

Aufgabe 2.1

Berechnen Sie für die in Abbildung 2.1 dargestellte Logikschaltung die Ausgangspegel U_A für alle möglichen Schalterstellungen von S_1 und S_2 . Tragen Sie die logischen Zustände von E_1 , E_2 und U_A in eine Zustandstabelle ein und bestimmen Sie so die logische Funktion des durch die Schaltung realisierten Gatters. Vergleichen Sie die für die einzelnen Logikzustände errechneten Spannungspegel und bestimmen Sie daraus die Spannungsniveaus für den H-Pegel, den L-Pegel sowie das verbotene Band.

Zur Berechnung der Schaltzustände wird angenommen, dass die Flussspannung (d.h. die Spannung, bei der die Dioden vom Sperrzustand in den Durchgangszustand übergehen) der Dioden D_1 und D_2 bei $U_F = 0,7\text{ V}$ liegt. Der Übergang vom Sperr- in den Durchlasszustand wird dabei als ideal abrupt angenommen.

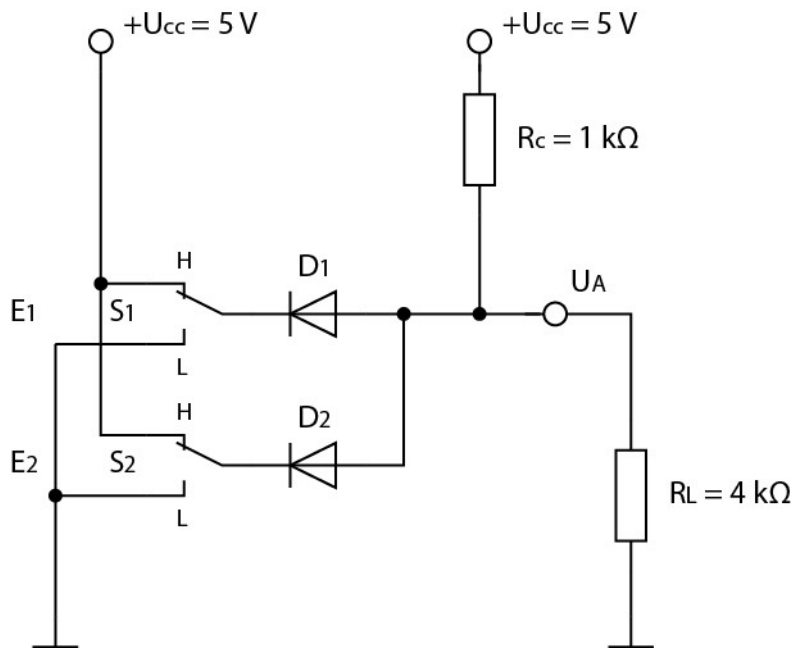
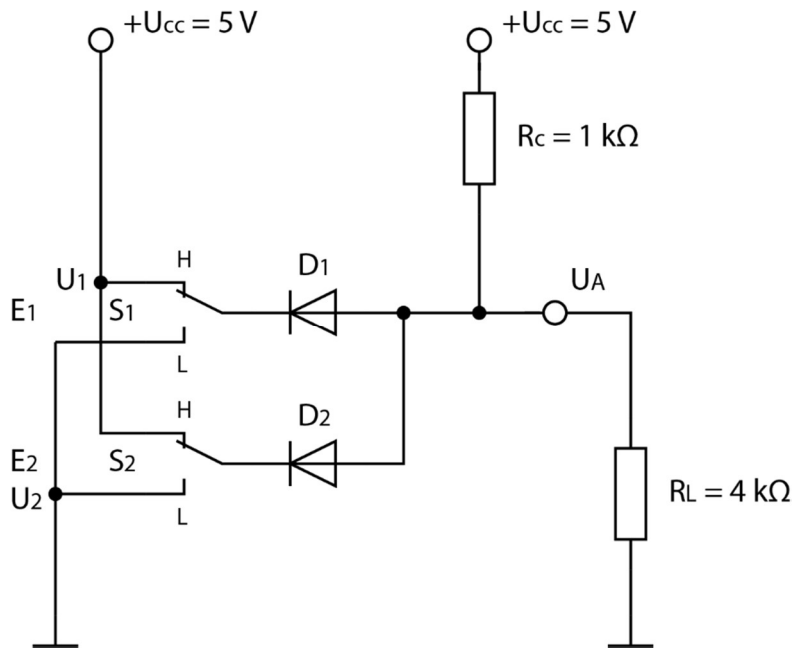


Abbildung 2.1: Schaltung für ein mit Dioden realisiertes Logikgatter

Lösung:

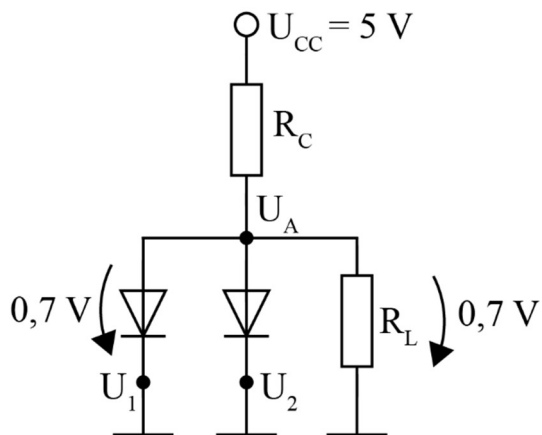


Logiktablelle:

	E1	E2	U1	U2
1)	L	L	0 V	0 V
2)	L	H	0 V	5 V
3)	H	L	5 V	0 V
4)	H	H	5 V	5 V

1) Betrachtung Fall LL:

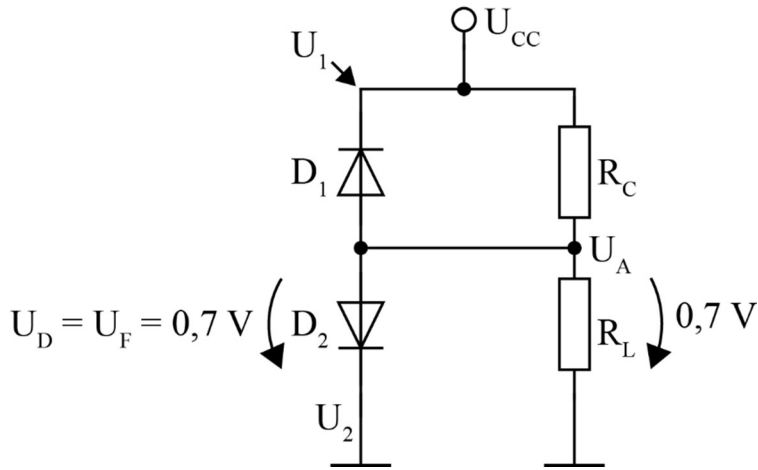
D1 und D2 leiten.



$$U_A = U_{D1} = U_{D2} = 0.7 V$$

2) und 3) Fall HL und LH:

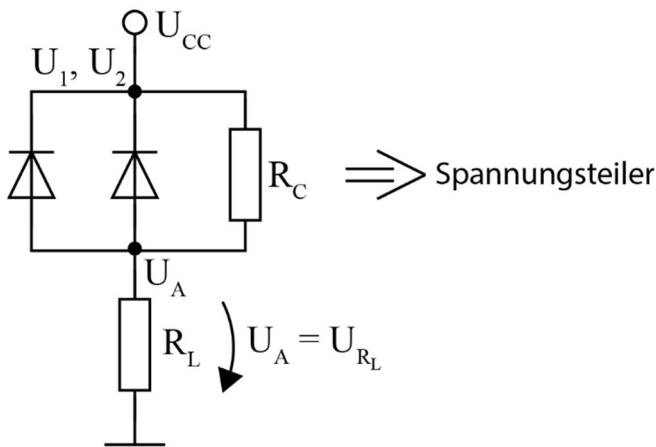
d.h. D1 sperrt und D2 leitet, oder umgekehrt.



$$U_A = U_{D2} = 0.7 \text{ V} \text{ bzw. } U_A = U_{D1} = 0.7 \text{ V}$$

Fall HH:

D_1 und D_2 sperren.



$$U_A = U_{cc} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C} = 5 \text{ V} \cdot \frac{4 \text{ k}\Omega}{4 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = 0,8 \cdot 5 \text{ V} = 4 \text{ V}$$

Zusammenfassung:

E_1	E_2	U_1	U_2	U_A	A
L	L	0 V	0 V	0,7 V	L
H	L	5 V	0 V	0,7 V	L
L	H	0 V	5 V	0,7 V	L
H	H	5V	5 V	4 V	H

Logische Funktion: UND

Der verbotene Bereich liegt irgendwo zwischen 0.7 V und 4 V, er könnte z.B. mit 1,5 ... 3,5 V festgelegt werden (vgl. Aufgabe 1.4).

Aufgabe 2.2

Die Stabilisierungsschaltung in Abbildung 2.2 soll mit einer Z-Diode aufgebaut werden. Die Eingangsspannung $U_E = 15\text{ V}$ soll auf $U_A = 12\text{ V}$ stabilisiert werden. Die Schaltung soll für einen veränderlichen Lastwiderstand $R_L = 240\ \Omega \dots 1\text{ k}\Omega$ ausgelegt werden. Der Lastwiderstand R_L repräsentiert den Energiebedarf einer beliebigen Schaltung.

- Wie groß muss der Vorwiderstand R_V sein, damit die maximale Verlustleistung der Z-Diode $P_{tot} = 0,5\text{ W}$ beträgt?
- Welche Verlustleistungen P_V werden in der Z-Diode erzeugt, wenn die Schaltung mit Lastwiderständen $R_L = 200\ \Omega \dots 150\ \Omega$ belastet wird? Hierbei wird ein Vorwiderstand $R_V = 30\ \Omega$ verwendet.
- Wie groß muss R_V sein, damit der Diodenstrom I_Z für Teilaufgabe b) minimal wird?

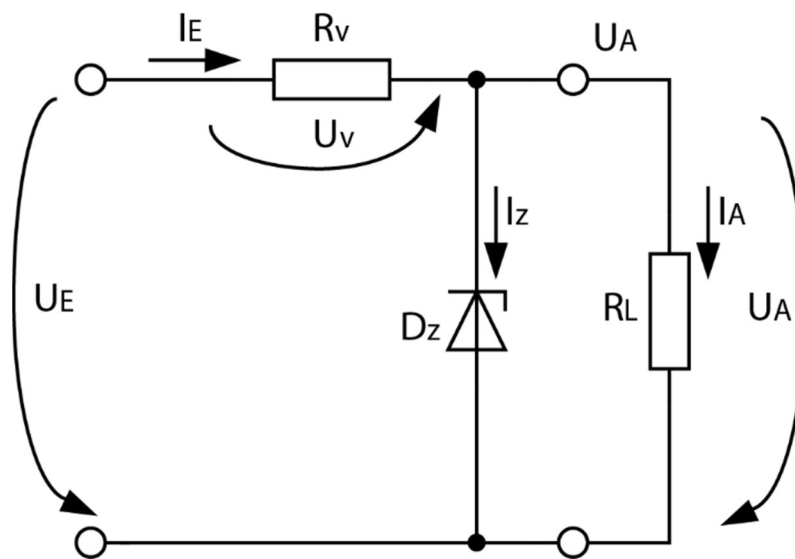
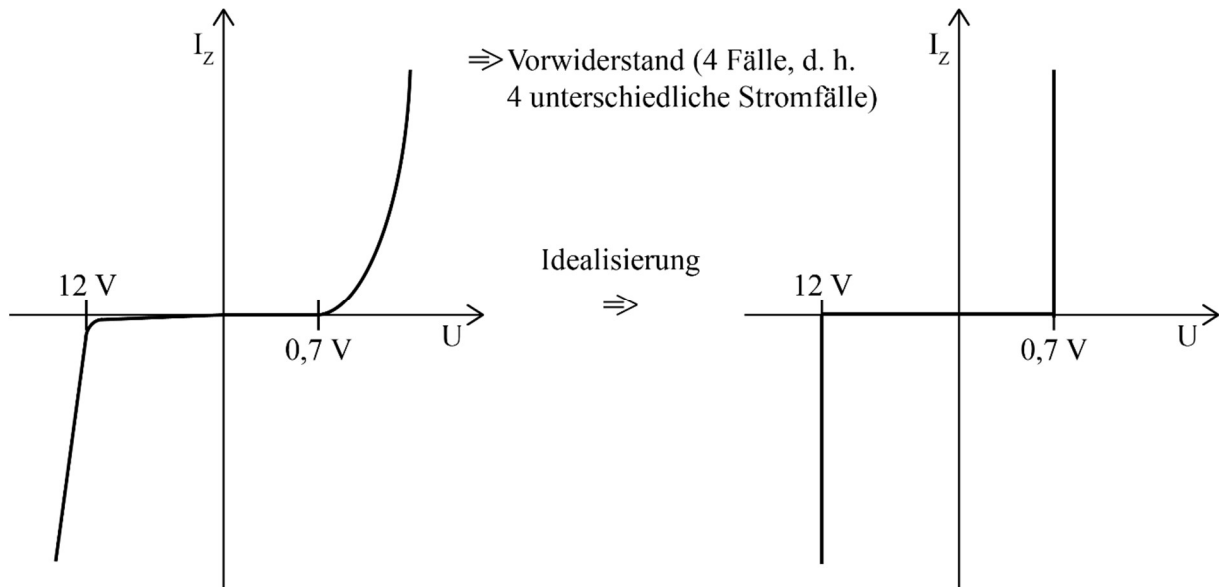


Abbildung 2.2: Schaltplan einer Spannungsstabilisierung mit einer Z-Diode

Lösung:

Kennlinie der Z-Diode:



a) Schritt 1: Bestimmung der Spannung am Widerstand R_V :

$$U_E - U_A = U_V \approx U_V = 3 V$$

Schritt 2: Bestimmung des zulässigen Stroms I_A für einen veränderlichen Lastwiderstand von $R_L = 240 \Omega \dots 1 k\Omega$:

$$I_A = \frac{U_A}{R_L} = \frac{12 V}{R_L} = \frac{12 mA}{(1 k\Omega)} \dots \frac{50 mA}{(240 \Omega)}$$

$U_A = 12 V \approx U_Z = 12 V$, da sonst keine adäquate Stabilisierung der Ausgangsspannung stattfinden würde.

Schritt 3: Bestimmung des Dioden- (I_Z) und des Eingangsstroms (I_E):

$$I_Z = \frac{P_Z}{U_Z} = 41,6 mA \quad I_E = I_A + I_Z = \frac{53,6 mA}{(R_L = 1k\Omega)} \dots \frac{91,6 mA}{(240 \Omega)}$$

Schritt 4: Berechnung des Vorwiderstandes R_V . Hierzu wird die Spannung am Widerstand R_V , also die Spannung U_V , sowie die Eingangsströme I_E benötigt:

$$R_V = \frac{U_V}{I_E} = \frac{32,7 \Omega}{(R_L = 240 \Omega)} \dots \frac{56 \Omega}{(1 k\Omega)}$$

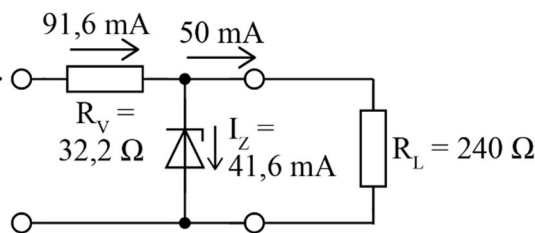
Fallbetrachtungen:

Fall A:

Bei $32,7 \Omega$, $I_E \rightarrow 91,6 mA \Rightarrow$

$$R_V = 32,2 \Omega$$

$$R_L = 240 \Omega$$

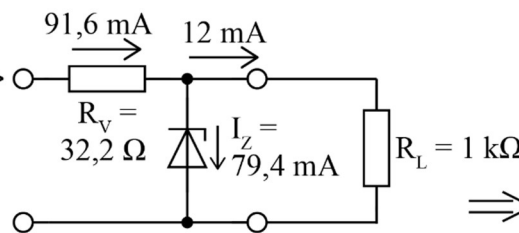


Fall B:

Bei $32,7 \Omega$, $I_E \rightarrow 91,6 mA \Rightarrow$

$$R_V = 32,2 \Omega$$

$$R_L = 1 k\Omega$$



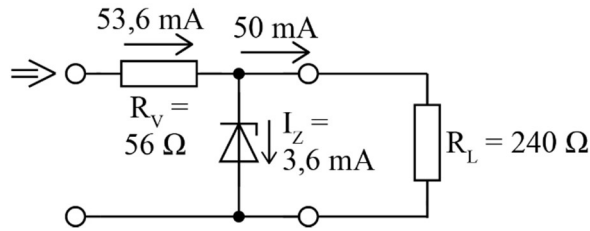
\Rightarrow Überlastung der Diode, da $I_Z \cdot U_Z > P_{tot}$
 $79,4 mA \cdot 12 V > 0,5 W$

Fall C:

Bei 56Ω , $I_E \rightarrow 53,6 \text{ mA}$

$$R_V = 56 \Omega$$

$$R_L = 240 \Omega$$

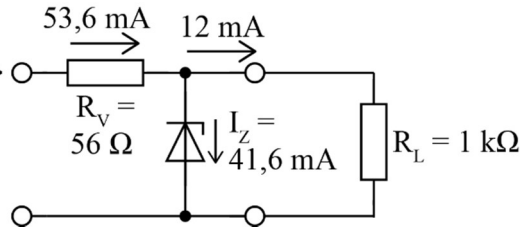


Fall D:

Bei 56Ω , $I_E \rightarrow 53,6 \text{ mA}$

$$R_V = 56 \Omega$$

$$R_L = 1 \text{ k}\Omega$$



Aus Fall B resultiert, dass der geforderte Leistungsbereich mit dieser einfachen Stabilisierungsschaltung nicht realisiert werden kann.

b) gegeben sind folgende Größen:

$$P_V = 0,5 \text{ W}, R_L = 200 \Omega \dots 150 \Omega, R_V = 30 \Omega$$

Schritt 1: Berechnung des Eingangsstroms unter Verwendung von U_V und dem Vorwiderstand R_V :

$$I_E = \frac{U_V}{R_V} = \frac{3 \text{ V}}{30 \Omega} = 0,1 \text{ A}$$

Schritt 2: Berechnung des Ausgangsstroms unter Verwendung von der Ausgangsspannung U_A und dem Lastwiderstand R_L :

$$I_A = \frac{U_A}{R_L} = \begin{matrix} 0,06 \text{ A} & \dots & 0,08 \text{ A} \\ (R_L = 200 \Omega) & \dots & (R_L = 150 \Omega) \end{matrix}$$

Schritt 3: Berechnung des Diodenstroms I_Z . Dieser ergibt sich aus der Differenz von Eingangsstrom I_E und dem Ausgangsstrom I_A :

$$I_Z = I_E - I_A = \begin{matrix} 0,02 \text{ A} & \dots & 0,04 \text{ A} \\ (R_L = 150 \Omega) & \dots & (R_L = 200 \Omega) \end{matrix}$$

Schritt 4: Berechnung der Verlustleistung P_V . Die Verlustleistung ist das Produkt aus dem Diodenstrom I_Z und der an der Diode abfallenden Spannung U_Z :

$$P_V = I_Z \cdot U_Z = 0,24 \text{ W} \dots 0,48 \text{ W}$$

Anmerkung: Die Verlustleistung führt zu einer Temperaturerhöhung und gemäß nachfolgender Formel zu einer Instabilität in der Spannungsstabilisierung:

$$U_Z = U_Z(1 + T_K \cdot T) + R_B \cdot I_Z$$

c) Gesucht ist: R_V für $I_Z \rightarrow \min$

Das bedeutet, dass der Diodenstrom im Idealfall $I_Z = 0 \text{ mA}$ beträgt. Dies wäre dann der Fall, wenn der Eingangsstrom dem Ausgangsstrom entspricht, weil dann kein Strom über den Z-Dioden-Zweig fließt. Somit ist nach dem höchstmöglichen Wert für den Ausgangsstrom zu suchen:

$$I_Z = 0 \rightarrow I_E = I_A \rightarrow I_A \rightarrow \max$$

Im betrachteten Bereich für den Lastwiderstand ist dies beim niedrigsten Wert gegeben:

$$\sim R_L = 150 \Omega$$

Bei einem Lastwiderstand $R_L = 150 \Omega$ beträgt der Ausgangsstrom (und somit auch der Eingangsstrom 80 mA (siehe Aufgabenteil b)):

$$I_E = I_A = 0,08 \text{ A}$$

Der Vorwiderstand R_V , bei dem der Diodenstrom I_Z für Teilaufgabe b) minimal wird, wird aus dem Quotienten aus R_V und dem Eingangsstrom berechnet:

$$R_V = \frac{U_V}{I_E} = 37,5 \Omega$$

Aufgabe 2.3

Zeichnen Sie die Strom-Spannungs-Kennlinie von einer Z-Diode in ein Diagramm ein.

Die Z-Spannung beträgt $U_Z = 5,6 \text{ V}$. Der differentielle Z-Widerstand im Durchbruchbereich hat einen Anstieg von $r_Z = \frac{dU_Z}{dI_Z} = 20 \Omega$.

In Durchlassrichtung ergibt sich der Strom $I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right)$ mit $I_S = 1 \text{ mA}$ und $U_T = 500 \text{ mV}$.

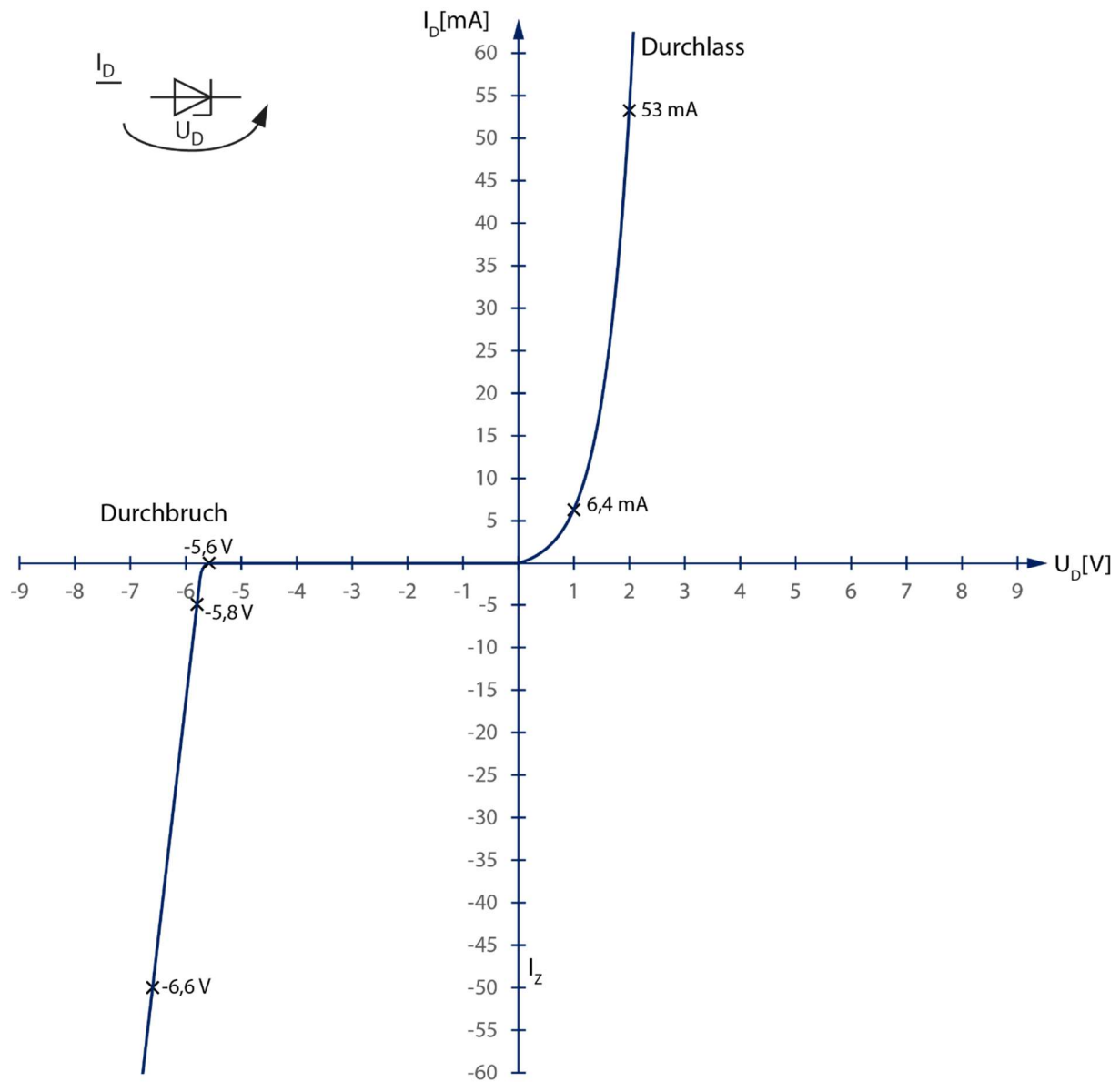
Lösung:

Schritt 1: Für den Durchlassbereich sind in o.g. Formel die Werte für I_S und U_T einzusetzen. Anschließend errechnet man für einige U_D -Werte entsprechend dieser Funktion die zugehörigen I_D -Werte und trägt die errechneten Punkte in das Koordinatensystem ein (für die Durchlassrichtung wird der Quadrant oben rechts verwendet). Abschließend werden die Punkte verbunden.

Schritt 2: Für die Darstellung des Durchbruchbereichs wird im Koordinatensystem der Quadrant unten links verwendet. Bis zum Erreichen des negativen Wertes der Z-Spannung (d.h. - 5,6 V) ist der Drainstrom I_Z gleich Null und bewegt sich ausgehend vom Ursprungspunkt (0|0) entlang der x-Achse bis zum Wert $U_D = -5,6 \text{ V}$. Dort vollzieht die Strom-Spannungs-Kennlinie eine kleine Kurve in den negativen Strombereich I_Z und geht jedoch schnell in den linearen Bereich über. Deshalb werden für die Zeichnung des weiteren Verlaufs nur zwei weitere Punkte benötigt. Im vorliegenden Fall bieten sich $U_D = -5,8 \text{ V}$ und $U_D = -6,6 \text{ V}$ an. Für die Berechnung der Steigung wird der Anstieg des differentiellen Z-Widerstands von $r_z = \frac{dU_z}{dI_z} = 20$ herangezogen. Durch Umstellen erhalten wir folgende Steigung:

$$\frac{dI_Z [A]}{dU_Z [V]} = 20^{-1} \Omega^{-1} = \frac{1 \text{ A}}{20 \text{ V}} = \frac{1000 \text{ mA}}{20 \text{ V}} = 50 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

Man beachte, dass die Werte für den Drainstrom im mA dargestellt werden. Dies macht eine Umrechnung der Einheit (Faktor 1000) notwendig. Die Punkte werden abschließend zu einer Geraden verbunden.



Steigung: $\frac{dI_Z [A]}{dU_Z [V]} = 20^{-1} \Omega^{-1} = \frac{1 A}{20 V} = \frac{1000 mA}{20 V} = 50 \frac{mA}{V}$

Aufgabe 2.4

Aus welchen physikalischen Effekten leitet sich die Z-Spannung einer Z-Diode ab?

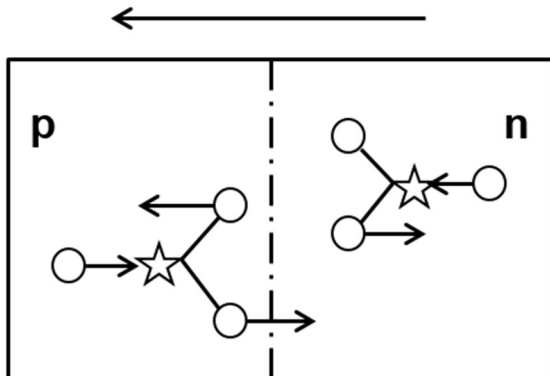
- a) Lawinenvervielfachung
- b) Punch-through
- c) Feldemission
- d) Compton-Effekt
- e) Quanteneffekt
- f) Tunneleffekt
- g) Norton-Fowler-Effekt
- h) Stoßionisation

Lösung:

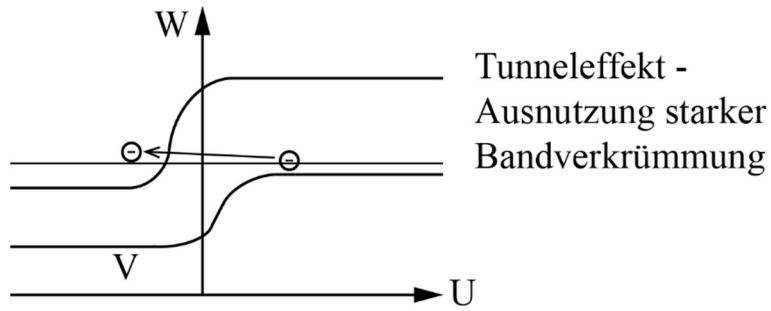
Folgende physikalischen Effekte sind bei einer Z-Diode relevant:

- Lawinenvervielfachung durch Stoßionisation: Elektronen werden aus ihren Kristallbindungen herausgelöst. Freie Elektronen werden durch das Feld beschleunigt und weitere Elektronen werden herausgestoßen.

**Kleine Raumladungszone (RLZ) mit großem Feld.
Zusätzliches Feld in gleicher Richtung wie das Feld der RLZ
→ Lawineneffekt**



- Tunneleffekt bei hoher Dotierung ($> 10^{20} \text{ cm}^{-2}$): Sperrschicht wird durch hohe Dotierung auch bei kleinerer Spannung überwunden.



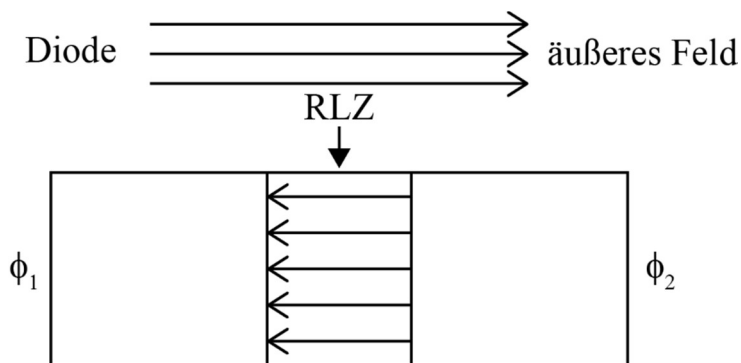
Die richtigen Antworten sind: Lawinenvervielfachung, Tunneleffekt, Stoßionisation

Aufgabe 2.5

Welches Bauelement nutzt den p-n-Übergang in Durchlassrichtung?

Lösung:

Die Diode nutzt den p-n-Übergang in Durchlassrichtung. Der physikalische Effekt beruht auf der Kompensation des E-Felds der Raumladungszone durch ein Gegenfeld.



Aufgabe 2.6

Welches Bauelement nutzt den p-n-Übergang in Sperrrichtung?

Lösung:

Die Zener-Diode (oder Z-Diode) nutzt den p-n-Übergang in Sperrrichtung. Die physikalischen Effekte beruhen auf der Lawinenvervielfachung durch Stoßionisation und dem Tunneleffekt.

Aufgabe 2.7

Welche schaltungstechnischen Funktionen lassen sich mit Zener-Dioden realisieren?

- a) Spannungsstabilisierung
- b) Spannungsgleichrichtung
- c) Spannungsverdopplung
- d) Demodulation
- e) Speicherschaltung
- f) Logikgatter
- g) Inverter
- h) Stromteiler

Lösung:

Die Zener-Diode wird zur Spannungsstabilisierung eingesetzt.

Wichtige Parameter: U_z : Zener-Spannung.

r_z : Bahnwiderstand; Maß für die Stromänderung, wenn sich die Spannung geringfügig ändert.

T_k : Temperaturkoeffizient; gibt die Temperaturabhängigkeit an.