung wie im Punkt 3.1. ($R_L=10 \text{ k}\Omega$; $C_L=220 \mu\text{F}$) mittels einer Z-Diode stabilisiert wird.

2.2.

BY 255:

$$I_F = 3 \text{ A}$$

$$U_R = 10 \text{ V}$$

$$U_F = 1,1 \text{ V}$$

$$I_R = 5 \mu\text{A}$$

$$T_{\text{Jmax}} = 150^\circ\text{C}$$

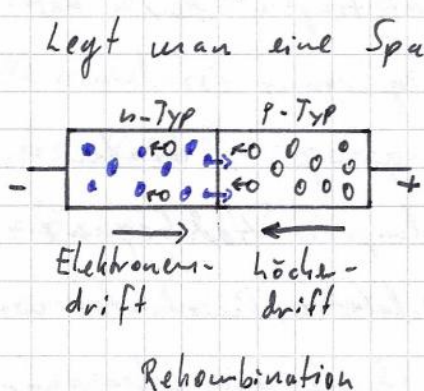
Temperaturbereich: -55°C bis 150°C

$$C_j(4 \text{ V}, 1 \text{ MHz}) = 40 \text{ pF} \quad t_{\text{rr}} = 3 \mu\text{s}$$

$$R_{\text{JL}} = 10 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

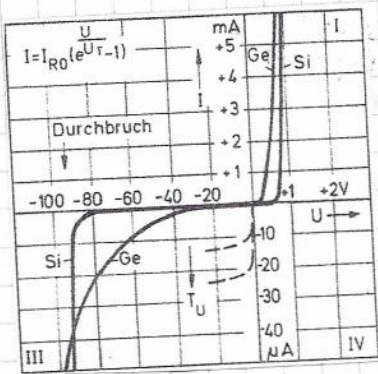
$$R_{\text{JA}} = 20 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Bringt man neutrales n- und p-Silizium zusammen, so diffundieren über den pn-Übergang (Junction) Löcher in die n-Zone und Elektronen in die p-Zone (Ausgleichsbestreben). Durch den Zufluss von Löchern bzw. den Abfluss von Elektronen ergibt sich eine Potentialanhebung der n-Zone gegenüber der p-Zone. Die entstehende „Potentialschwelle“ wirkt mit ihrem elektrischen Feld dem Ausgleichsbestreben entgegen. Es bildet sich die Diffusionsspannung U_D über einem an freien Ladungsträgern verarmten Übergangsgebiet, der sogenannten Sperrschicht. Versieht man beide seitigen Metallkontakten entsteht eine Diode.



Polarität an, so wird die innere Potentialschwelle mit steigender Spannung zunehmend abgebaut. Dadurch wird es den Elektronen der n-Seite und den Löchern der p-Seite möglich, auf die andere Seite

zu differenzieren. Die Sperrschicht wird von Ladungsträgern überschritten. Es kommt zu einem Stromfluss, der im konventionellen Sinn von der p-Seite (Anode) zur n-Seite (Kathode) gerichtet ist. Der Strom steigt steil an, wenn entsprechend der inneren Potentialschwelle eine gewisse Schwellenspannung oder Schwellenspannung überschritten wird.



legt man dagegen eine Spannung an mit umgekehrter Polarität, so wird die innere Potentialschwelle noch erhöht, die Sperrschicht verbreitert sich, indem die

Belastungen beiderseits des pn-Überganges auseinander-rücken. Die gesperrte Diode stellt einen Kondensator dar, dessen Kapazität sich mit steigender Sperrspannung vergrößert. Im Idealfall fließt kein Strom. In Wirklichkeit tritt jedoch ein kleiner Sperrstrom auf, der sich aufgrund der unvermeidlichen Minoritätsträger auf jeder Seite des pn-Übergangs bilden kann. Diese werden sobald sie durch Diffusion in den Bereich der Potentialschwelle gelangen, im Gegensatz zu den Majoritätsträgern durch das elektrische Feld der Sperrschicht nicht gebremst, sondern über die Schwelle zur anderen Seite gezogen. Dioden finden je nach Ausführung Anwendung in Hochfrequenz- und schnellen Schaltanwendungen (Modulator, Demodulator usw.), sowie als Gleichrichter oder als Schutz vor Überspannung.

2.2.

ZPD 6,2:

$$I_z = 5 \text{ mA}$$

$$U_z (I_z = 5 \text{ mA}) = 5,8 \dots 6,6 \text{ V}$$

$$r_z (I_z = 5 \text{ mA}, f = 1 \text{ kHz}) = 4,8 \text{ } \Omega$$

$$P_{\text{Tot}} (T = 25^\circ \text{C}) = 500 \text{ mW}$$

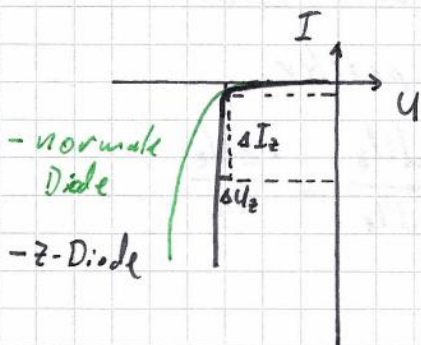
$$T_j = 175^\circ \text{C}$$

Temperaturbereich: -55°C bis 175°C

$$R_{\text{th}} = 0,3 \frac{\text{ }^\circ \text{C}}{\text{W}} \text{ bzw. } 0,5 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$\alpha (I_z = 5 \text{ mA}) = -1 \dots 7 \frac{10^{-4}}{\text{K}}$$

Z-Dioden zeichnen sich durch einen möglichst scharfen „Zenerknick“ in der Sperrkennlinie aus.

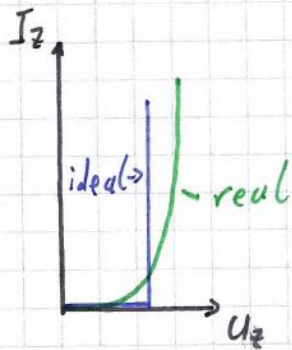


Diese Dioden sind speziell für den Betrieb im Durchbruchgebiet der Kennlinie geeignet.

Die Bezeichnung Zenerdiode geht zurück auf den von C. Zener entdeckten Zener-Effekt. Darunter versteht man das Herauslösen von Elektronen aus dem Gitterverband des Kristalls infolge einer hohen elektrischen Feldstärke. Tatsächlich ist aber nach heutigem Erkenntnis dieser Effekt nur maßgebend bei Dioden mit einer Durchbruchspannung (Zenerspannung) unterhalb von 5V.

Bei Dioden mit höherer „Zener spannung“ ist dagegen der Lawineneffekt (Avalanche - Effekt) maßgebend.

Die ideale Z-Diode hat eine Kennlinie, die bei der Spannung U_{z0} senkrecht abbiegt.

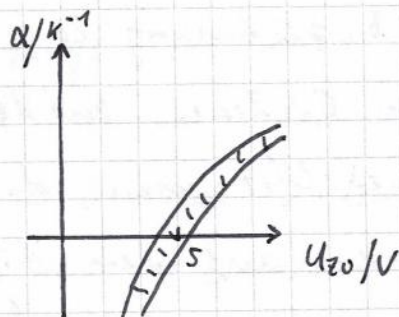


Die Kennlinie der realen Z-Diode weicht davon ab, lässt sich aber gut annähern durch einen geknickten Geradenzug mit

den Kennwerten U_{z0} und r_z (differenzieller Widerstand). Die reale Z-Diode weist auch eine gewisse Abhängigkeit der Z-Spannung von der Temperatur auf, die ausgedrückt wird durch den Temperaturkoeffizienten α . Dieser ist negativ bei Dioden mit einer Z-Spannung unter 5V, sonst positiv.

$$\alpha = \frac{dU_{z0}}{dT} \cdot \frac{1}{U_{z0}}$$

$$r_z = \frac{dU_z}{dI_z} \approx \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad \checkmark$$



Anwendungsfälle für Z-Dioden liegen in der Stabilisierung einer Betriebsspannung, zur Amplitudenbegrenzung oder zum Schutz gegen Überlastung.

2.3.

geg:

$$0 \leq U_1 \leq 20V$$

$$U_{1max} = 20V$$

$$I_{gs} = I_{zmax} = 50mA$$

$$U_z = 6,2V$$

$$R_z = \infty$$

$$R_V = \frac{U_1 - U_z}{I_{zmax}} = \frac{20V - 6,2V}{50mA}$$

$$\underline{\underline{R_V = 276\Omega}}$$

ges:

$$R_V = ?$$

2.4.

$$I_{zmax} = 50mA \quad U_z = 6,2V \quad r_{zj} = 1,4\Omega$$

- aus dem Graphen des Datenblattes ermittelt

$$I_{zmin} = 5mA \quad (0,1 \cdot I_{zmax})$$

$$r_{zj} = 4,8\Omega$$

(siehe Datenblatt)

$$r_z = r_{zj} + U_{z0}^2 \cdot \alpha_z \cdot R_{thU}$$

$$\alpha_z = 7 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}$$

$$R_{thU} = 0,3 \frac{K}{W}$$

$$r_z = 4,8\Omega + (6,2V)^2 \cdot 7 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} \cdot 0,3 \frac{K}{W}$$

$$\underline{\underline{r_z = 4,81\Omega}}$$

$$G \approx 1 + \frac{R_V}{r_z} \approx 1 + \frac{276\Omega}{4,81\Omega}$$

$$\underline{\underline{G \approx 58,38}}$$

Aufgrund der Diskrepanz zwischen zwei von uns gefundenen Datenblätter folgt hier eine weitere Berechnung des differentiellen Widerstandes r_z und des Glättungsfaktors G .

Die erste Berechnung erfolgte mit dem Wärmeübergangswiderstand $R_{thcu} = 0,3 \frac{K}{W}$ aus Datenblatt 1 und im folgenden mit $R_{thcu} = 0,3 \frac{K}{mW}$ aus dem 2. Datenblatt.

$$r_z = r_{zj} + U_{z0}^2 \cdot \alpha_z \cdot R_{thcu} \quad | \quad R_{thcu} = 0,3 \frac{K}{mW}$$

$$r_z = 4,8 \Omega + (6,2V)^2 \cdot 7 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} \cdot 0,3 \frac{K}{mW}$$

$$\underline{\underline{r_z = 4,80 \Omega}}$$

$$G \approx 1 + \frac{R_v}{r_z} \approx 1 + \frac{276 \Omega}{4,80 \Omega} \approx \underline{\underline{58,5}}$$

3.1.

ohne Kondensator:

$$U_s = 0,48V$$

$$U_{ss} = 6,64V$$

$$U_{Fmax} = 0,68V$$

$$U_{eff} = 2,35V$$

$$U_{Rmax} = +3,32V$$

Die Diode wirkt als Gleichrichter und schneidet die negative Halbwelle ab. Die Differenz der über dem Lastwiderstand gemessenen Spannung und der Eingangsspannung entspricht dem U_{Fmax} von 0,68V.

mit Kondensator $C_L = 4,7\mu F$, $C_L = 220\mu F$, $R_L = 1k\Omega$, $R_L = 10k\Omega$

$$U_{ss} = 33,00V$$

$$U_{eff} = 11,67V$$

verwendete Bauelemente zur Messung der

Restwechselspannung: $C_L = 220\mu F$ und $R_L = 10k\Omega$

$$\underline{U_{ss} = 162mV}$$

$$\underline{U_{Rmax} = 32,40V}$$

Bei höherem Lastwiderstand und größerem Kondensator wird die beste Glättung der Kombinationen möglichkeiten erzielt.

Im Aufbau ohne Kondensator lag U_{Rmax} bei $\frac{1}{2}U_{ss}$ (also U_s).

Mit Kondensator und der bestmöglichen Kombination aus großem Lastwiderstand und Kondensator mit höherer Kapazität ist der Wert für U_{Rmax} nahezu U_{ss} .

Bei einer annähernd linearen Gleichrichtung, sollte die Diode mindestens eine Spannungsfestigkeit von U-Spitze-Spitze haben.

$$\frac{\Delta \varphi}{T} = \frac{\textcircled{4}}{360^\circ}$$

$$\textcircled{H} = \frac{\Delta \varphi}{T} 360^\circ = \Delta t \cdot f \cdot 360^\circ$$

Beim vergleichen der Messwerte untereinander stellt man fest, dass bei gleicher Kapazität die Spannung höher ist und der Strom und der Stromflusswinkel kleiner werden wenn sich der Lastwiderstand erhöht. Bei gleicher Last (Bsp $1k\Omega$) erhöht sich Spannung und Spitzenstrom, und verkleinert sich der Stromflusswinkel, wenn die Kapazität größer wird. *warum?*

Der größte Strom wurde bei dem kleineren Widerstand und der größten Kapazität erzielt (bei verringertem Stromflusswinkel).

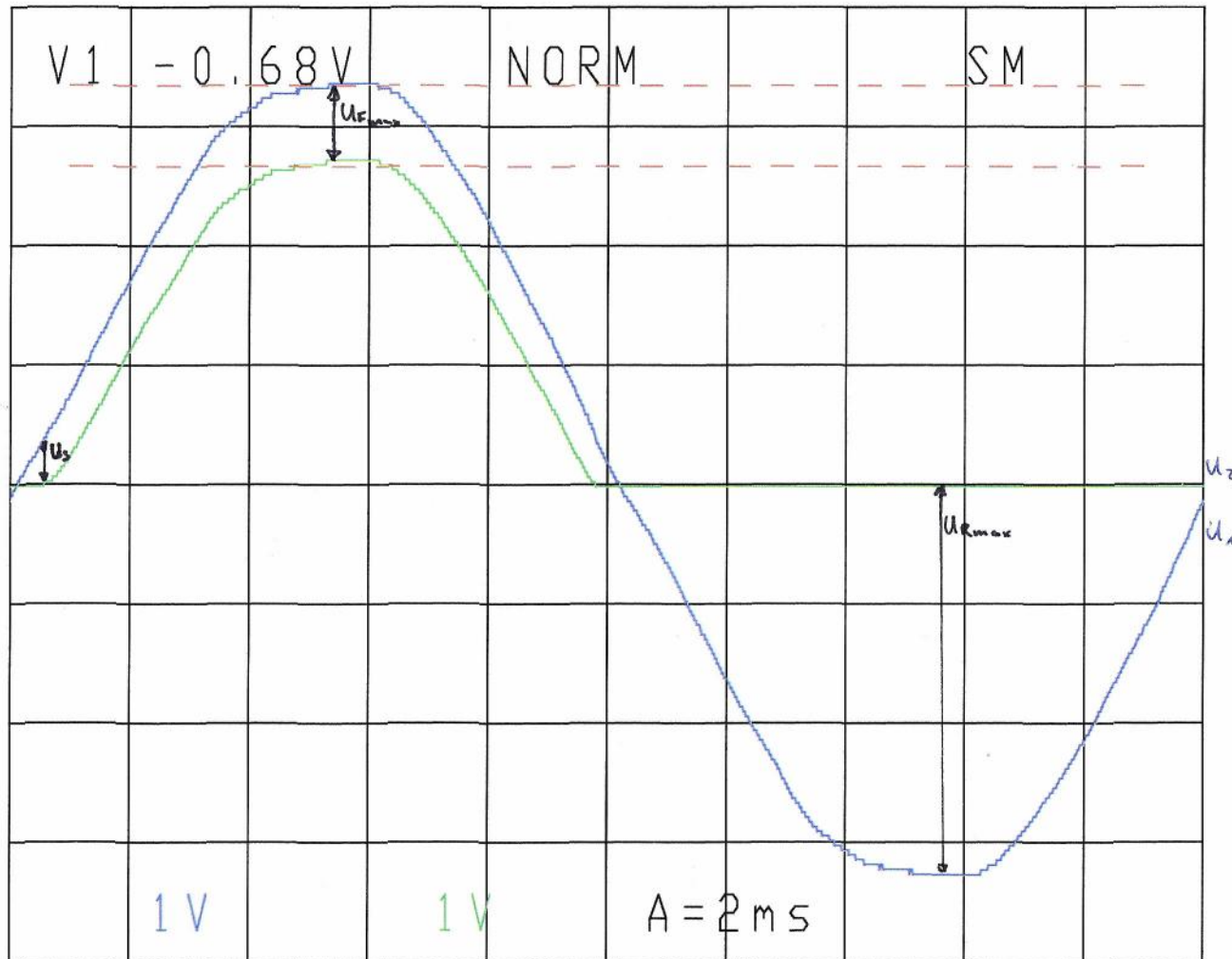
$$I_{FSM} < I_{FRM} < I_{FSM}$$

I_{FRM} (periodischer Spitzenstrom) \rightarrow Datenblatt: (für $>15Hz$) 20A

I_{FSM} (peak forward surge current) \rightarrow je nach DB: 100A-150A
Stoßstrom

3.2 Wenn die Diode in Durchlassrichtung betrieben wird befinden sich Ladungsträger in der Sperrschicht. Nun wird auf Sperrrichtung geschaltet. Es fließt noch ein Teil bis alle Ladungsträger die Sperrschicht verlassen haben. Umso höher die Spannung in Sperrrichtung umso schneller ist die Sperrschicht gesäubert. Und umso schneller tritt die Sperrung ein. Sollte die Spannung in Sperrrichtung konstant sein und sich die Spannung in Flussrichtung erhöhen, so würden sich auch die Zeiten erhöhen, da sich mehr Ladungsträger in der Sperrschicht befinden würden.

3.1

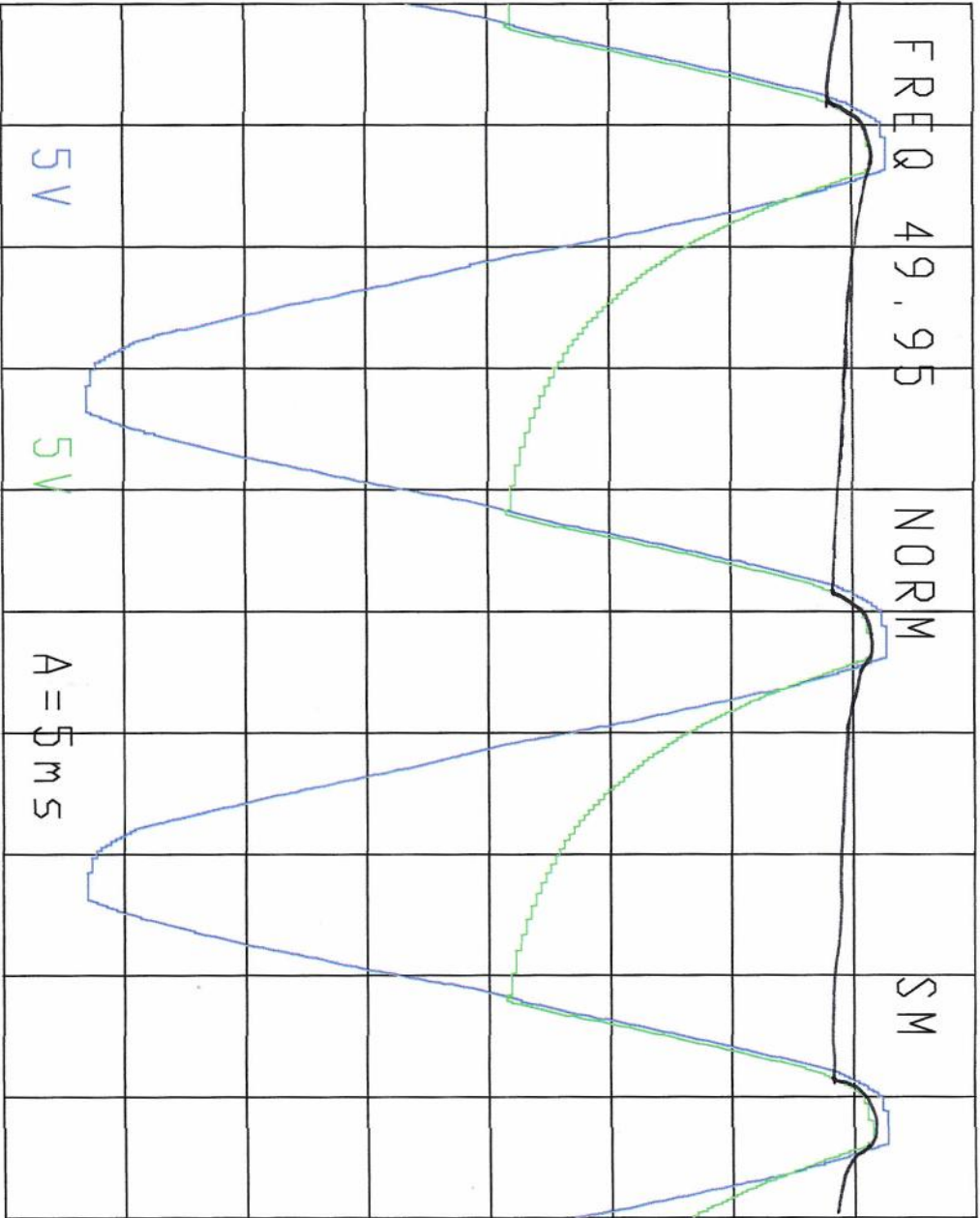


$$U_{Fmax} = 0,68V$$

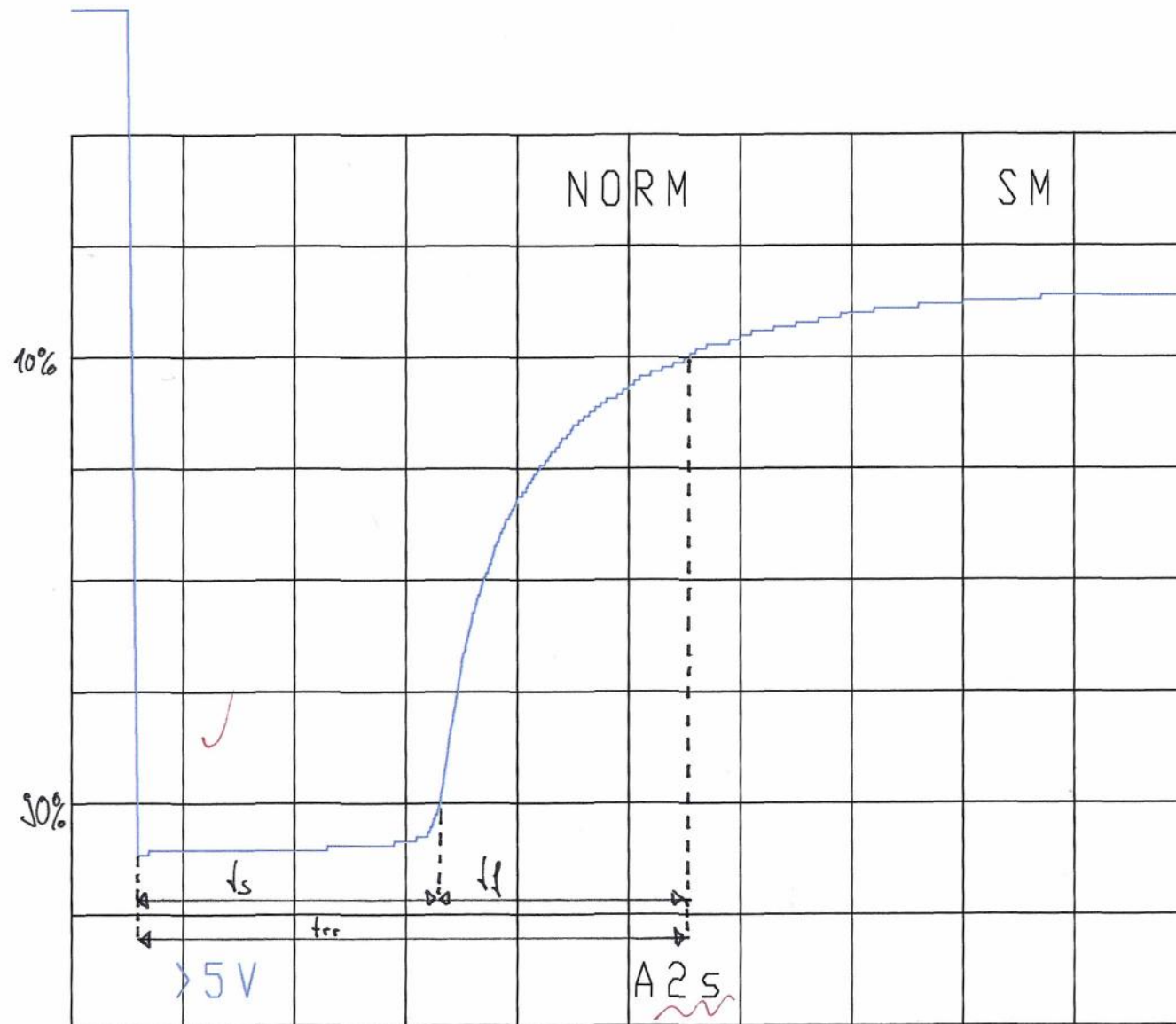
$$U_{Rmax} = +3,32V$$

$$U_s = 0,68V$$

Zu U_s sei noch anzumerken,
 dass zu dem von uns angenom-
 menen Zeitpt. die Sättigung noch
 nicht erreicht war. Es handelt
 sich also nicht um den echten U_s Wert.
auch bei t_0 nicht!



3.2.



$U_{eAC} = 12 V$
 $U_{eDC} = -1 V$
 $t_s = 5.64 \mu s$
 $t_f = 4.26 \mu s$
 $t_{rr} = 9.90 \mu s$