

Abt. Technische Informatik  
Dr. Hans-Joachim Lieske

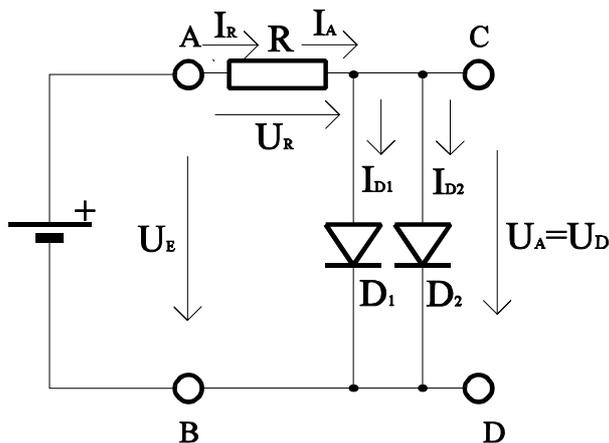
## Aufgaben zum Seminar Technische Informatik

### Aufgabe 2.3.1. - Parallelschaltung von Halbleiterdioden

In integrierten Halbleiterschaltkreisen können zur Versteilerung der Kennlinie Parallelschaltungen von Dioden verwendet werden.

Für einfache Betrachtungen können Diodenkennlinien als Einheit von zwei Geraden approximiert werden.

Gegeben ist folgende Schaltung:



Werte:  
 $D_1 = \text{Diode 1}$        $U_E = 3\text{V}$        $R_1 = 37,5\ \Omega$   
 $D_2 = \text{Diode 2}$

und die Kennlinien der Dioden

Abb. 1

Aufgabe:

Bestimmen Sie die Ausgangsspannung  $U_A$ , den Gesamtstrom durch die Dioden  $I_A$  sowie die Teilströme  $I_{D1}$  und  $I_{D2}$  durch die Dioden.

- Bestimmen Sie die mathematische Funktion der Kennlinien  $I_{D1}=f(U_{D1})$  für Diode 1 und  $I_{D2}=f(U_{D2})$  für beide Intervalle.
- Konstruieren Sie die Ersatzkennlinie für die Parallelschaltung von Diode 1 und Diode 2. Beachten Sie, daß sich hierbei die Ströme addieren und drei Intervalle vorhanden sind.
- Bestimmen Sie die mathematische Funktion der Ersatzkennlinie  $I_{Dges}=f(U_{Dges})$  der Parallelschaltung von Diode 1 und Diode 2. Beachten sie dabei, daß nun drei Intervalle vorhanden sind.
- Bestimmen Sie mithilfe der Ersatzkennlinie die Ausgangsspannung  $U_A$  und den Strom  $I_A$  für die Parallelschaltung der Dioden sowie die Spannung  $U_R$  und den Strom  $I_R$  über den Widerstand.
- Bestimmen Sie aus den Einzelkennlinien die Teilströme  $I_{D1}$  und  $I_{D2}$  durch die Dioden  $D_1$  und  $D_2$ .

Stellen sie die Ergebnisse in einer Tabelle dar.

Für die Intervalle sind explizite Werte anzugeben. Angaben wie "sonst" oder "Rest" sind nicht zulässig!

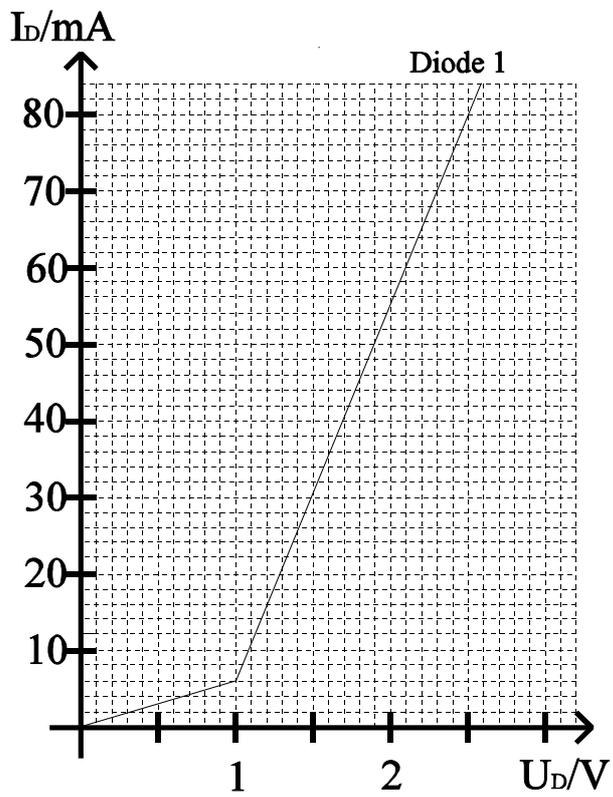


Abb. 2

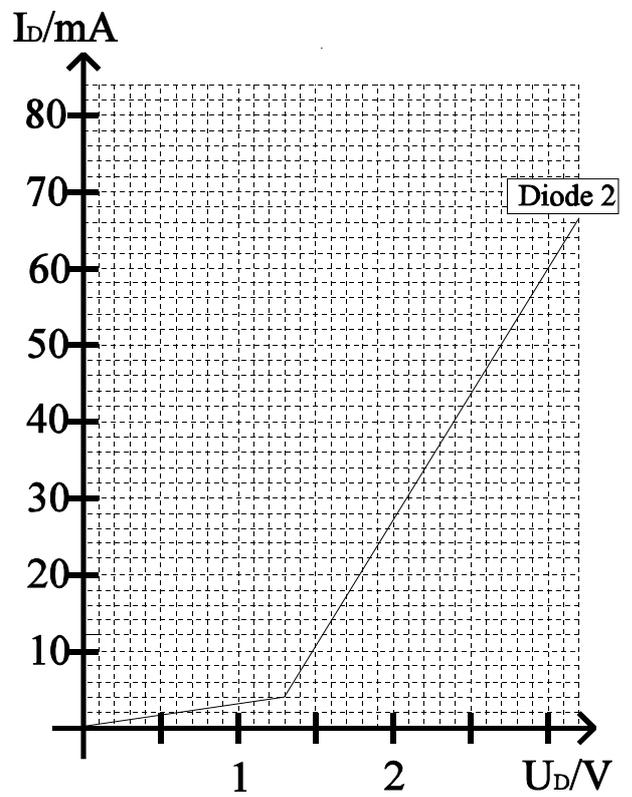


Abb. 3

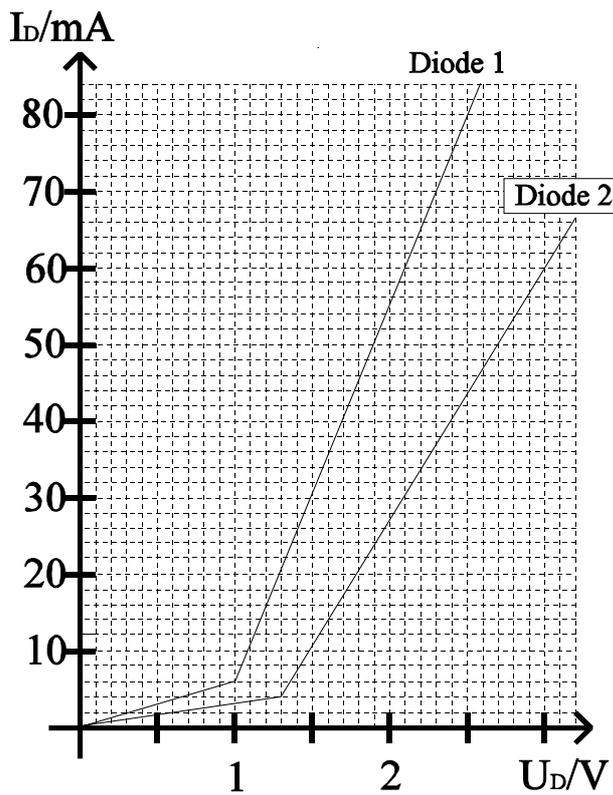
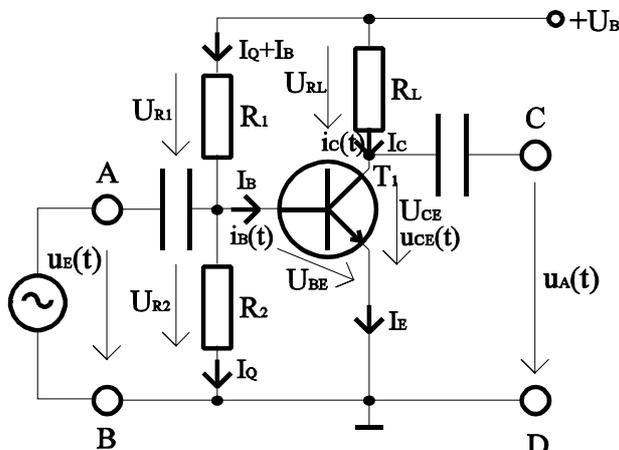


Abb. 4

## Aufgabe 2.3.2. - Berechnung einer Transistorschaltung

Unter Zuhilfenahme eines vereinfachten  $U_{CE}/I_C$  Kennlinienfeldes mit dem Parameter  $I_B$  sollen die Widerstände bei vorgegebenen Gleichstromarbeitspunkt berechnet werden.

Gegeben ist folgende Schaltung:



Werte:  $I_{CA} = 40\text{mA}$   $I_Q = 5 I_B$   
 $U_B = 12\text{V}$   $U_{CEA} = U_B/2$   
 $U_{BEA} = 0,7\text{V}$   $i_B(t) = 100\mu\text{A} \sin(314\text{s}^{-1}t)$

und die Kennlinien des 1. Quadranten des Transistors

Abb. 5

Aufgabe:

1. Zeichnen Sie unter Zuhilfenahme der Betriebsspannung  $U_B$ , sowie der Parameter des Arbeitspunktes ( $I_{CA}$  und  $U_{CEA}$ ) die  $R_L$ -Gerade in das  $U_{CE}/I_C$  Kennlinienfeld ein und bestimmen Sie den Wert von  $R_L$ .
2. Bestimmen Sie aus dem  $U_{CE}/I_C$  Kennlinienfeld den für den Arbeitspunkt ( $I_{CA}$ ,  $U_{CEA}$ ) notwendigen Basisstrom  $I_{BA}$ .
3. Berechnen Sie mithilfe des Basisstroms  $I_{BA}$  den Querstrom  $I_Q$ , der durch den Spannungsteiler ( $R_1$ ,  $R_2$ ) fließen soll.
4. Berechnen Sie die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$ .
5. Bestimmen Sie die Gleichstromverstärkung  $B_A$  des Transistors im Arbeitspunkt ( $B_A = I_{CA}/I_{BA}$ ).
6. Der Transistor wird mit einem zeitveränderlichen Basisstrom  $i_B(t) = I_B \sin(\omega t + \varphi)$  mit  $\varphi = 0$  im Arbeitspunkt angesteuert.

Bestimmen Sie den maximalen- und den minimalen Basisstrom ( $I_{B\text{max}}$ ,  $I_{B\text{min}}$ ), die Basisstromdifferenz  $\Delta I_B = I_{B\text{max}} - I_{B\text{min}}$ ,  $u_{CE}(t)$ , die minimale- und maximale Kollektorspannung ( $U_{CE\text{max}}$ ,  $U_{CE\text{min}}$ ), die Kollektorspannungsdifferenz  $\Delta U_{CE} = |U_{CE\text{max}} - U_{CE\text{min}}|$ , den maximalen- und den minimalen Kollektorstrom ( $I_{C\text{max}}$ ,  $I_{C\text{min}}$ ), die Kollektorstromdifferenz  $\Delta I_C = (I_{C\text{max}} - I_{C\text{min}})$ .

Die Indizes (max, min) richten sich nach dem Basisstrom)

Stellen Sie die Ergebnisse in einer Tabelle dar.

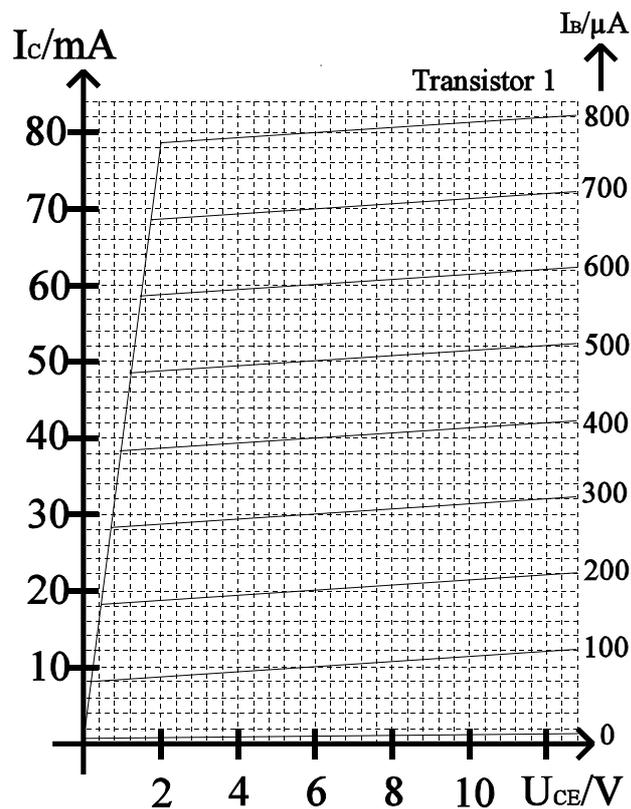


Abb. 6

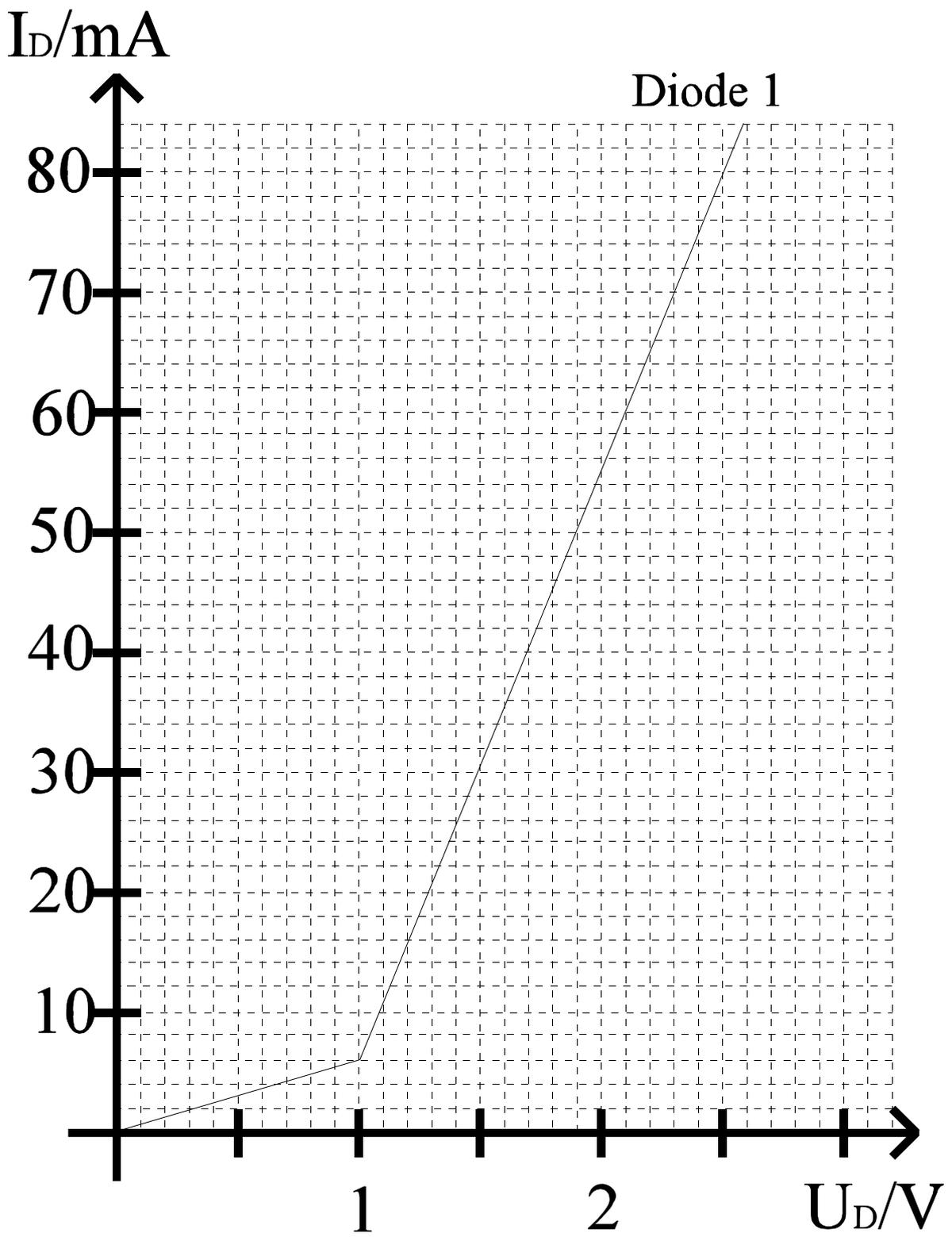


Abb. 6

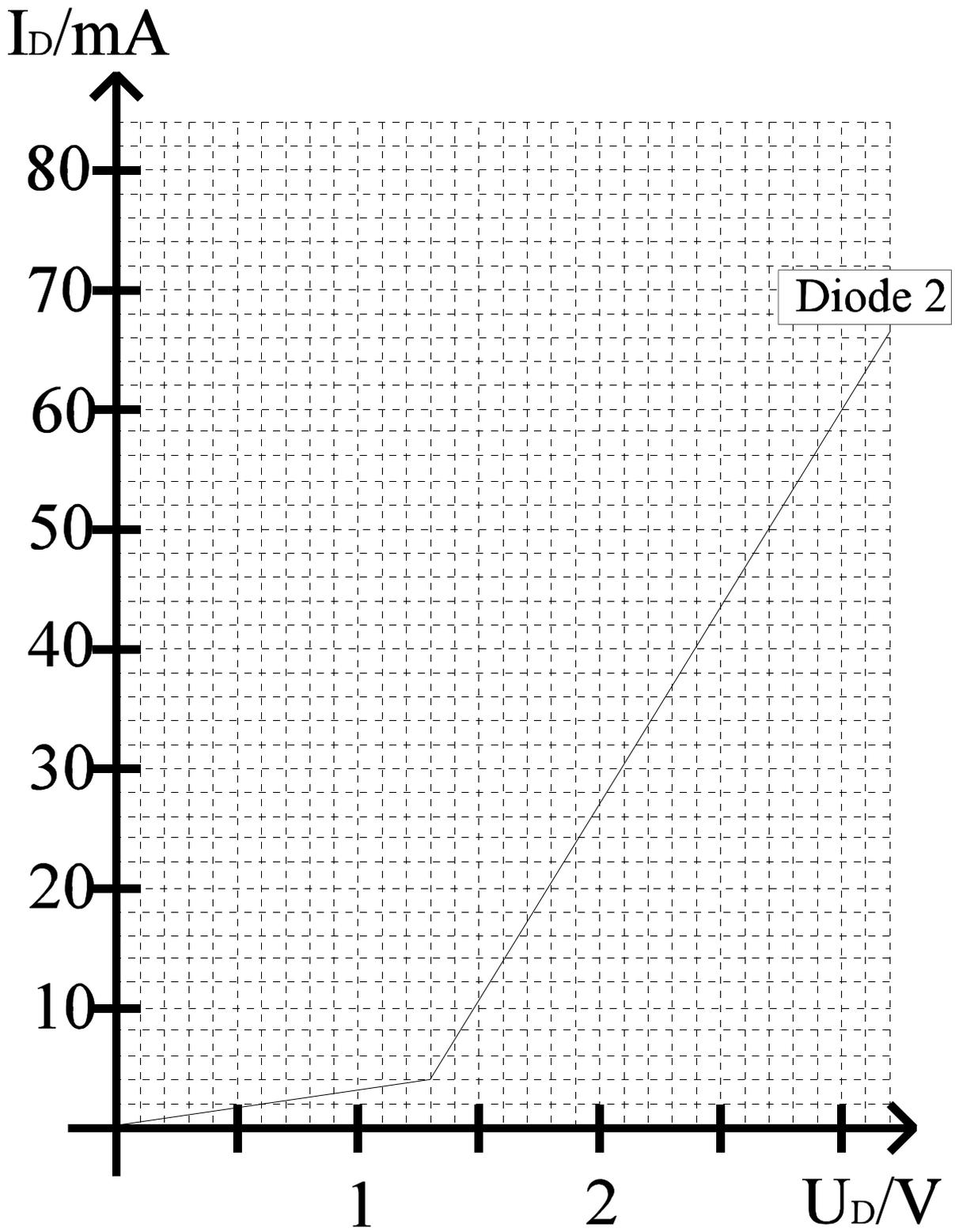


Abb. 7

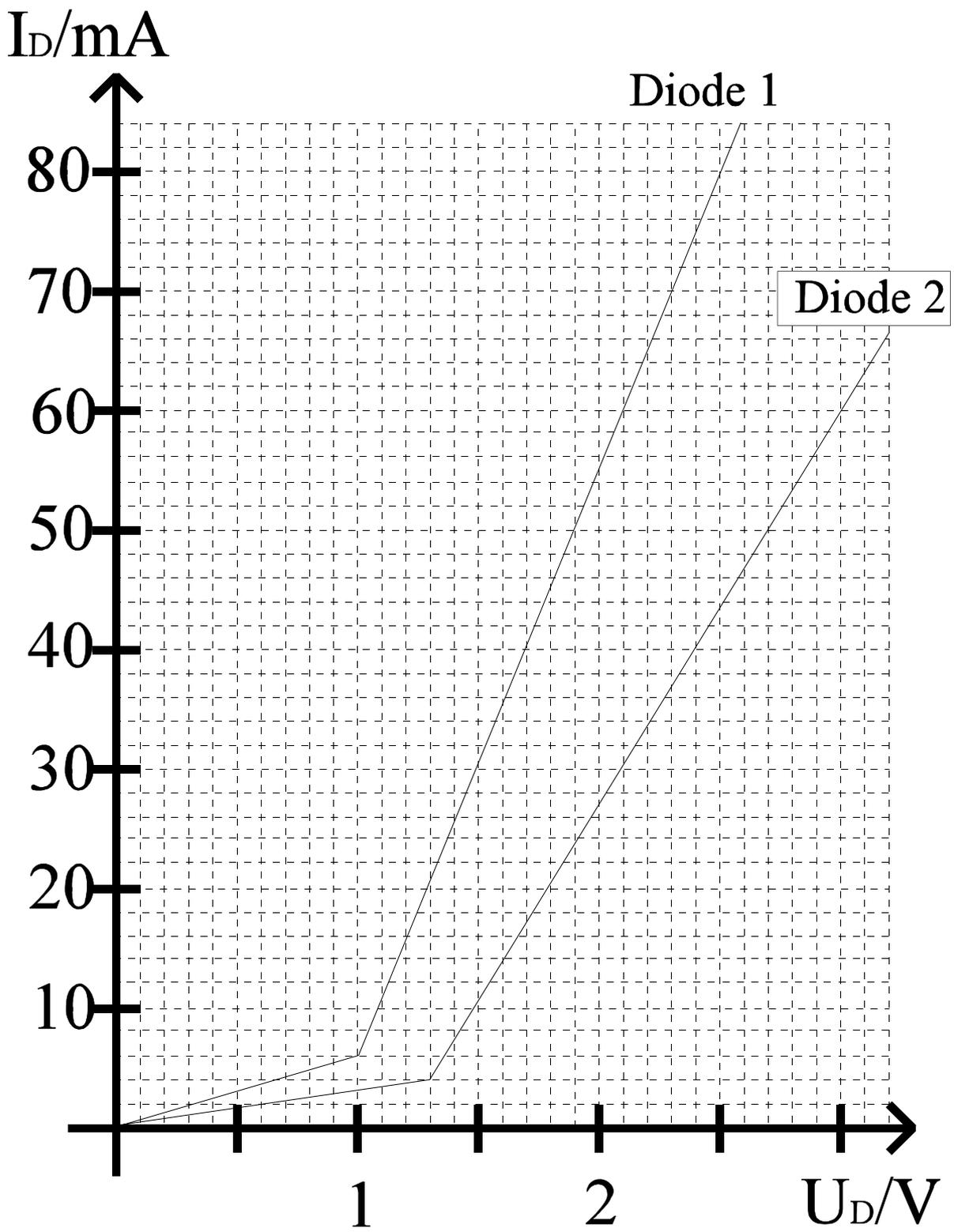


Abb. 8

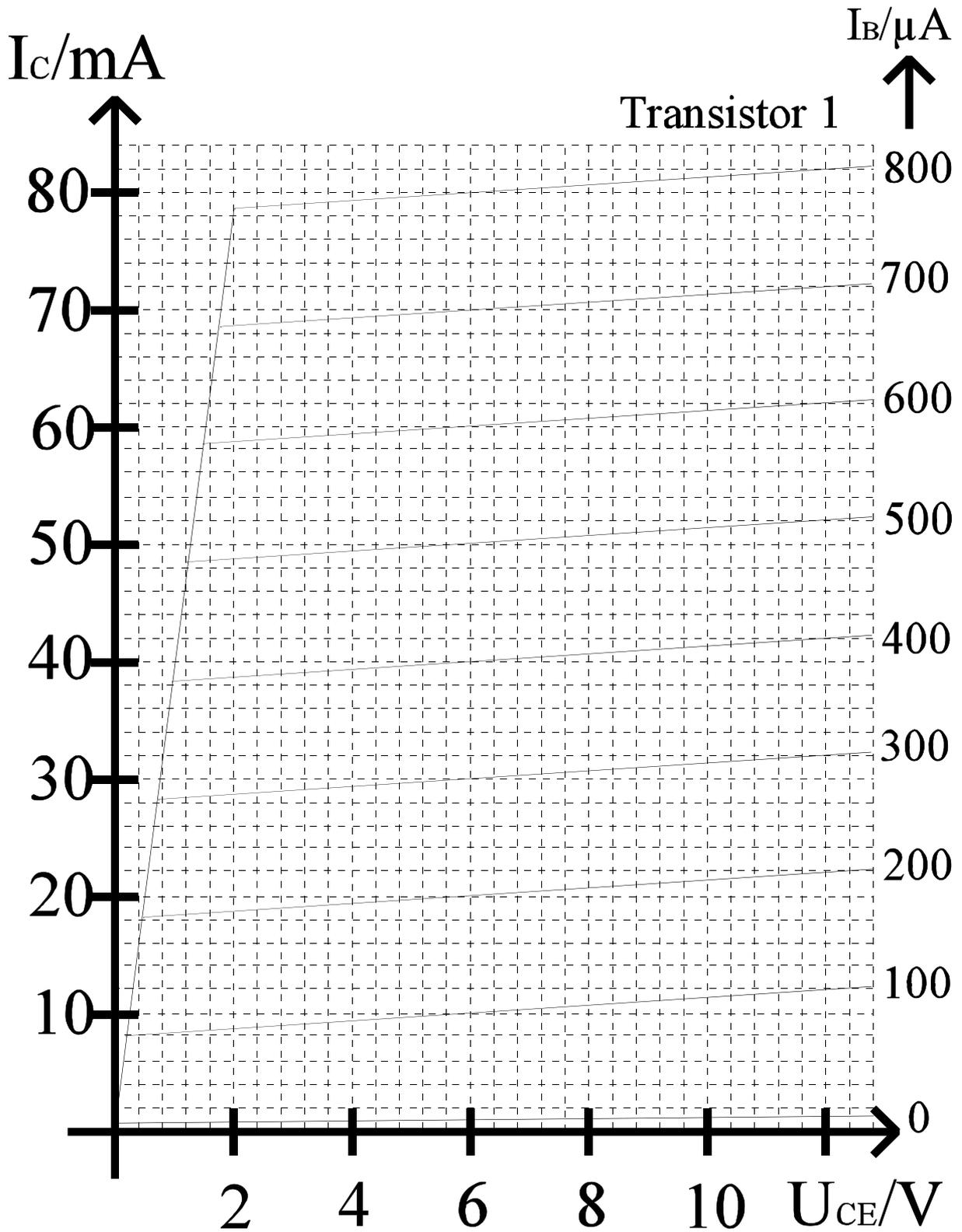


Abb. 9

# Lösung: Aufgabe 2.3.1.

## Parallelschaltung von Halbleiterdioden

1. Bestimmung der math. Funktion der Kennlinien der Halbleiterdioden

Die Kennlinien wurden als eine Menge von Geraden approximiert

$$I=f(U)=aU+b$$

Befindet sich die Gerade im Intervall  $[U_1, U_2]$  so gilt für zwei Punkte:

$$I_1=aU_1+b \text{ und } I_2=aU_2+b$$

und es folgt:

$$a=(I_2-I_1)/(U_2-U_1) \text{ und } b=I_1-aU_1=I_2-aU_2$$

- 1.1. Diode 1 (Abb.10)

1. Geradenabschnitt  $U \in [0;1]V$ ,  $I \in [0;6]mA$

$$a=6mA/1V=6mS \quad b=0$$

2. Geradenabschnitt  $U \in [1;2,5]V$ ,  $I \in [6;80]mA$

$$a=(80mA-6mA)/(2,5V-1V)=74mA/1,5V=49,33mS$$
$$b=80mA-49,33mS \times 2,5V=80mA-123,33mA=-43,33mA$$

3. gesamte Kennlinie

$$I_{D1}=f(U_{D1}) = \begin{cases} 6mS \times U_{D1} & \text{für } U_{D1} \in [0;1]V \\ 49,33mS \times U_{D1} - 43,33mA & \text{für } U_{D1} \in [1;\infty)V \end{cases}$$

1.2. Diode 2 (Abb.11)

1. Geradenabschnitt  $U \in [0; 1,3]V$ ,  $I \in [0; 4]mA$

$$a = 4mA / 1,3V = 3,08mS \quad b = 0$$

2. Geradenabschnitt  $U \in [1,3; 3]V$ ,  $I \in [4; 60]mA$

$$a = (60mA - 4mA) / (3V - 1,3V) = 56mA / 1,7V = 32,94mS$$
$$b = 60mA - 32,94mS \times 3V = 60mA - 98,82mA = -38,82mA$$

3. gesamte Kennlinie

$$I_{D2} = f(U_{D2}) = \begin{cases} 3,08mS \times U_{D2} & \text{für } U_{D2} \in [0; 1,3]V \\ 32,94mS \times U_{D2} - 38,82mA & \text{für } U_{D2} \in [1,3; \infty)V \end{cases}$$

2. Konstruktion der Gesamtkennlinie der Parallelschaltung von Diode 1 und Diode 2 (Abb. 12)

Bei der Parallelschaltung addieren sich die Ströme, die Spannungen bleiben gleich

$$I_{\text{ers}}(U_{\text{ers}}) = I_{D1}(U_{\text{ers}}) + I_{D2}(U_{\text{ers}})$$

Da für beide Kennlinien Geraden vorliegen, brauchen nur die Knickpunkte beachtet werden.

1. Knickpunkt:  $U_{\text{ers}} = 0\text{V}$

$$I_{D1} = 0\text{mA}$$

$$I_{D2} = 0\text{mA}$$

daraus folgt  $I_{\text{ers}} = 0\text{mA}$

2. Knickpunkt:  $U_{\text{ers}} = 1\text{V}$

$$I_{D1} = 6\text{mA} \times 1\text{V} = 6\text{mA}$$

$$I_{D2} = 3,08\text{mA} \times 1\text{V} = 3,08\text{mA}$$

daraus folgt:  $I_{\text{ers}} = 6\text{mA} + 3,08\text{mA} = 9,08\text{mA}$

3. Knickpunkt:  $U_{\text{ers}} = 1,3\text{V}$

$$I_{D1} = 49,33\text{mA} \times 1,3\text{V} - 43,33\text{mA} = 20,8\text{mA}$$

$$I_{D2} = 3,08\text{mA} \times 1,3\text{V} = 4\text{mA}$$

daraus folgt:  $I_{\text{ers}} = 20,8\text{mA} + 4\text{mA} = 24,8\text{mA}$

4. Quasi-Endpunkt:  $U_{\text{ers}} = 2\text{V}$

$$I_{D1} = 49,33\text{mA} \times 2\text{V} - 43,33\text{mA} = 55,33\text{mA}$$

$$I_{D2} = 32,94\text{mA} \times 2\text{V} - 38,83\text{mA} = 27,06\text{mA}$$

daraus folgt:  $I_{\text{ers}} = 55,33\text{mA} + 27,06\text{mA} = 82,39\text{mA}$

3. Bestimmung der math. Funktion der Ersatzkennlinie der Halbleiterdioden (Abb.12)

Die Kennlinie wurde als eine Menge von Geraden approximiert

$$I = f(U) = aU + b$$

Befindet sich die Gerade im Intervall  $[U_1, U_2]$  so gilt für zwei Punkte:

$$I_1 = aU_1 + b \text{ und } I_2 = aU_2 + b$$

und es folgt:

$$a = (I_2 - I_1) / (U_2 - U_1) \text{ und } b = I_1 - aU_1 = I_2 - aU_2$$

**Ersatzkennlinie**

1. Geradenabschnitt  $U \in [0; 1]\text{V}$ ,  $I \in [0; 9,08]\text{mA}$

$$a = 9,08\text{mA} / 1\text{V} = 9,08\text{mS}$$

$$b = 0$$

2. Geradenabschnitt  $U \in [1; 1,3]\text{V}$ ,  $I \in [9,08; 24,8]\text{mA}$

$$a = (24,8\text{mA} - 9,08\text{mA}) / (1,3\text{V} - 1\text{V}) = 15,72\text{mA} / 0,3\text{V} = 52,4\text{mS}$$

$$b = 24,8\text{mA} - 52,4\text{mS} \times 1,3\text{V} = 24,8\text{mA} - 68,12\text{mA} = -43,32\text{mA}$$

3. Geradenabschnitt  $U \in [1,3; 2]\text{V}$ ,  $I \in [24,8; 82,39]\text{mA}$

$$a = (82,39\text{mA} - 24,8\text{mA}) / (2\text{V} - 1,3\text{V}) = 57,59\text{mA} / 0,7\text{V} = 82,27\text{mS}$$

$$b = 82,39\text{mA} - 82,27\text{mS} \times 2\text{V} = 82,39\text{mA} - 164,54\text{mA} = -82,15\text{mA}$$

4. gesamte Kennlinie

$$I_{\text{ges}} = f(U_{\text{ges}}) = \begin{cases} 9,08\text{mS} \times U_{\text{ges}} & \text{für } U_{D1} \in [0; 1]\text{V} \\ 52,4\text{mS} \times U_{\text{ges}} - 43,32\text{mA} & \text{für } U_{D1} \in [1; 1,3]\text{V} \\ 82,27\text{mS} \times U_{\text{ges}} - 82,15\text{mA} & \text{für } U_{D1} \in [1,3; \infty)\text{V} \end{cases}$$

4. Bestimmung der

$$U_{\text{leer}}=3\text{V} \quad I_{\text{max}}=3\text{V}/37,5\Omega=80\text{mA}$$

Bestimmung der Geradengleichung der Widerstandskennlinie:

1. Geradenabschnitt  $U \in [0;3]\text{V}$ ,  $I \in [80;0]\text{mA}$

$$a=(0\text{mA}-80\text{mA})/(3\text{V}-0\text{V})=-80\text{mA}/3\text{V}=-26,667\text{mS}$$

$$b=0\text{mA}-(-26,667\text{mS} \times 3\text{V})=80\text{mA}$$

$$I_{\text{R}}=f(U_{\text{R}}) = -26,667\text{mS} \times U_{\text{R}} + 80\text{mA} \quad \text{für } U_{\text{R}} \in [0;3]\text{V}$$

Bestimmung des Schnittpunktes der Widerstandsgeraden mit der Ersatzkennlinie:

$$I_{\text{ges}}=f(U_{\text{ges}})=I_{\text{R}}=f(U_{\text{R}})=I_{\text{A}}=f(U_{\text{A}})$$

Die Berechnung für alle 3 Intervalle der Ersatzkennlinie und der Vergleich der Ergebnisse ergibt, daß der gültige Schnittpunkt im 3. Teil der Kennlinie (3. Intervall) liegen muß. Hier nur die Berechnung des gültigen Intervalls.

$$I_{\text{A}}=82,27\text{mS} \times U_{\text{A}} - 82,15\text{mA} = -26,667\text{mS} \times U_{\text{A}} + 80\text{mA}$$

$$(82,27\text{mS} + 26,667\text{mS}) \times U_{\text{A}} = 80\text{mA} + 82,15\text{mA}$$

$$108,937\text{mS} \times U_{\text{A}} = 162,15\text{mA}$$

$$U_{\text{A}} = 162,15\text{mA} / 108,937\text{mS} = \mathbf{1,488\text{V} \approx 1,49\text{V}}$$

$$I_{\text{A}} = 82,27\text{mS} \times 1,488\text{V} - 82,15\text{mA} = \mathbf{40,268\text{mA} \approx 40,3\text{mA}}$$

Bestimmung des Stromes durch die Diode 1 durch Einsetzen von  $U_{\text{A}}$  in die Kennliniengleichungen.

Die Berechnung für die 2 Intervalle der Ersatzkennlinie und der Vergleich der Ergebnisse ergibt, daß der gültige Schnittpunkt im 2. Teil der Kennlinie (2. Intervall) liegen muß. Hier nur die Berechnung des gültigen Intervalls.

$$I_{\text{D1A}}=f(U_{\text{A}})=49,33\text{mS} \times 1,488\text{V} - 43,33\text{mA} = \mathbf{30,073\text{mA} \approx 30,1\text{mA}}$$

Bestimmung des Stromes durch die Diode 2 durch Einsetzen von  $U_{\text{A}}$  in die Kennliniengleichungen.

Die Berechnung für die 2 Intervalle der Ersatzkennlinie und der Vergleich der Ergebnisse ergibt, daß der gültige Schnittpunkt im 2. Teil der Kennlinie (2. Intervall) liegen muß. Hier nur die Berechnung des gültigen Intervalls.

$$I_{\text{D2A}}=f(U_{\text{A}})=32,94\text{mS} \times 1,488\text{V} - 38,82\text{mA} = \mathbf{10,195\text{mA} \approx 10,2\text{mA}}$$

Probe: (genau)  $I_{\text{A}}=I_{\text{D1A}}+I_{\text{D2A}}=30,07\text{mA}+10,19\text{mA}=40,268\text{mA}$

dieselben Werte können (nicht so genau) aus der Ersatzkennlinie abgelesen werden (Abb. 13)

Bestimmung der Spannung und des Stromes über den Widerstand im Arbeitspunkt

$$U_{\text{R}}=U_{\text{E}}-U_{\text{A}}=3\text{V}-1,49\text{V}=\mathbf{1,51\text{V}}$$

$$I_{\text{R}}=I_{\text{A}}=\mathbf{40,3\text{mA}}$$

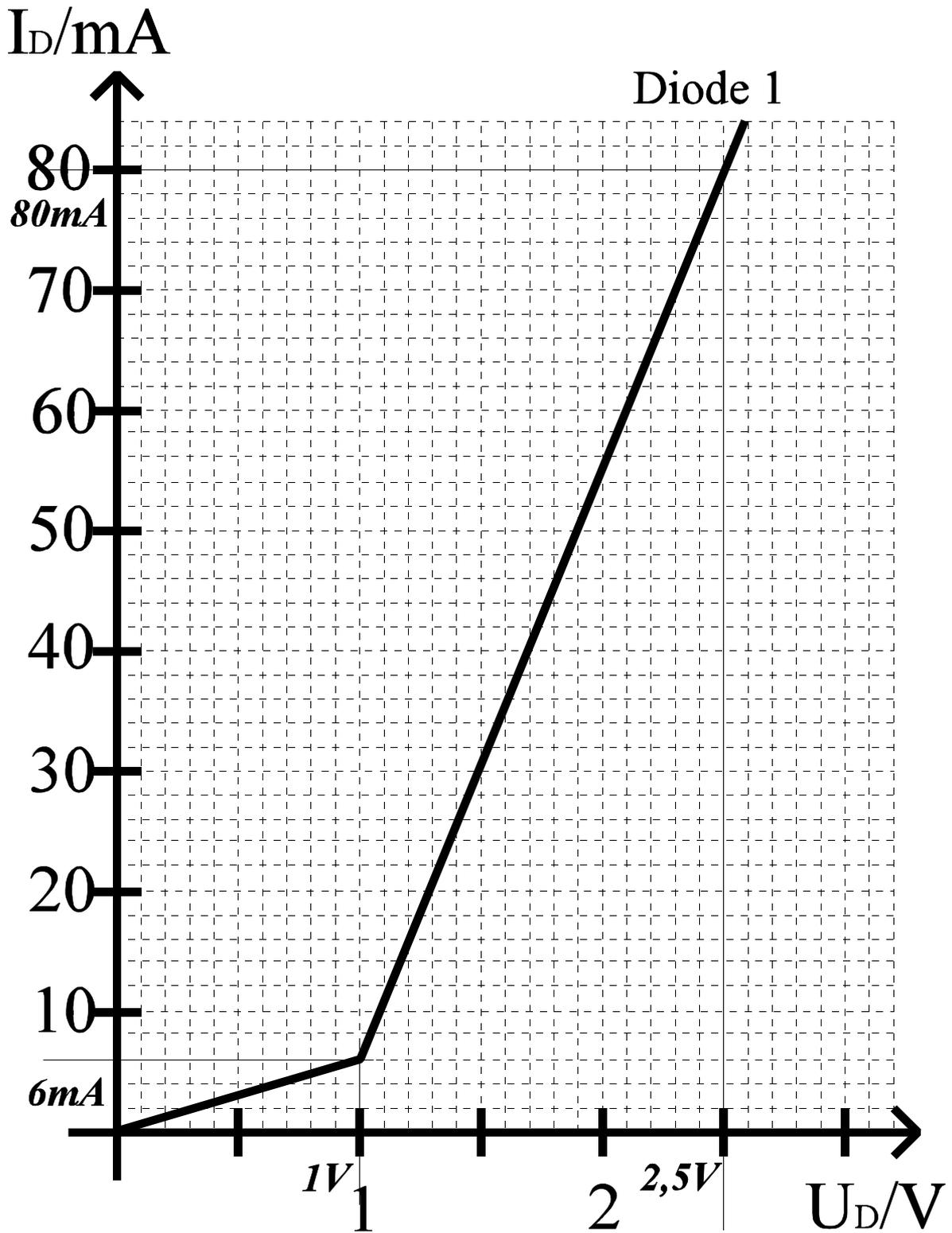


Abb. 10

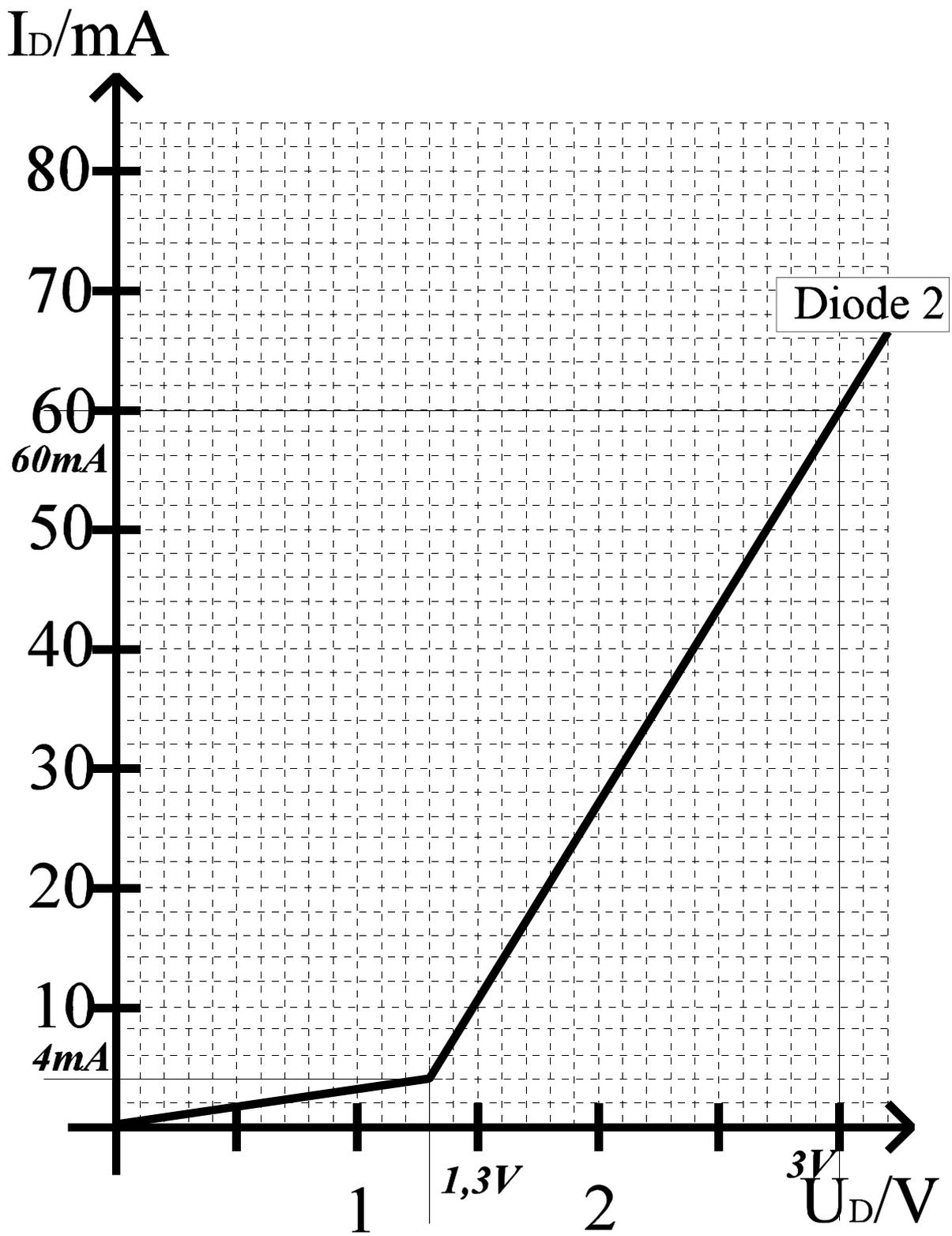


Abb. 11

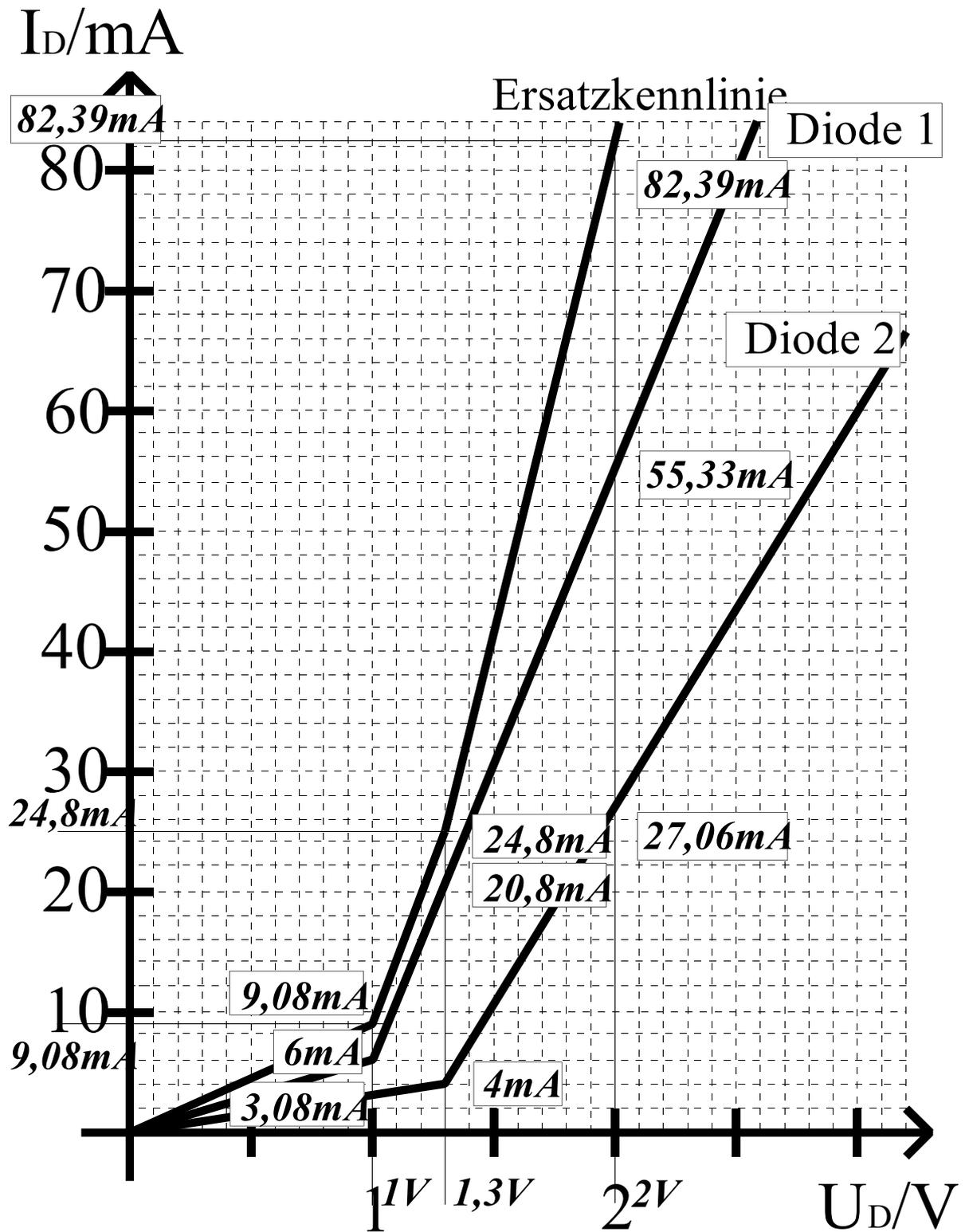


Abb. 12

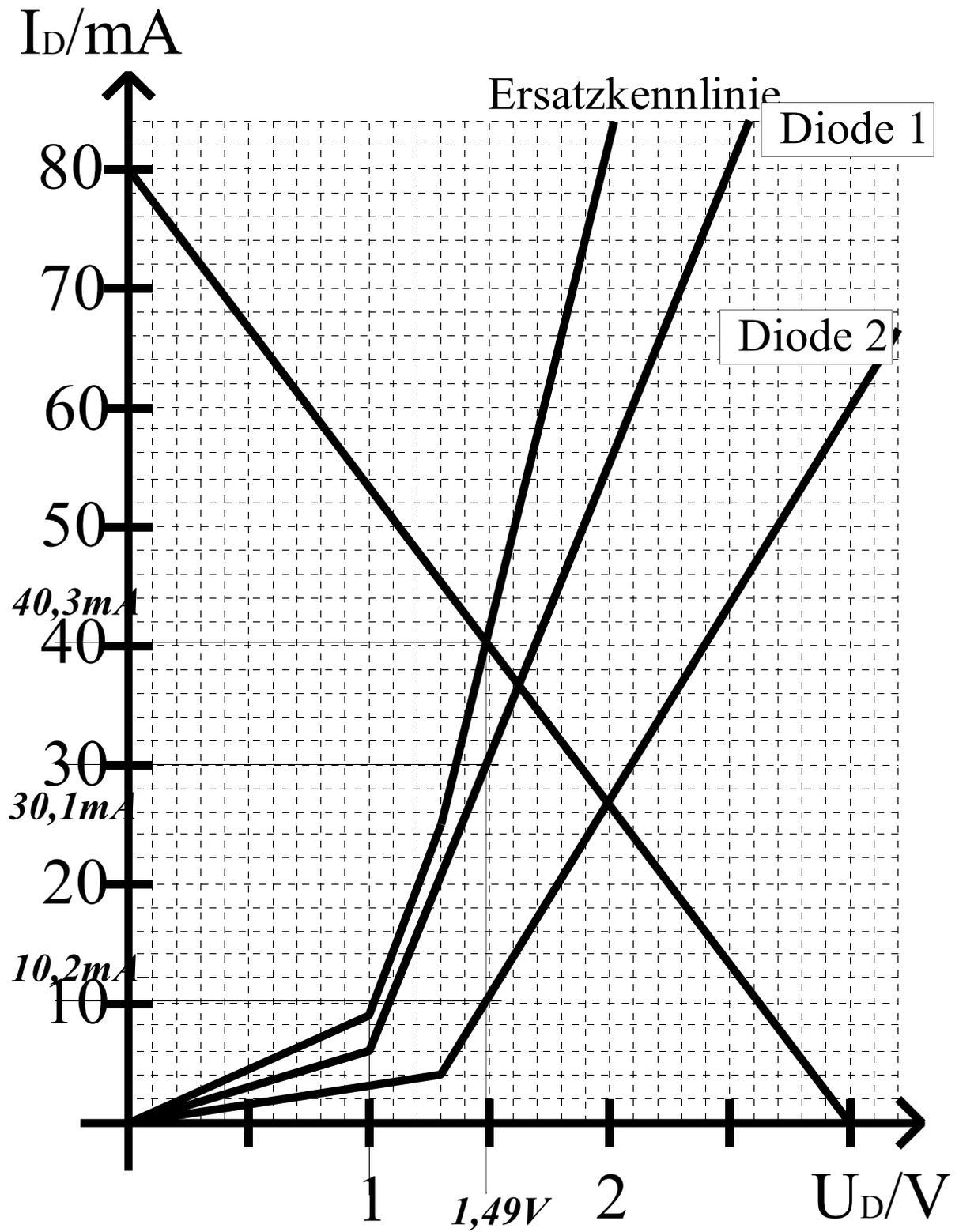


Abb. 13

# Lösung: Aufgabe 2.3.2.

## Berechnung einer Transistorschaltung

1. Zeichnen der  $R_L$ -Gerade und Bestimmung des Wertes von  $R_L$  (Abb. 14)  
1.1. Berechnung mithilfe des Arbeitspunktes

$$\begin{aligned}U_{CEA} &= U_B/2 = 12V/2 = 6V \\ U_{RL} &= U_B - U_{CEA} = 12V - 6V = 6V & I_{RL} &= I_{CA} = 40mA \\ R_L &= U_{RL}/I_{RL} = 6V/40mA = \mathbf{150\Omega}\end{aligned}$$

- 1.2. Berechnung mithilfe des Kennlinienfeldes (Extrema für Spannung und Strom)

$$\begin{aligned}U_B &= 12V & I_{max} &= 80mA \\ R_L &= U_B/I_{max} = 12V/80mA = \mathbf{150\Omega}\end{aligned}$$

2. Bestimmung des Basisstromes im Arbeitspunkt aus dem Kennlinienfeld (Abb. 14)

$$I_{BA} = \mathbf{400\mu A}$$

3. Berechnung des Querstroms über den Spannungsteiler

$$I_Q = 5 \times I_{BA} = 5 \times 400\mu A = \mathbf{2mA}$$

4. Berechnung von  $R_1$  und  $R_2$

$$\begin{aligned}U_{R1} &= U_B - U_{BE} = 12V - 0,7V = 11,3V & I_{R1} &= I_Q + I_{BA} = 2mA + 0,4mA = 2,4mA \\ R_1 &= U_{R1}/I_{R1} = 11,3V/2,4mA = \mathbf{4,708k\Omega} \approx \mathbf{4,7k\Omega}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{R2} &= U_{BE} = 0,7V & I_{R1} &= I_Q = 2mA \\ R_2 &= U_{R2}/I_{R2} = 0,7V/2mA = \mathbf{350\Omega}\end{aligned}$$

5. Berechnung der Gleichstromverstärkung im Arbeitspunkt

$$B_A = I_{CA}/I_{BA} = 40mA/400\mu A = \mathbf{100}$$

6. Bestimmung der Spannungen und Ströme für Ansteuerung mit einer Sinusspannung

$$i_B(t) = I_B \sin(\omega t + \varphi) = \mathbf{100\mu A \sin(314s^{-1}t)}$$

- 6.1. Bestimmung des minimalen und maximalen Basisstromes sowie der Basisstromdifferenz

aus Abb. 18

$$\begin{aligned}I_{Bmin} &= I_{BA} - I_B = 400\mu A - 100\mu A = \mathbf{300\mu A} & I_{Bmax} &= I_{BA} + I_B = 400\mu A + 100\mu A = \mathbf{500\mu A} \\ \Delta I_B &= I_{Bmax} - I_{Bmin} = 500\mu A - 300\mu A = \mathbf{200\mu A}\end{aligned}$$

- 6.2. Bestimmung des minimalen und maximalen Kollektorstromes sowie der Kollektorstromdifferenz

aus Abb. 18

$$\begin{aligned}I_{Cmin} &= \mathbf{30,4mA} & I_{Cmax} &= \mathbf{49,6mA} \\ \Delta I_C &= I_{Cmax} - I_{Cmin} = 49,6mA - 30,4mA = \mathbf{19,2mA}\end{aligned}$$

- 6.3. Bestimmung der minimalen und maximalen Kollektor-Emitterspannung sowie der Kollektor-Emitterspannungsdifferenz

aus Abb. 18  $U_{CEmax}=4,54V$

$U_{CEmin}=7,46V$

$$\Delta U_{CE}=|U_{CEmax}-U_{CEmin}|=|4,54V-7,46V|=2,92V$$

Die Betragsbildung bei Punkt 6.3. und das negative Vorzeichen bei Punkt 6.5 resultiert aus der Tatsache, daß die Indizes "max" und "min" nach den Strömen gewählt wurden um eine eindeutige Zuordnung zu haben. Unter "min" ist in Wirklichkeit die maximale Spannung und unter "max" die minimale. Dies resultiert aus dem  $180^\circ$  Phasenwinkel zwischen Kollektorstrom und Kollektorspannung.

#### 6.4. Bestimmung des Scheitelwertes des Kollektorwechselstroms und der Zeitfunktion

aus Abb. 18  $I_C=I_{Cmax}-I_{CA}=49,6mA-40mA=9,6mA$  oder  $I_C=I_{CA}-I_{Cmin}=40mA-30,4mA=9,6mA$

$$i_C(t)=I_C \sin(\omega t + \varphi) = 9,6mA \sin(314s^{-1}t)$$

*auch richtig, nicht Bestandteil der Aufgabenstellung:*

$$i_{Cges}(t)=i_C(t)+I_A=I_{CE} \sin(\omega t + \varphi) + I_A = 9,6mA \sin(314s^{-1}t) + 40mA$$

#### 6.5. Bestimmung des Scheitelwertes der Kollektorwechselspannung und der Zeitfunktion

aus Abb. 18  $U_{CE}=(U_{CEmax}-U_{ECA})=(4,54V-6V)=-1,46V$  oder  $U_{CE}=(U_{CEA}-U_{ECmin})=(6V-7,46V)=-1,46V$

$$u_{CE}(t)=U_{CE} \sin(\omega t + \varphi) = -1,46V \sin(314s^{-1}t) = 1,46V \sin(314s^{-1}t + \pi)$$

*auch richtig, nicht Bestandteil der Aufgabenstellung:*

$$u_{CEges}(t)=u_{CE}(t)+U_A=U_{CE} \sin(\omega t + \varphi) + U_A = -1,46V \sin(314s^{-1}t) + 6V = 1,46V \sin(314s^{-1}t + \pi) + 6V$$

#### 6.6. Bestimmung der Wechselstromverstärkung *(nicht Bestandteil der Aufgabenstellung)*

$B_{wechsel}=I_C/I_B=9,6mA/100\mu A=96$  für symmetrische Ausgangsspannung

$B_{wechsel}=\Delta I_C/\Delta I_B=19,2mA/200\mu A=96$  für symmetrische- und unsymmetrische Ausgangsspannung

Bei Betrachtung von Abbildung 15 sehen wir, daß die Gleichstromverstärkung nur vom Arbeitspunkt abhängig ist. Die Wechselstromverstärkung dagegen ist zusätzlich noch von der Steilheit der Widerstandsgeraden (Wert von  $R_L$ ) abhängig. Bei steigender Wechselstromverstärkung (Verringerung von  $R_L$ ) verringert sich die Wechselspannungsverstärkung und umgekehrt.

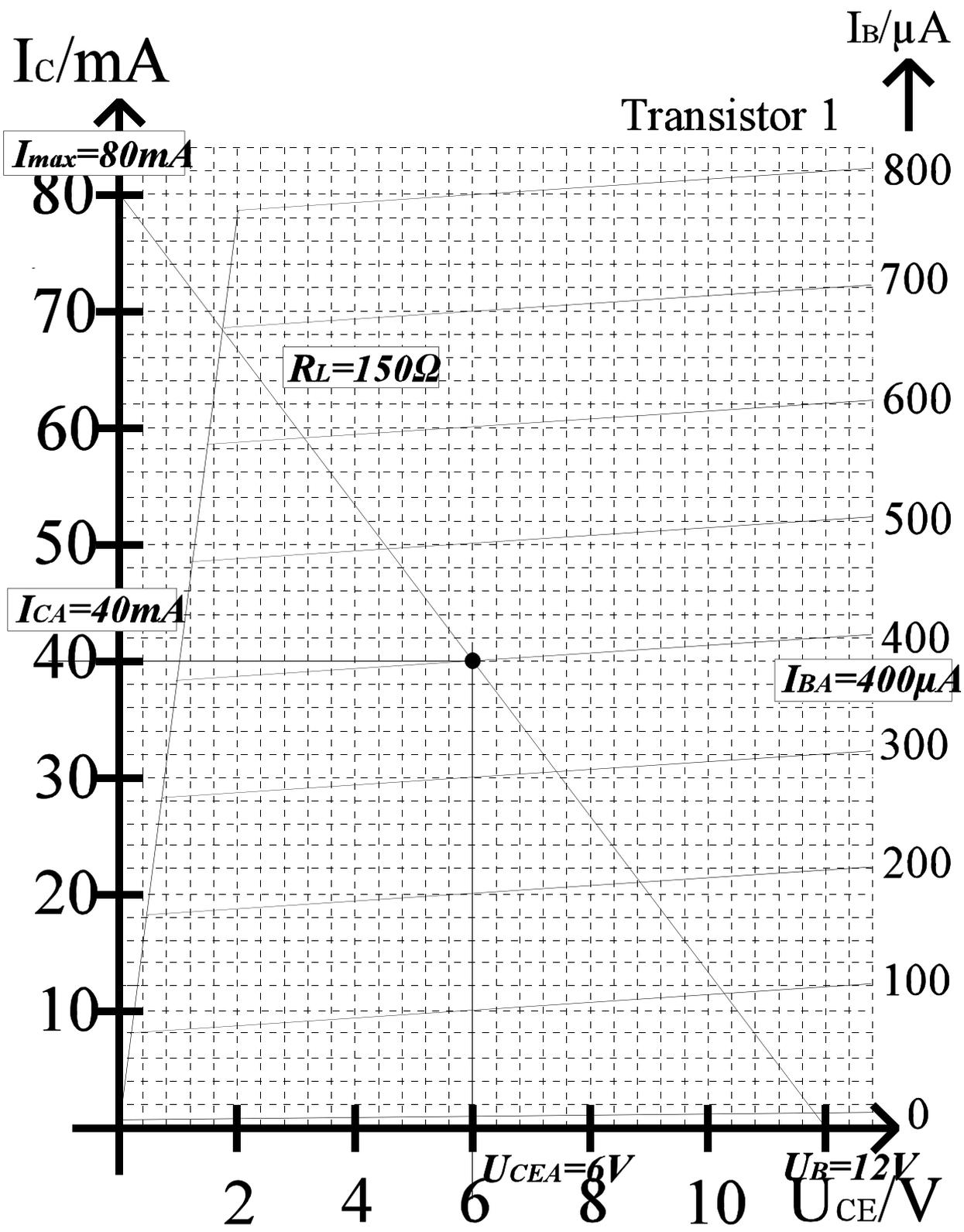


Abb. 14

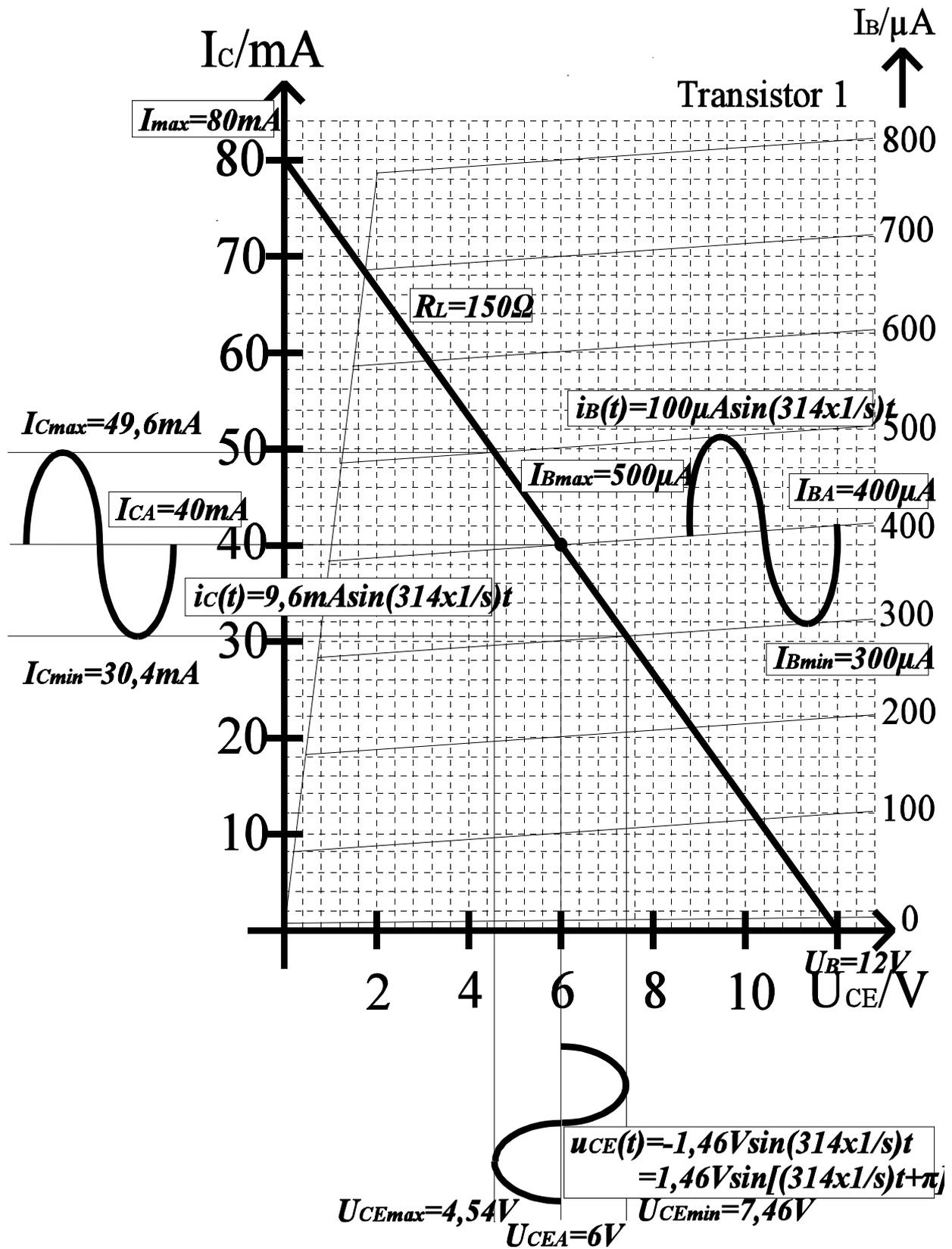


Abb. 15