

1.1.4 HL-Dioden

1.1.4.1 Bändermodell

Das Bändermodell ist ein Hilfsmittel zur Veranschaulichung von Leitungsvorgängen.

Begriffe:

- Term: möglicher energetischer Zustand von Ladungsträgern in einem Atom,
- Band: möglicher energetischer Bereich von Ladungsträgern in einem Festkörper,
- Valenzband: Band gebundener Elektronen, freibewegliche Defektelektronen an der Oberkante des Valenzbandes,
- Leitband: höchstes Energieband, freibewegliche Elektronen an der Unterkante des Leitbandes,
- verbotene Zone: unmöglicher energetischer Bereich des Aufenthaltes von Ladungsträgern, i. d. R. der Bereich zwischen Valenz- und Leitband, $W_G = W_L - W_V$
- Fermienergie: oberste Energiegrenze für den Aufenthalt von Elektronen bei $T = 0K$, bei reinen Halbleitern liegt die Fermienergie im verbotenen Bereich, bei stark gestörten Kristallen kann die Fermienergie in das Valenzband (starke Konzentration von Defektelektronen) oder das Leitband (starke Konzentration von Elektronen) verschoben sein, (entartete Halbleiter), materialabhängige Rechengröße,

1.1.4.2 Halbleiter (Silizium)

1.1.4.2.1 Allgemeine Fakten:

- elementarer Halbleiter mit tetraederförmiger Kristallstruktur
- Schmelzpunkt: 1450°C Siedepunkt: 2630°C Dichte: $2,33 \frac{g}{cm^3}$
- Leitfähigkeit des Halbleiters vom Energieinhalt des Materials abhängig
⇒ Generations- (und Rekombinations)prozesse

Energie	Erklärung	Vorgang
Energiezufuhr		
Energieabgabe		

1.1.4.2.2 Leitungsmechanismen im Halbleiter (Auswahl)

Diffusion: - Ladungsträgerbewegung, a. g. von Konzentrationsausgleich,

Drift: - Ladungsträgerbewegung, a. g. von Feldeinfluss,

Injektion:

.....

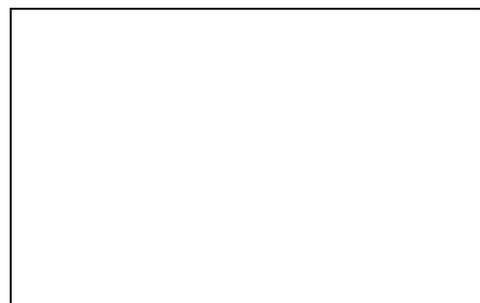
.....

.....

.....

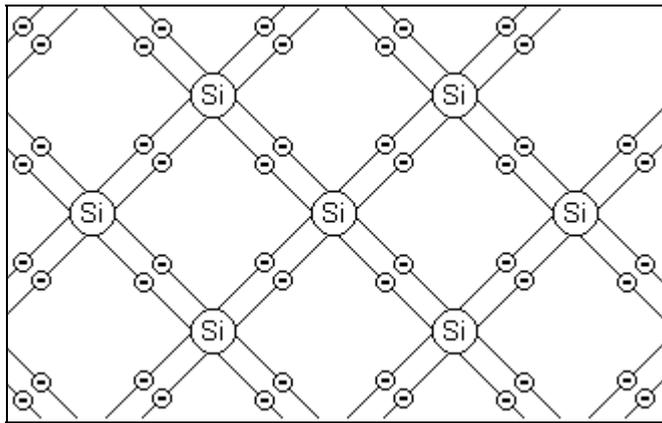
.....

.....



Ladungsträgerinjektion

1.1.4.2.3 Eigenleitung (Intrinsicleitung)



Voraussetzung:
reines Halbleitermaterial,
d. h. eines nahezu idealen Kristall,
bei $T=0K$ keine freien Ladungsträger,
(alle Elektronen in kovalenter Bindung)

Bändermodell:

.....

.....

Temperaturerhöhung: (.....)

.....

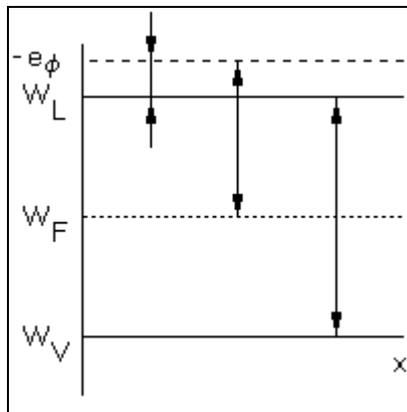
.....

Bändermodell:

.....

.....

Zweidimensionale Struktur eines eigenleitenden HL-Kristalls



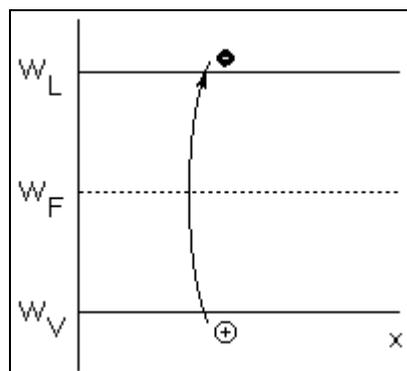
Bändermodell eines homogenen eigenleitenden HL-Kristalls

Ladungsträgerkonzentration a. g. von Eigenleitung:

Material	n_i / cm^{-3}
Germanium	
Silizium	

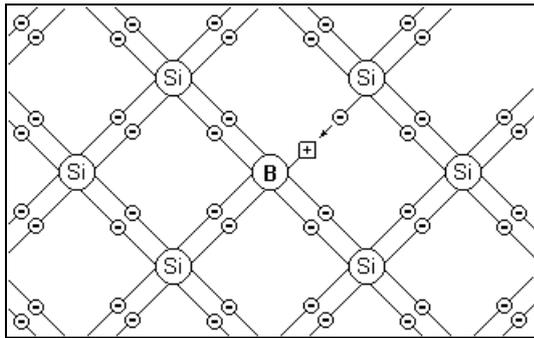
Energiedifferenz der verbotenen Zone

Material	W_G / eV
Germanium	
Silizium	
Gallium-Arsenid	

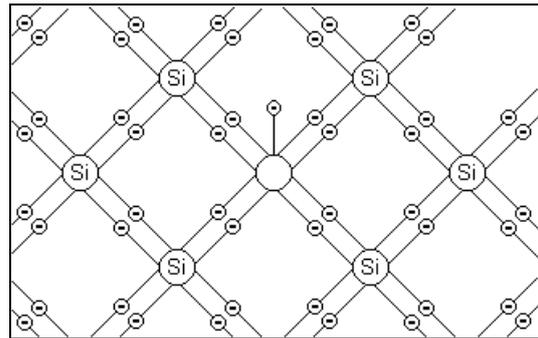


Übergang Valenzband-Leitband

1.1.4.2.4 Störstellenleitung (Donatorleitung)



Zweidimensionale Struktur eines p-leitenden HL-Kristalls



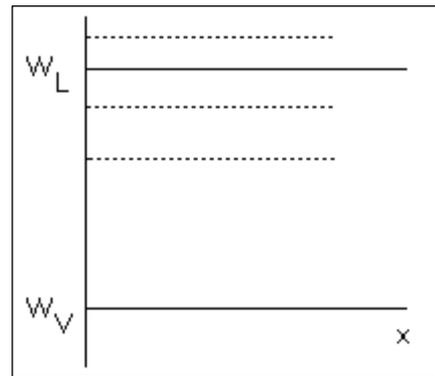
Zweidimensionale Struktur eines n-leitenden HL-Kristalls

Leitungstyp	Material	Dotanden	Wirkung
p-Leitung			- - - -
n-Leitung			- -

Übersicht und Zusammenfassung zur Störstellenleitung

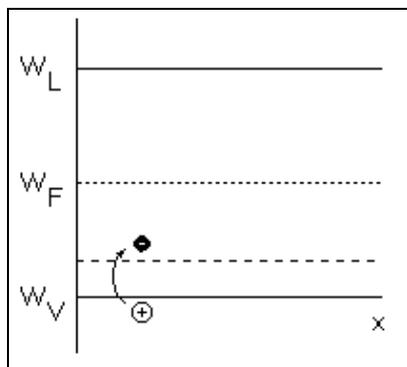


Lage der Akzeptor- und Donatorterme in der verbotenen Zone



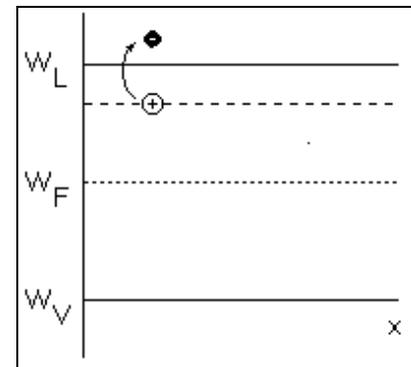
Lage des Fermi-niveaus in Abhängigkeit der Dotierungskonzentration,

-
-



Valenzband-Akzeptorterm

Übergang



Übergang Donatorterm-Leitband

1.1.4.3 Aufbau und Wirkungen am pn-Übergang

1.1.4.3.1 Der stromlose pn-Übergang

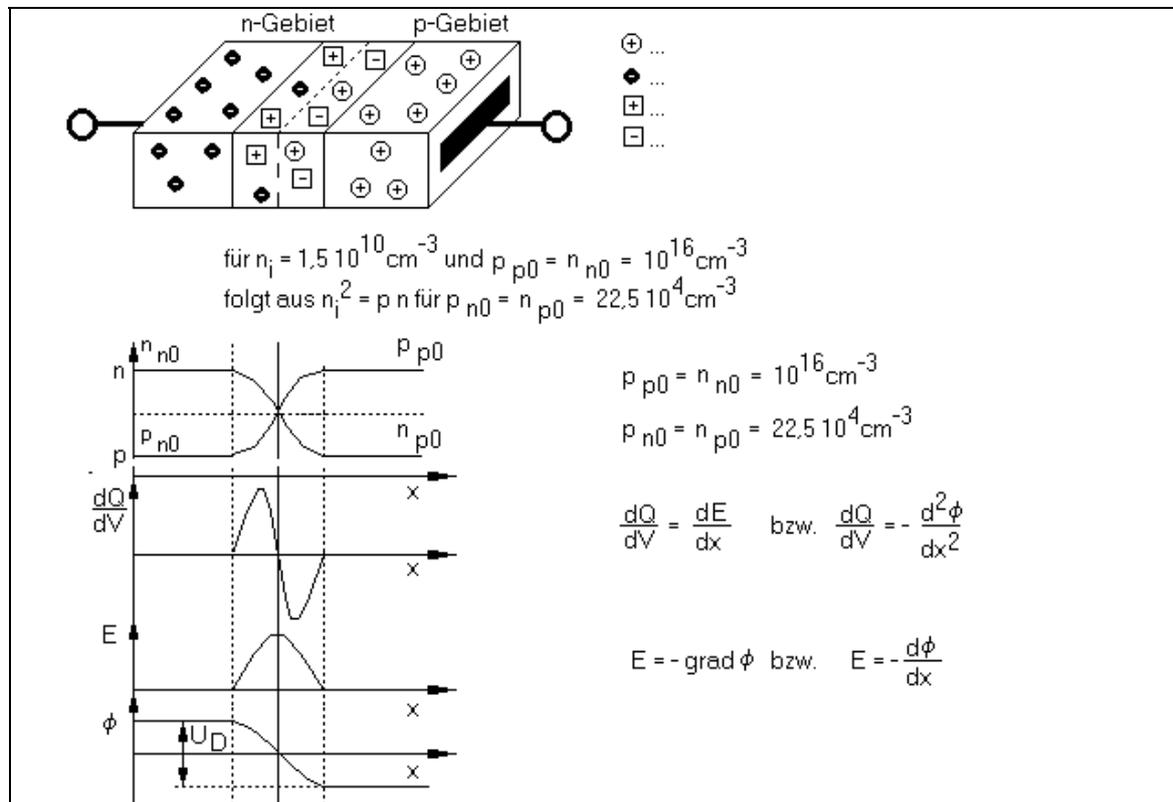
1.1.4.3.1.1 Ausgangspunkt:

- monokristallines Silizium, teils p- teils n-dotiert,
- gleiche Konzentration der Dotanden in p- und n-Gebiet,
- sprunghafte Änderung der Dotierung, (abrupter pn-Übergang)

1.1.4.3.1.2 Übersicht

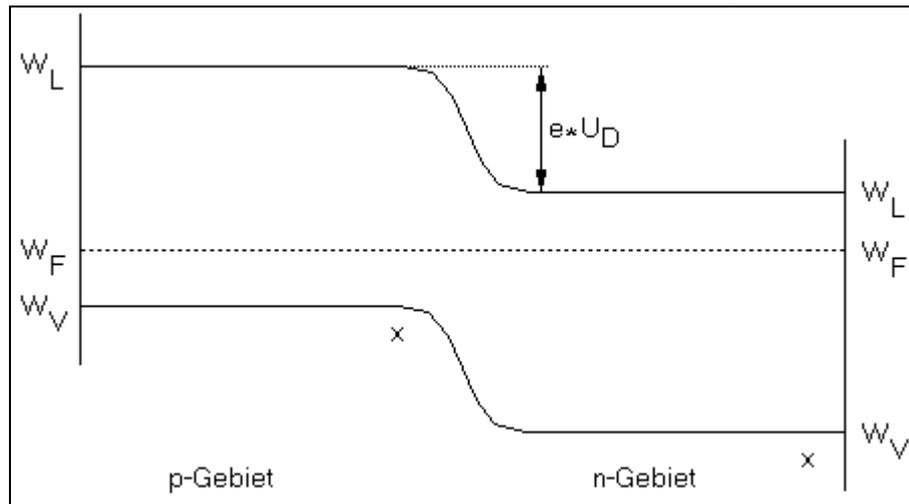
Zeit	n-Gebiet (Kathode)	p-Gebiet (Anode)
V		

1.1.4.3.1.3 Modell des Kristalls



Zusammenhänge am stromlosen pn-Übergang

1.1.4.3.1.4 Bändermodell des stromlosen pn-Überganges



Bändermodell des

stromlosen pn-Überganges

thermodynamisches Gleichgewicht:

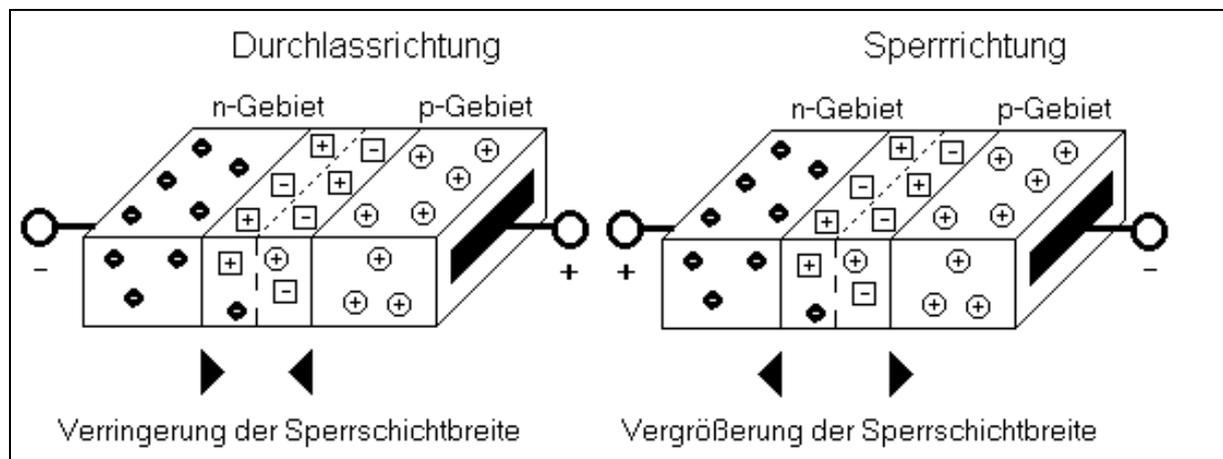
-
-

1.1.4.3.2 Der stromdurchflossene pn-Übergang

1.1.4.3.2.1 Übersicht

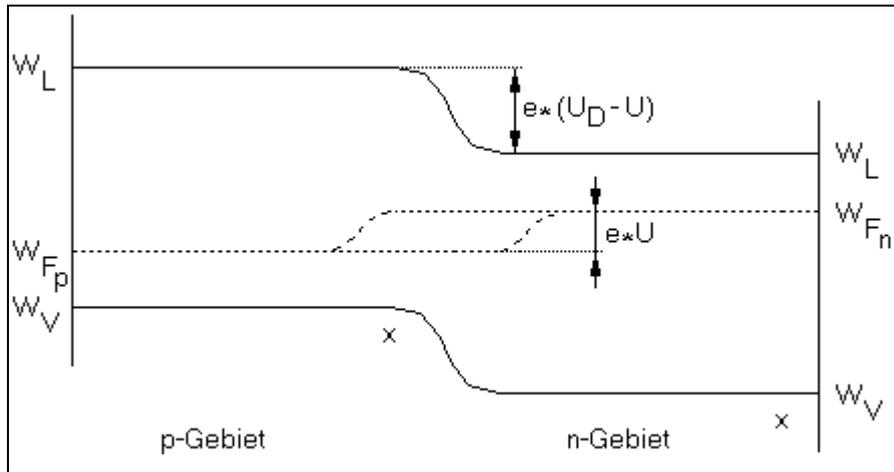
Betriebsart	Durchlassrichtung	Sperrrichtung
Kennzeichen	- -	- -
Vorgänge	- - - -	- - - -
Effekt	-	- -

1.1.4.3.2.2 Modell des Kristalls



Einfluss der Spannung auf die Sperrschichtbreite

1.1.4.3.2.3 Bändermodell des stromdurchflossenen pn-Überganges



Durchlassrichtung:

stromdurchflossenen pn-Überganges in Durchlassrichtung

Bändermodell des

Störung des thermodynamischen Gleichgewichts durch Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung

-
-
-
-
-
-

Die Darstellungen am Rand der Raumladungszone lassen sich wie folgt deuten:

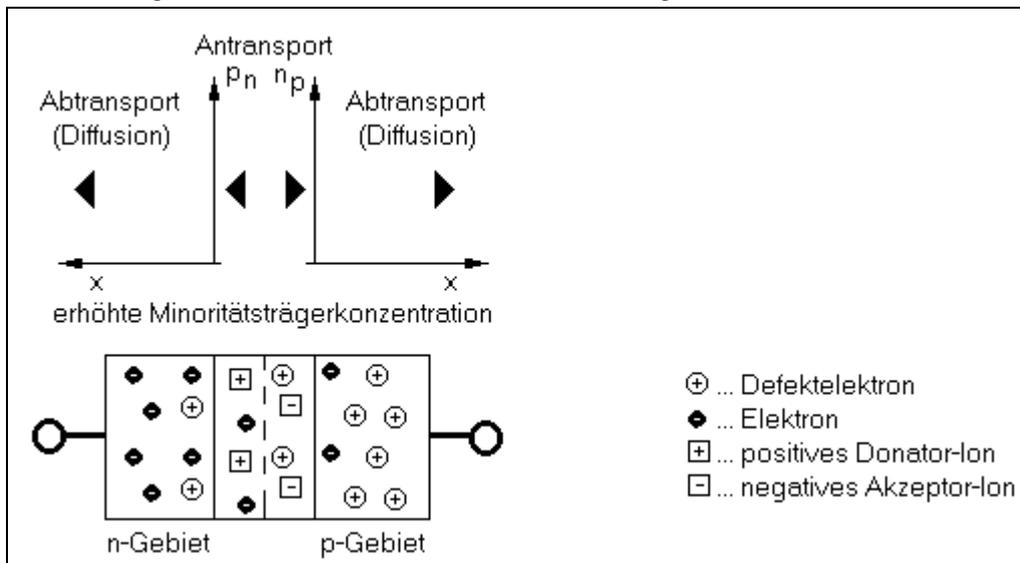
1. Löcherdiffusionsstrom im n-Gebiet:

.....

2. Elektronendifusionsstrom im p-Gebiet:

.....

Minoritätsträgerkonzentration am Rand der Raumladungszone



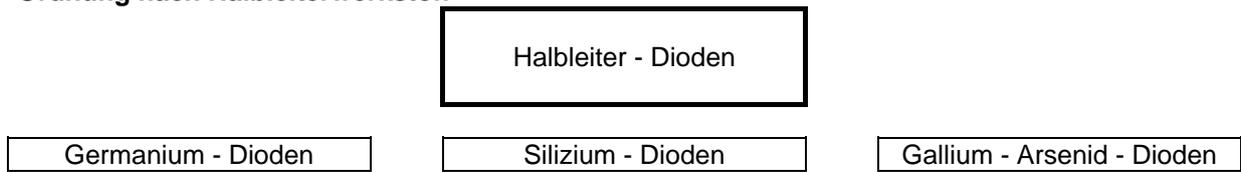
Minoritätsträgerrandkonzentration

Die Konzentration der Minoritätsträger ist eine Funktion der angelegten Durchlassspannung. Dabei gilt im wesentlichen: $n \sim U_{pn}$

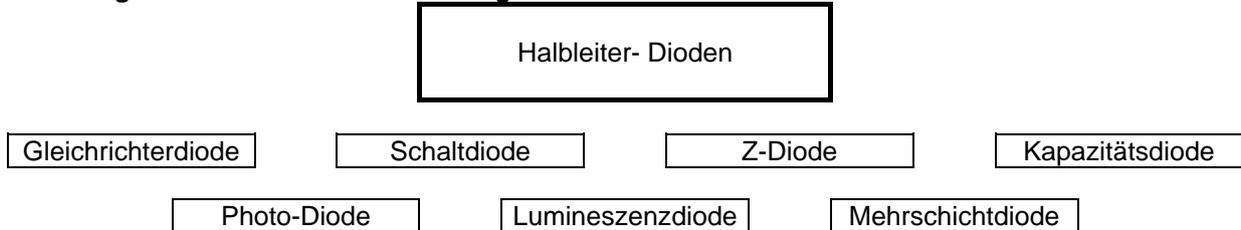
Hinweis: Beachten Sie die hohen Ladungsträgerkonzentrationen i. Z. mit dem Umschalten!

1.1.4.4 Übersicht zu HL-Dioden

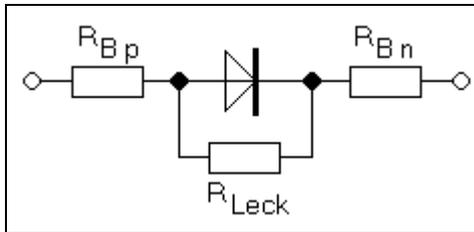
Ordnung nach Halbleiterwerkstoff



Ordnung nach Effekt bzw. Anwendung



1.1.4.5 Gleichstromersatzschaltbild

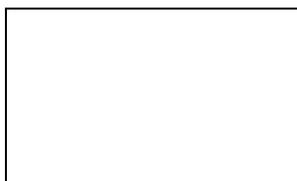


R_{Bp}, R_{Bn}
 R_{Leck}

1.1.4.6 Wechselstromersatzschaltbild

1.1.4.7 Strom-Spannungsbeziehung an Si - HL-Dioden

1.1.4.7.1 Strom-Spannungsbeziehung des pn-Überganges



- I ... Diodenstrom
- U ... Spannung über dem pn-Übergang
- I_s ... Sperrstrom
- U_T ... Temperaturspannung
- n ... Material- Dotierungskoeffizient : bei Si: $n \approx 1,75$

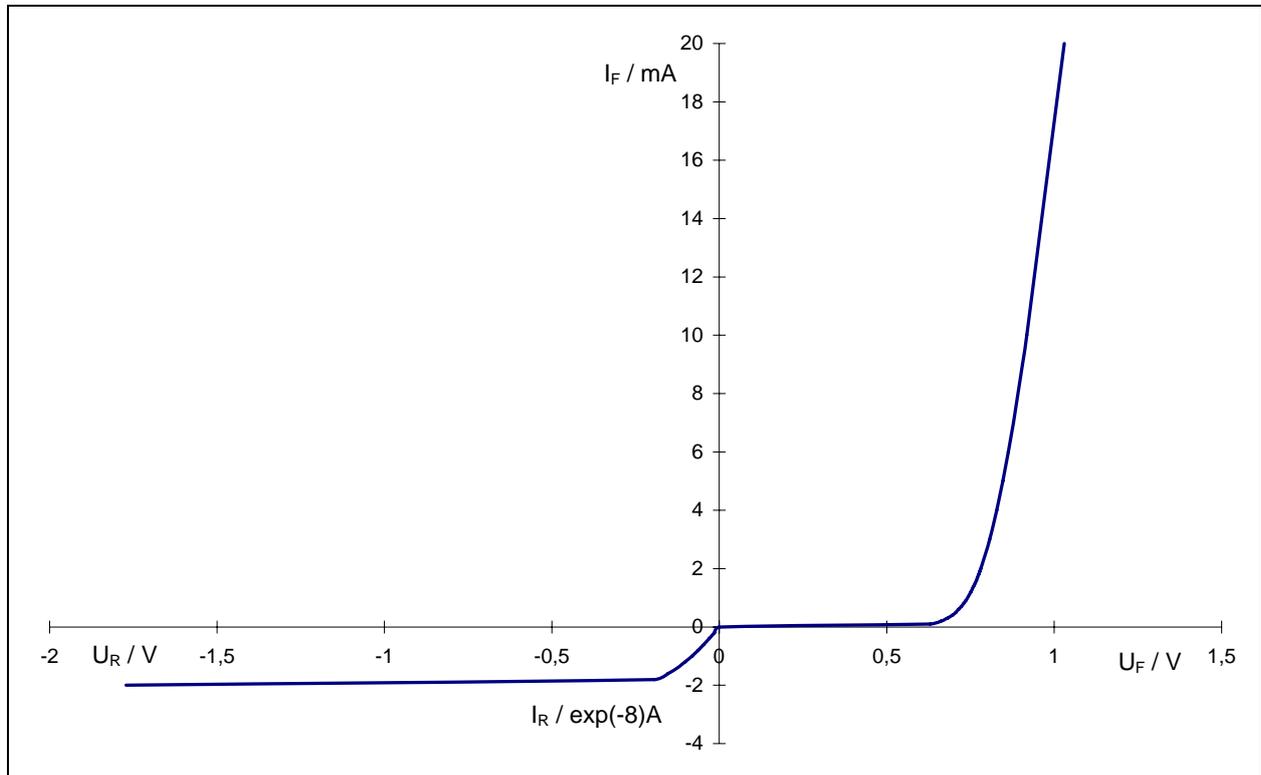
Temperaturspannung

1.1.4.7.2 Strom- Spannungsbeziehung von HL-Dioden

Neben den Eigenschaften des pn-Überganges müssen die Widerstandskomponenten in der HL-Diode berücksichtigt werden. Je nach der Betriebsart determinieren andere Widerstandskomponenten das Verhalten. Die Zusammenhänge lassen sich im Gleichstromersatzschaltbild ablesen, anhand dessen die weiteren Betrachtungen angestellt werden

Betriebsart	Durchlassrichtung	Sperrrichtung
bestimmende Komponente		

1.1.4.8 Kennlinie einer Siliziumdiode



U_F

U_S

U_R

U_{Br}

I_F

I_R

Frage:

Wie werden die genannten Kennwerte U_S und I_S aus der I/U - Kennlinie ermittelt?

Tragen Sie die Kennwerte in die Kennlinie ein!

1.1.4.9 Temperaturabhängigkeit

$$I_S = I_{S0} e^{\frac{TK_D \Delta \theta}{T_0}} \quad I_{S0} \quad \dots$$

1.1.4.10 Kennlinie einer Silizium-Diode unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit

Physikalische Analyse des Temperaturverhaltens

- Zustandsanalyse bei Raumtemperatur
- Betrachtung der Änderungen bei Temperaturerhöhung

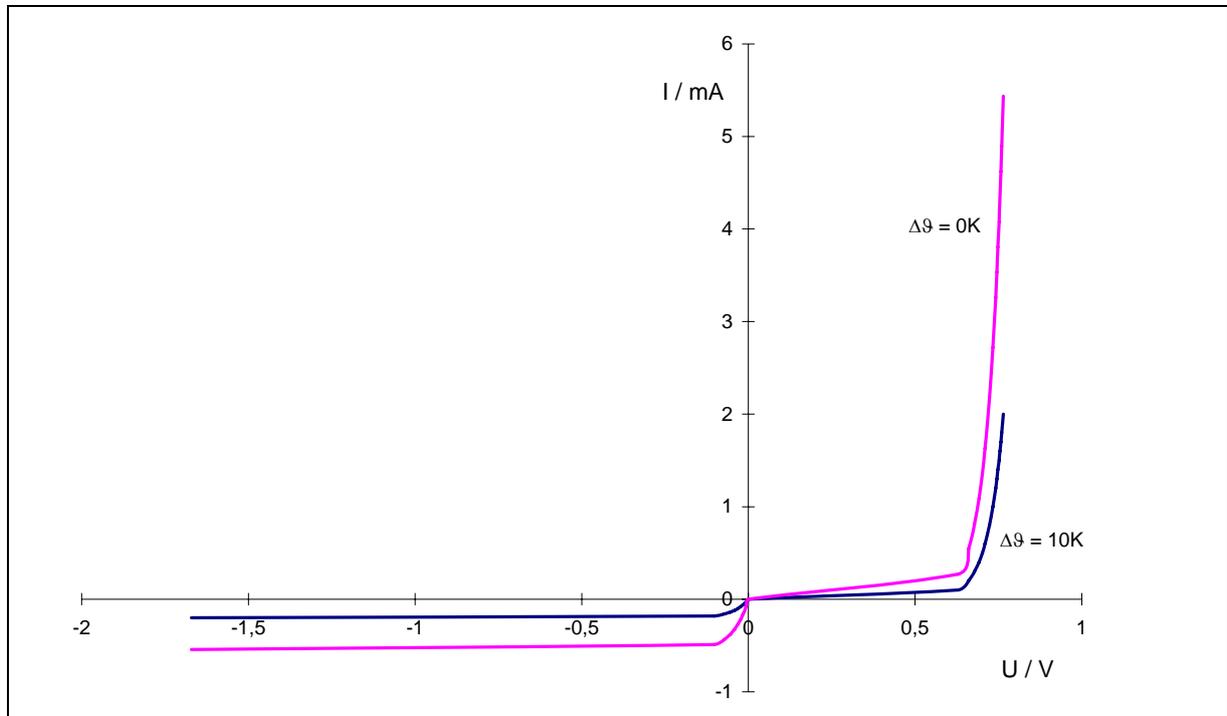
Störstellenerschöpfung:

- (fast) alle Störstellen (Dotanden) sind ionisiert,
- trotz Energiezufuhr kaum Zunahme der thermische Generation (Majoritätsträger)

Ursachen für thermische Abhängigkeiten

1. Änderung der Temperaturspannung

2. Änderung der Konzentration von Minoritätsträgern



Veränderung der U/I-Kennlinie bei einer Temperaturerhöhung um 10K

Aufgabe:

Diskutieren Sie die Einflüsse der Temperatur anhand der Kennliniengleichung!

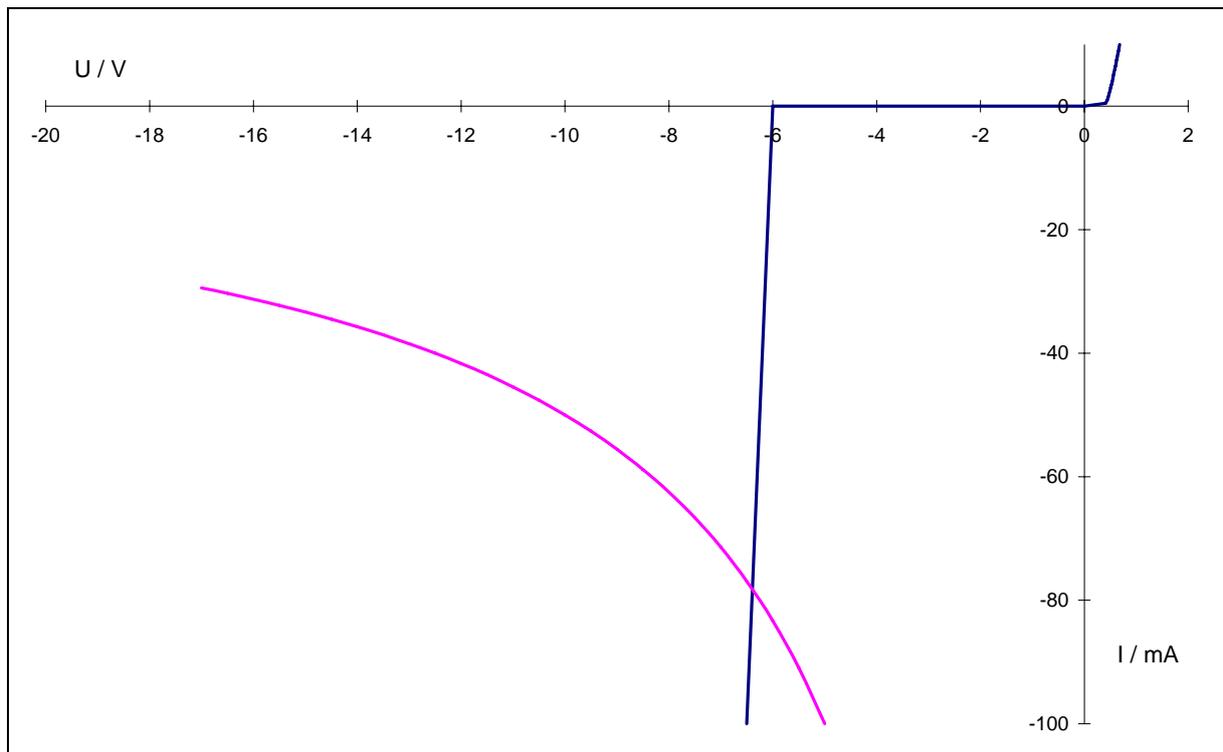
1.1.4.11 Z-Diode

Physikalische Grundlagen

- Zener - Effekt (Feldeffekt, eigentlich Tunneleffekt)

- Lawineneffekt

Strom- Spannungs- Kennlinie einer Z – Diode



Kennlinie einer Z-Diode (Darstellung des Sperrbereich dominiert)

Arbeitsbereich: III.-Quadrant,

- begrenzt durch Verlustleistungshyperbel und hochohmigen Kennlinienast,

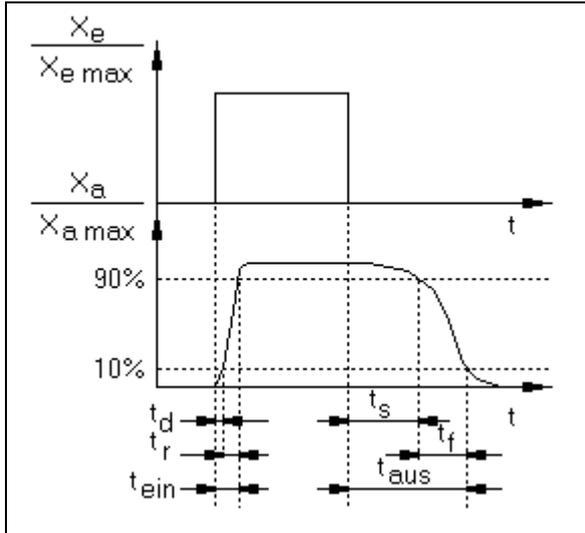
Frage:

Wie kann der inhärente differentielle Widerstand r_{Zj} der Z - Diode im Arbeitsbereich ermittelt werden?

Wie groß ist der differentielle Widerstand r_{Zj} oberhalb der Z-Spannung?

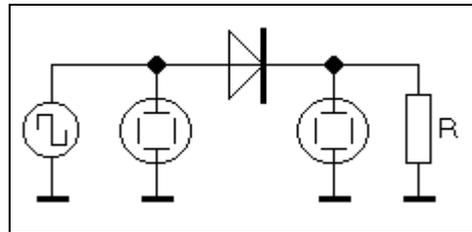
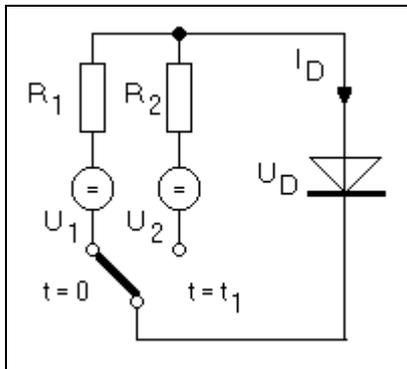
1.1.4.12 Dynamisches Verhalten von Halbleiterdioden

Schaltzeiten:



Schaltzeiten

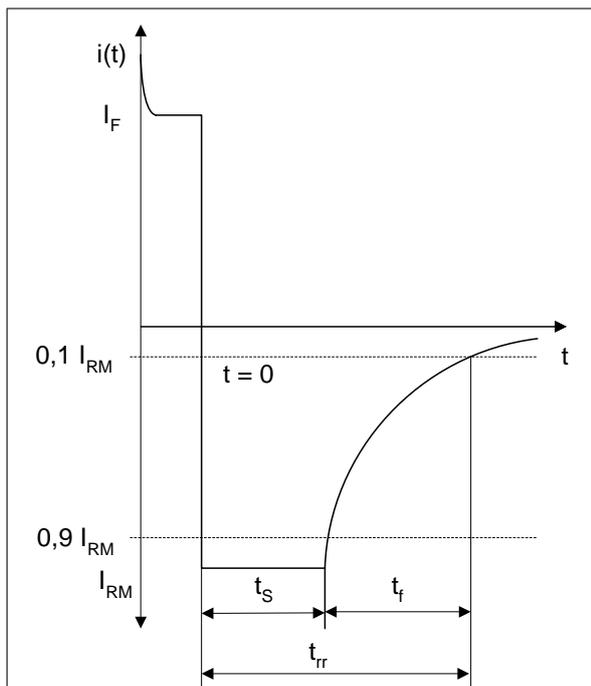
Allgemeine Definition der Schaltzeiten



Oszilloskopische Analyse der Umschaltvorgänge

Eingangsgröße:
Ausgangsgröße:

Schaltung zur Ermittlung der Schaltzeiten



Zweiphasiger Ablauf des Sperrvorganges

1. Phase:

.....

.....

.....

.....

2. Phase:

.....

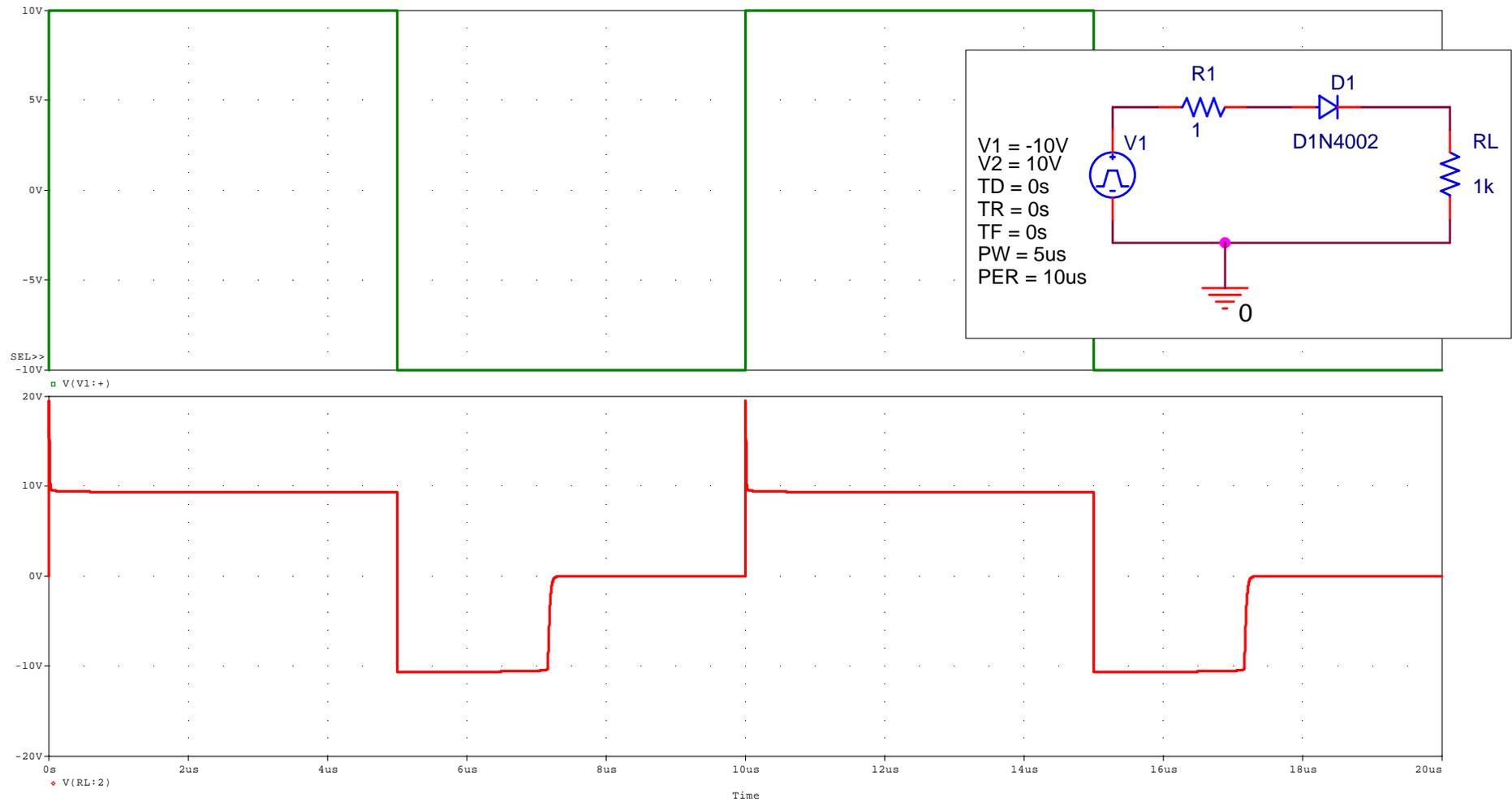
.....

.....

.....

Schematische Darstellung des Umschaltvorganges an HL-Dioden

Simulation eines Schaltvorgangs unter Verwendung von „PSPice“

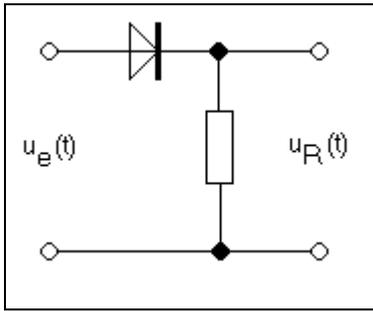


Zeitfunktionen der Eingangs- und Ausgangsspannung

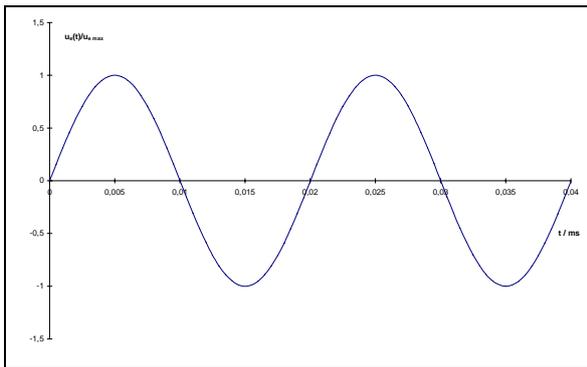
Aufgaben:
 Bestimmen Sie die Schaltfrequenz und die näherungsweise die Ausschaltzeit!
 Erläutern Sie die Ursachen für das Ausschaltverhalten!

1.1.4.13 Anwendungen

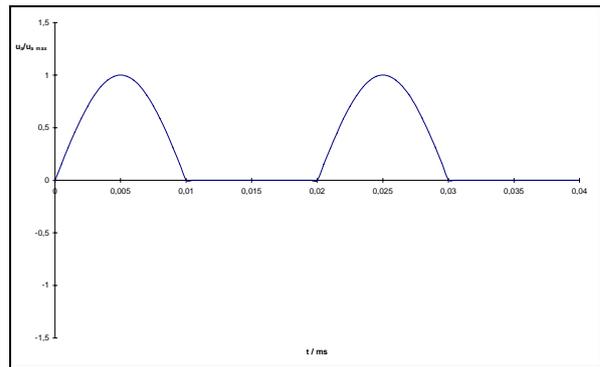
1.1.4.13.1 Einweggleichrichtung



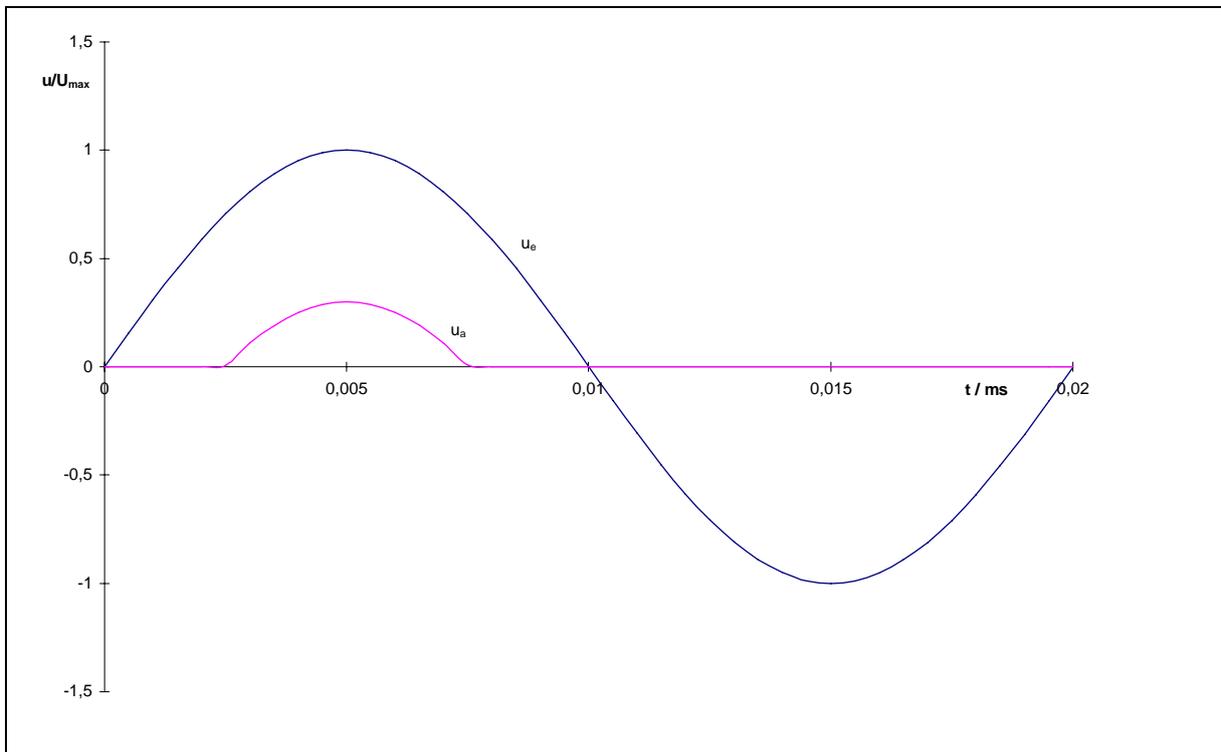
Schaltung Einweggleichrichter



Verlauf der Eingangsspannung



Verlauf der Ausgangsspannung

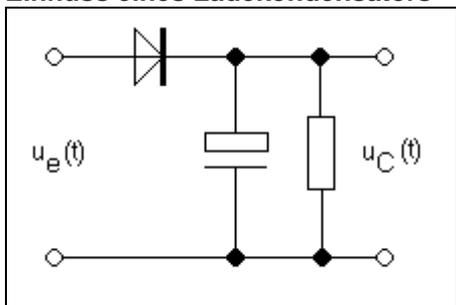


Spannungsverlauf am Einweggleichrichter ohne Ladekondensator (detaillierte Darstellung)

Ermitteln Sie aus dem vorgestellten Diagramm:

- die Schleusenspannung,
- die maximale Flussspannung.

Einfluss eines Ladekondensators



Wirkungsweise:

-
 -

Frage:

Für welchen Grenzfall ist $u_C = \hat{u}_e$?

Anwendung:

.....

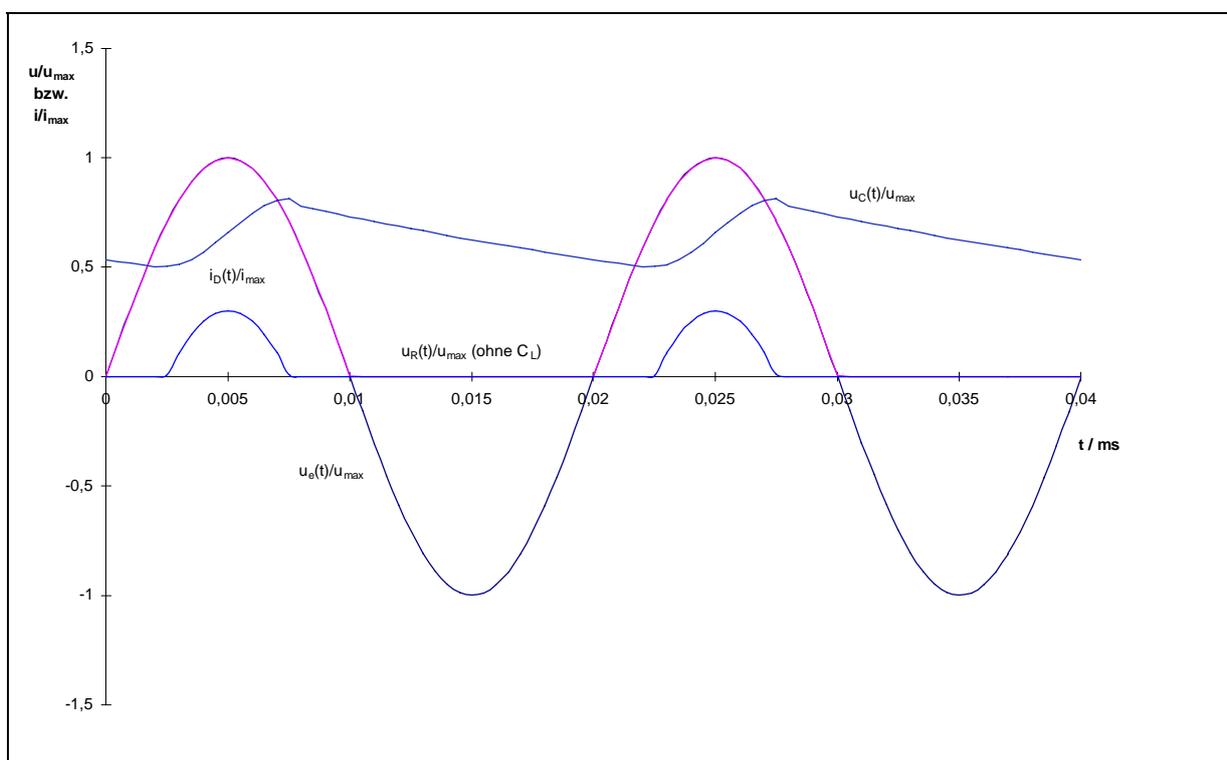
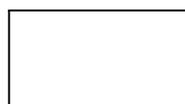
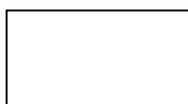
Einweggleichrichtung mit Ladekondensator

Ansatz zur Beschreibung der Spannungs- bzw. Strom-Zeit-Funktion am Einweggleichrichter

$$i_D = i_R + i_C$$

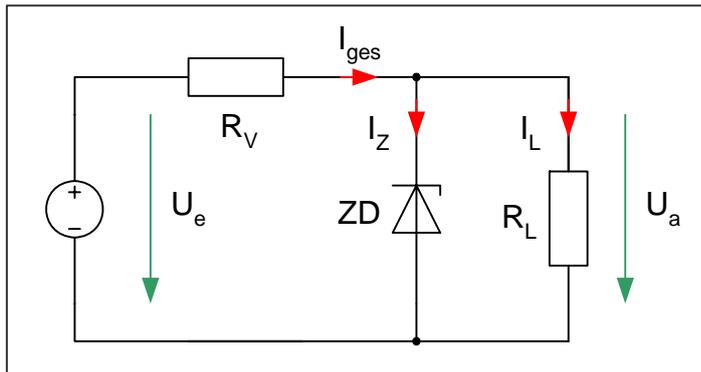
für Aufladung:

für Entladung:



Spannungs- und Stromverläufe am Einweggleichrichter mit Ladekondensator als Funktion der Zeit

1.1.4.13.2 Schaltungen zur Spannungsstabilisierung



Dimensionierung: (worst case)

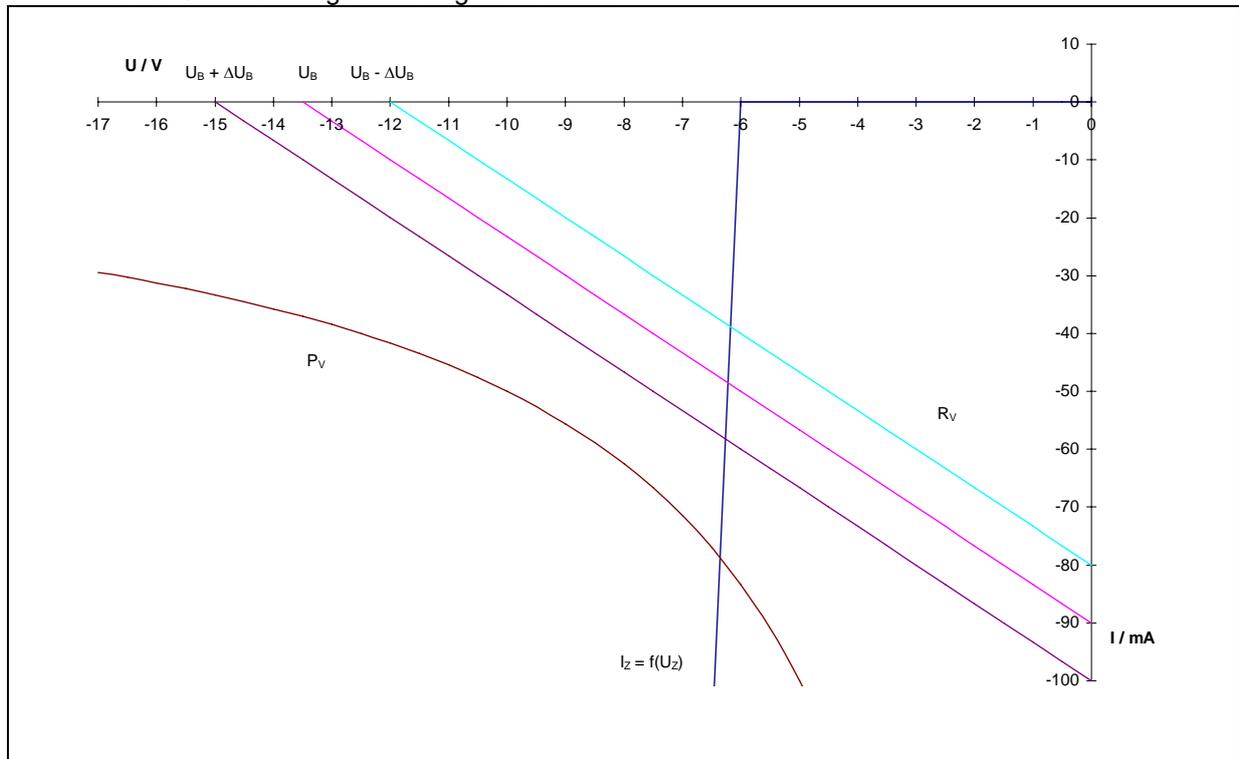
Z-Dioden - Stabilisierung

Ansatz zur Dimensionierung:
Maschensatz

Knotenpunktsatz

$$R_V = \frac{U_e - U_a}{I_Z + I_L}$$

Kennlinie der Stabilisierungsschaltung mit Z-Diode



Kennlinien Z-Diodenstabilisierung

Berechnen Sie aus der o. g. Kennlinie!

- die Größe des Vorwiderstandes
- $I_Z \text{ max}$
- die zulässigen Widerstände $R_L \text{ min}$, $R_L \text{ max}$,

Dimensionierung einer Stabilisierungsschaltung mit Z-Diode

geg.: Randbedingungen:

Schaltung,

$$U_e = 24V \pm 10\%$$

$$R_{\min} = 2 \text{ k}\Omega, R_{\max} = \text{Leerlauf},$$

Z-Diode:

$$U_Z = 12V, r_Z = 5\Omega, P_V = 0,5W$$

$$TK_D = 6 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}, R_{thJA} = 300 \frac{K}{W}$$

ges.: R_V , Glättungsfaktor G , S

Dimensionierung:

$$R_{V \max} = \frac{U_{e \min} - U_Z}{I_{L \max} + I_{Z \min}}$$

$$R_{V \min} = \frac{U_{e \max} - U_Z}{I_{L \min} + I_{Z \max}}$$

$$R_V = \quad \Omega \text{ (gewählt nach E12-Reihe)}$$

Kenngrößen von Stabilisierungsschaltungen

Glättungsfaktor

Im Glättungsfaktor werden ausschließlich die Spannungsänderungen a. g. der Oberschwingungen der Restwechselspannung ($f \geq 100\text{Hz}$) berücksichtigt.

- Beachte:
- Restwechselspannung nicht sinusförmig,
 - Frequenz so hoch, dass keine Änderung der Sperrschichttemperatur auftritt,
 - Mittelwert von $I_Z = \text{const.}$

Gleichung zur empirischen Bestimmung des Glättungsfaktors

Stabilisierungsfaktor

Im Stabilisierungsfaktor werden auch die Spannungsänderungen im Langzeitbereich berücksichtigt.

- Beachte:
- quasistatisches Verhalten der Spannung (Änderungen über einen größeren Zeitraum),
 - Änderungen von I_Z ,
 - Änderungen der Sperrschichttemperatur,
 - Berücksichtigung des thermischen differentiellen Widerstandes,

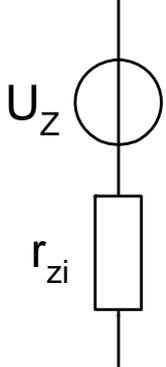
Gleichung zur empirischen Bestimmung des Stabilisierungsfaktors

Modellierung von Kenngrößen

Beispiel: Glättungsfaktor

Schlagworte:

Ersatzschaltbild, Kenngröße, Spannungsteiler, Eigenschaften von Quellen, Ersatzwiderstand,

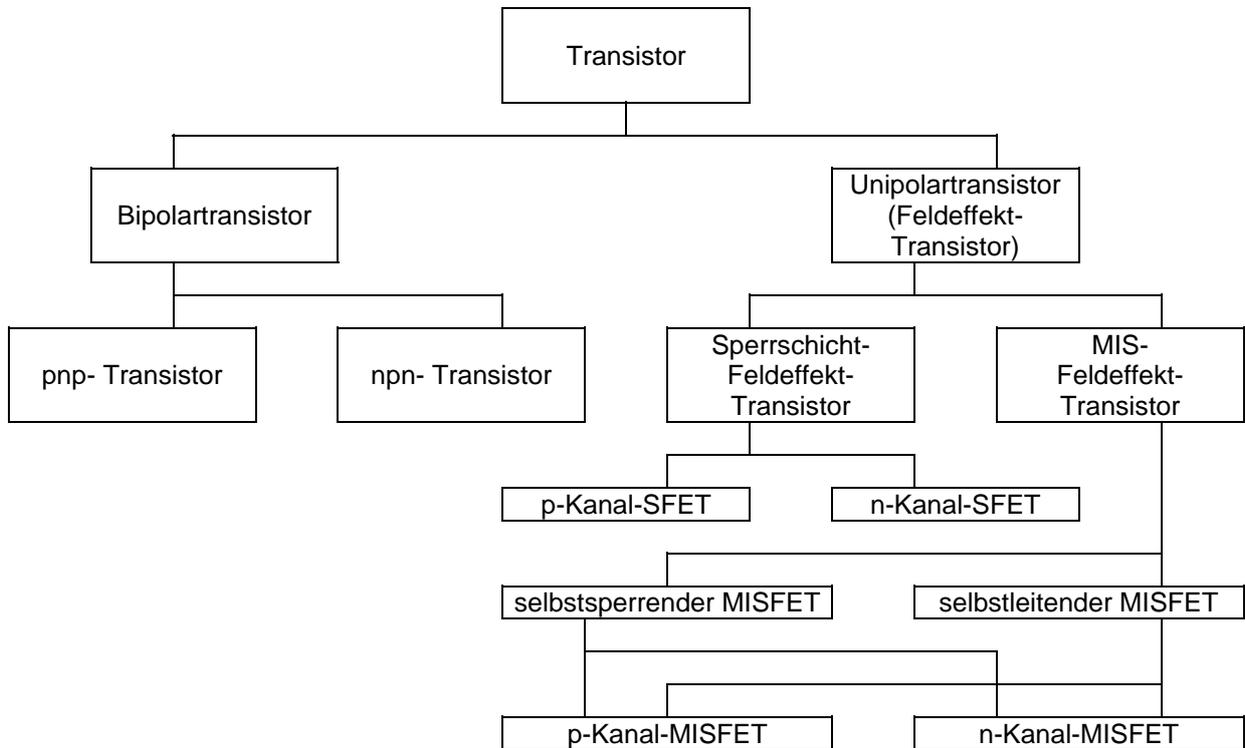
Ersatzschaltbild der Z-Diode	Kennlinienkonstruktion
 <p>Das Ersatzschaltbild einer Zenerdiode besteht aus einer idealen Zenerdiode (Kreis) in Reihe mit einem Widerstand (Rechteck). Die Zenerdiode ist mit U_Z beschriftet und der Widerstand mit r_{zi}.</p>	<p>Legende zu den Kennlinien</p> <ul style="list-style-type: none">1 ... Widerstand2 ... ideale Spannungsquelle3 ... Z – Diode (resultierende Kennlinie)

Ansatz:

1.2 Aktive Bauelemente

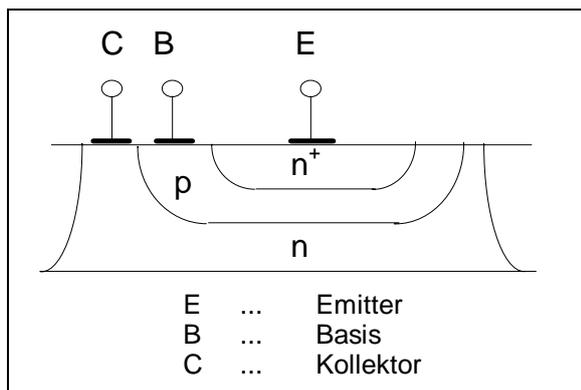
1.2.4 Transistoren

1.2.4.1 Übersicht



1.2.4.2 Bipolartransistor

1.2.4.2.1 Aufbau und Funktion des Bipolartransistors



Lateralschnitt eines Transistors

nichtmaßstäbliche Darstellung der Struktur

- Basisweite w_B klein
gegenüber mittlerer freier Weglänge s_B

mittlere freie Weglänge s_B :

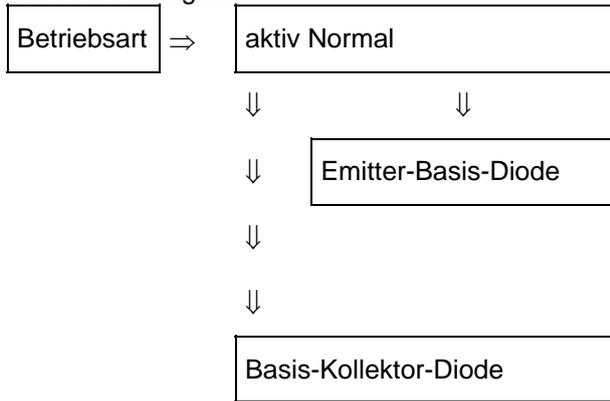
Der mittlere Weg, den ein Ladungsträger innerhalb Generation - Rekombination zurücklegt.

Für Si-NF-Transistor gilt:

$1\mu\text{m} < w_B < 10\mu\text{m}$ und $s_B \approx n\ 100\mu\text{m}$

Verstärkerwirkung

Voraussetzungen:



"hochohmiger" Widerstand

Wirkungskette:

Die Tatsache, dass geringe Änderungen der Basis-Emitter-Spannung große Änderungen des Kollektorstromes und damit große Änderungen des Spannungsabfalles am Kollektorwiderstand R_C verursachen, ist als interpretierbar!

1.2.4.2.2 Kennwerte

1.2.4.2.2.1 Gleichstromkennwerte

maximaler Kollektorstrom:

$I_C \text{ max}$

maximale Kollektorspannung:

$U_{CE \text{ max}}$

Verlustleistung:

$P_V = U_{CE} I_C$

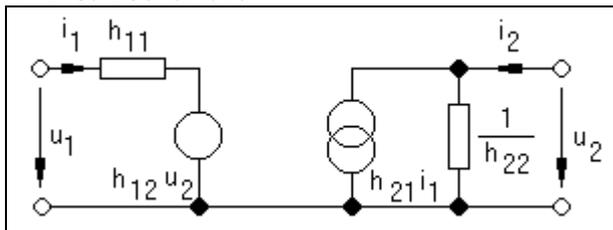
Stromverstärkung in der Betriebsart „aktiv normal“:

$B_N = \frac{I_C}{I_B}$

1.2.4.2.2.2 Wechselstromkennwerte

Transistor - Modell

h - Ersatzschaltbild



- u_1 ... Eingangsspannung
- i_1 ... Eingangsstrom
- u_2 ... Ausgangsspannung
- i_2 ... Ausgangsstrom

Die Bezugspfeile im h-ESB sind i. d. R. in symmetrischer Form definiert.

h-Parameter

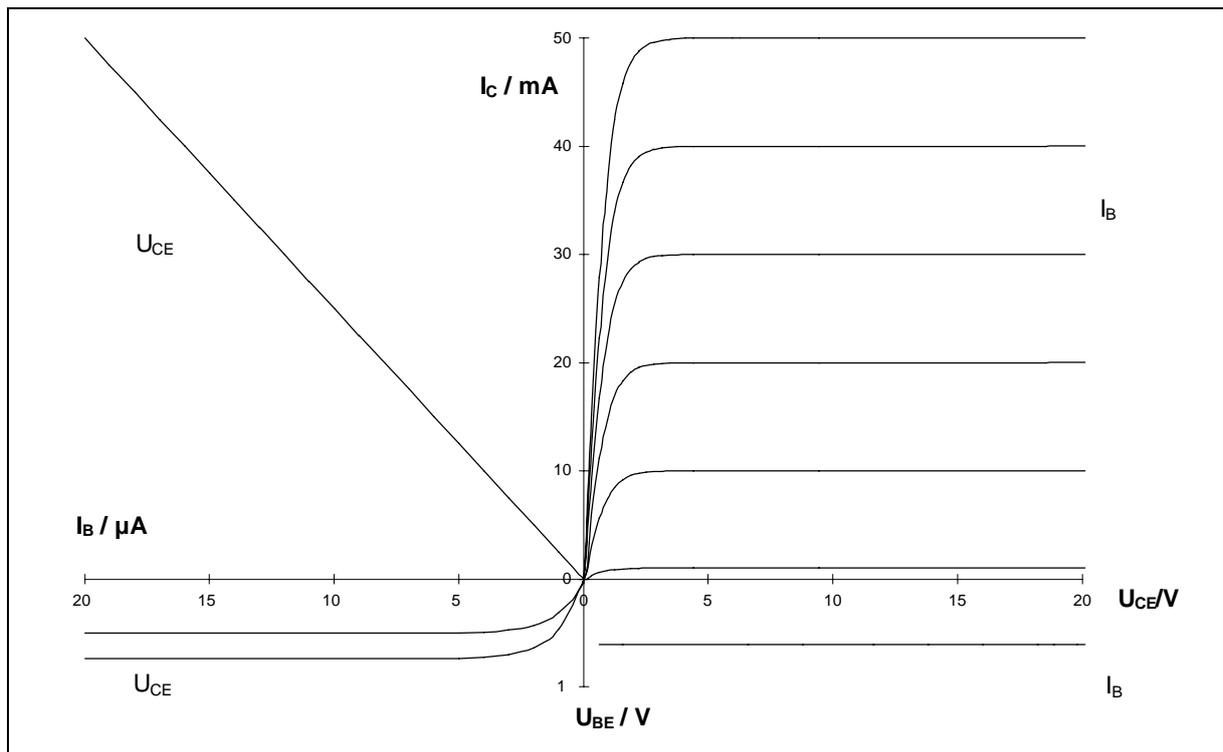
- h_{11} ... (für $u_2 = 0$,
- h_{12} ... (für $i_1 = 0$,
- h_{21} ... (für $u_2 = 0$,
- h_{22} ... (für $i_1 = 0$,

Vierpolgleichungen:

Matrixform	expliziert
$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$	

1.2.4.2.3 Kennliniengleichungen

1.2.4.2.4 Kennlinienfeld



Vierquadrantenkennlinienfeld eines Bipolartransistors

Beispiel: Vervollständigen Sie das Kennlinienfeld und führen Sie folgende Auswertung durch!

- Eintragen der Widerstandsgerade für R_C bei $U_B = 20V$ und $I_K = 40mA$!
- Eintragen des qualitativen Verlaufes der Kennlinien für $U_{CB} = 0V$ und $I_B = 0$!
- Berechnen des Wertes für R_C !

Betriebsarten deren Kennzeichen

	Basis-Emitter-Diode	Basis-Kollektor-Diode
aktiv normaler Betrieb		
Übersteuerungsbereich		
Sperrbereich		
inverser Betrieb		

Übung:

Kennzeichnen Sie die Betriebsbereiche im Ausgangskennlinienfeld!

1.2.4.2.5 Kennlinienaufnahme

1.2.4.2.5.1 Eingangskennlinie

1.2.4.2.5.2 Ausgangskennlinie

1.2.4.2.6 Konstruktion der Übertragungs- und Rückwirkungskennlinie

1.2.4.2.7 Arbeitspunkte und h-Parameter im Kennlinienfeld

1.2.4.2.8 Aussteuerung im Kennlinienfeld

1.2.4.2.9 Transistor als Verstärker

1.2.4.2.9.1 Eintaktverstärkerstufe (A-Betrieb) in Emitterschaltung

1.2.4.2.9.1.1 Allgemeines

A-Betrieb

.....

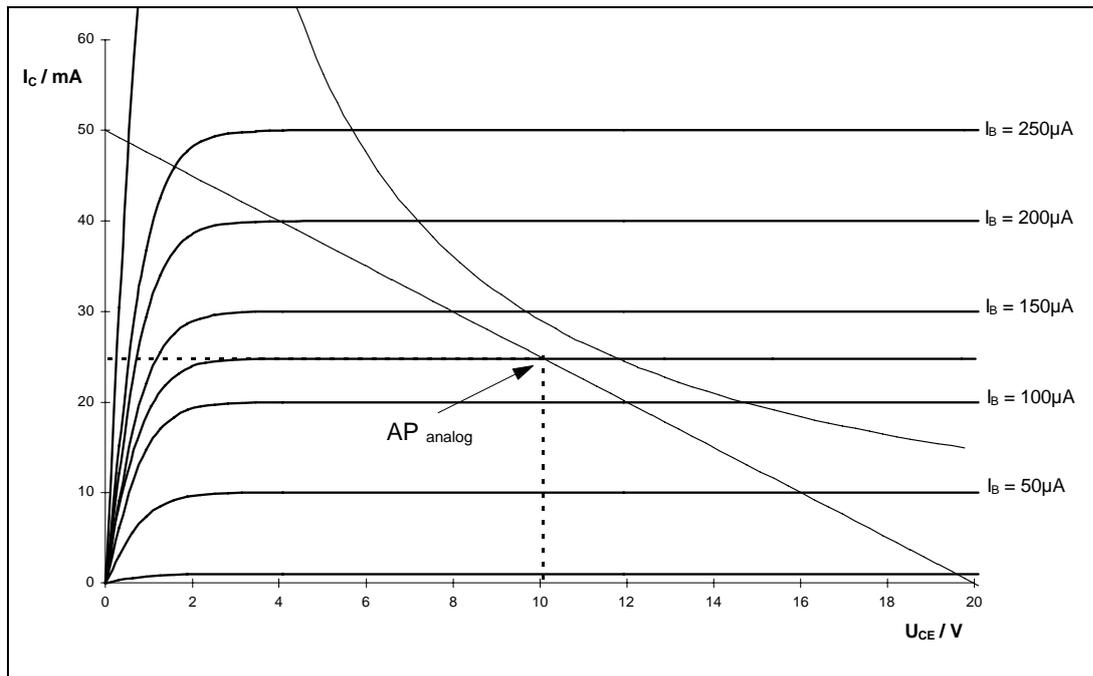
.....

.....

Frage: Wo befindet sich der Arbeitspunkt im Ausgangskennlinienfeld bei Analoganwendungen?
Welche Randbedingung für die Dimensionierung lässt sich daraus ableiten?

Antwort:

.....



Ausgangskennlinienfeld mit Arbeitspunkt

Emitterschaltung

.....

.....

1.2.4.2.9.1.2 Statische Dimensionierung

Die statische Dimensionierung umfasst die Einstellung des Arbeitspunktes.

Algorithmus:

-
-
-
-

1.2.4.2.9.1.3 Dynamische Dimensionierung

Die dynamische Dimensionierung beinhaltet u. a. die Einstellung des zu übertragenden Frequenzbereiches. Durch die passiven Bauelemente in der Schaltung, die Eigenschaften des Transistors und das Layout der Platine wird der zu übertragende Frequenzbereich determiniert. Es wird untere und eine obere Grenzfrequenz realisiert.

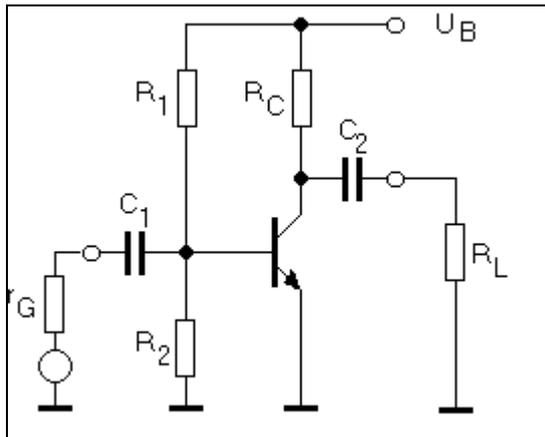
Bei der Grenzfrequenz gilt für RC-Glieder 1. Ordnung unabhängig vom Frequenzverhalten:



Algorithmus für die dynamische Dimensionierung:

- Aufstellen des Wechselstrom-Ersatzschaltbildes (WESB),
 -
 -
 -
 -
- Bestimmung der Ersatzkomponenten (Ersatzwiderstände) aus den beteiligten Bauelementen,
 -
 -
 -
 -
 -

1.2.4.2.9.2 A-Verstärkerstufe in Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler



Bauelemente der Schaltung:

- R1
- R2
- RC
- C1
- C2

Komponenten außerhalb der Schaltung:

- r_G
- R_L

Verstärkerstufe mit Basisspannungsteiler

1.2.4.2.9.2.1 Statische Dimensionierung

Maschensatz:

Knotenpunktsatz:

Ableitung:

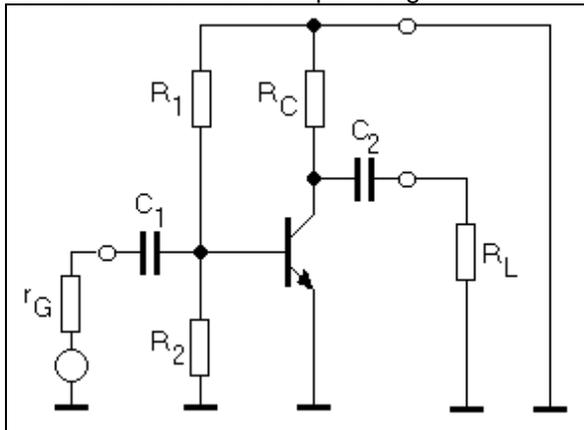
Dimensionierung von R_1 :

Dimensionierung von R_2 :

Dimensionierung von R_C :

1.2.4.2.9.2.2 Dynamische Dimensionierung

Veranschaulichung zur dynamischen Dimensionierung der Schaltung mit Basisspannungsteiler:
 Kurzschluss der Betriebsspannung:



Ersetzen des Transistorsymbols durch das h-ESB:

WESB der Schaltung

Behandlung der Spannungs- und Stromquellen als ideal:

Bestimmung der Ersatzkomponenten aus den beteiligten Bauelementen:

Einkoppelkondensator

Auskoppelkondensator

(parasitäre) Lastkapazität

$$R_{\text{ers } 1} = (R_1 \parallel R_2 \parallel h_{11}) + r_G$$

$$R_{\text{ers } 2} = \left(\frac{1}{h_{22}} \parallel R_C \right) + R_L$$

$$R_{\text{ers } L} = \frac{1}{h_{22}} \parallel R_C \parallel R_L$$

Frequenzverhalten identifizieren (HP oder TP):

Übertragungsglied aus: Einkoppelkondensator und Ersatzwiderstand	Übertragungsglied aus: Auskoppelkondensator und Ersatzwiderstand	Übertragungsglied aus: (parasitärer) Lastkapazität und Ersatzwiderstand
relevante Grenzfrequenz:	relevante Grenzfrequenz:	relevante Grenzfrequenz:

Explizieren der gesuchten Bauelemente:

--	--	--

Einfluss mehrerer gleichartiger Übertragungsglieder auf das Frequenzverhalten

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

1.2.4.2.9.2.3 Dynamische Dimensionierung

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{gu} ((R_1 \parallel R_2 \parallel h_{11}) + r_G)} k$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_{gu} \left(\left(\frac{1}{h_{22}} \parallel R_C \right) + R_L \right)} k$$

$$f_{go} = \frac{1}{2\pi C_L \left(\frac{1}{h_{22}} \parallel R_C \parallel R_L \right)}$$

1.2.4.2.9.2.4 Dynamische Kenngrößen der Verstärkerstufe

Eingangswiderstand: $r_1 = R_1 \parallel R_2 \parallel h_{11}$

Ausgangswiderstand: $r_2 = R_C \parallel \frac{1}{h_{22}}$

Spannungsverstärkung: $v_u = - \frac{h_{21}}{h_{11}} (R_C \parallel R_L)$

(Phasenverschiebung des Ausgangssignals um $\varphi = - 180^\circ$)

Aufgabe:

Transformieren Sie alle Aussagen und Berechnungen zur A-Verstärkerstufe in Emitterschaltung mit Basisspannungsteiler auf eine A-Verstärkerschaltung in Emitterschaltung mit Basisvorwiderstand.

Hinweis: Bei der Stufe mit Basisvorwiderstand entfällt der Widerstand R_2 des Teilers.

Aufgabe: Berechnen Sie eine Verstärkerstufe in Emitterschaltung mit Basisvorwiderstand!

geg.:	$h_{11 e} = 3,5k\Omega$	$I_C = 2mA$	$f_{g u} = 18Hz$
	$h_{12 e} = 1,35 \cdot 10^{-4}$	$U_{CE} = \frac{U_B}{2}$	$f_{g o} = 18kHz$
	$h_{21 e} = 410$	$U_B = 12V$	$r_G = 50\Omega$
	$h_{22 e} = 12,3\mu S$	$u_1 = 10mV$	$R_L = 2k\Omega$
ges.:	$R_1, R_C, C_1, C_2, r_1, r_2, v_u, u_2$		

Beachten Sie mögliche quantitative Unterschiede in der Überdimensionierung!

Lösungen:	$R_1 = 2,3M\Omega$	$C_1 = 4,2\mu F$	$r_1 = 3,5k\Omega$
	$R_C = 3k\Omega$	$C_2 = 3,1\mu F$	$r_2 = 2,9k\Omega$
	$v_u = - 141$		

1.2.4.3 Transistor als Schalter

1.2.4.3.1 Vergleich mechanischer/elektronischer Schalter

	Widerstandswert im EIN-Zustand	Widerstandswert im AUS-Zustand
mechanischer Schalter		
elektronischer Schalter		

Vergleich anhand realisierbarer Widerstandswerte

1.2.4.3.2 Dimensionierung transistorisierter Schaltstufen

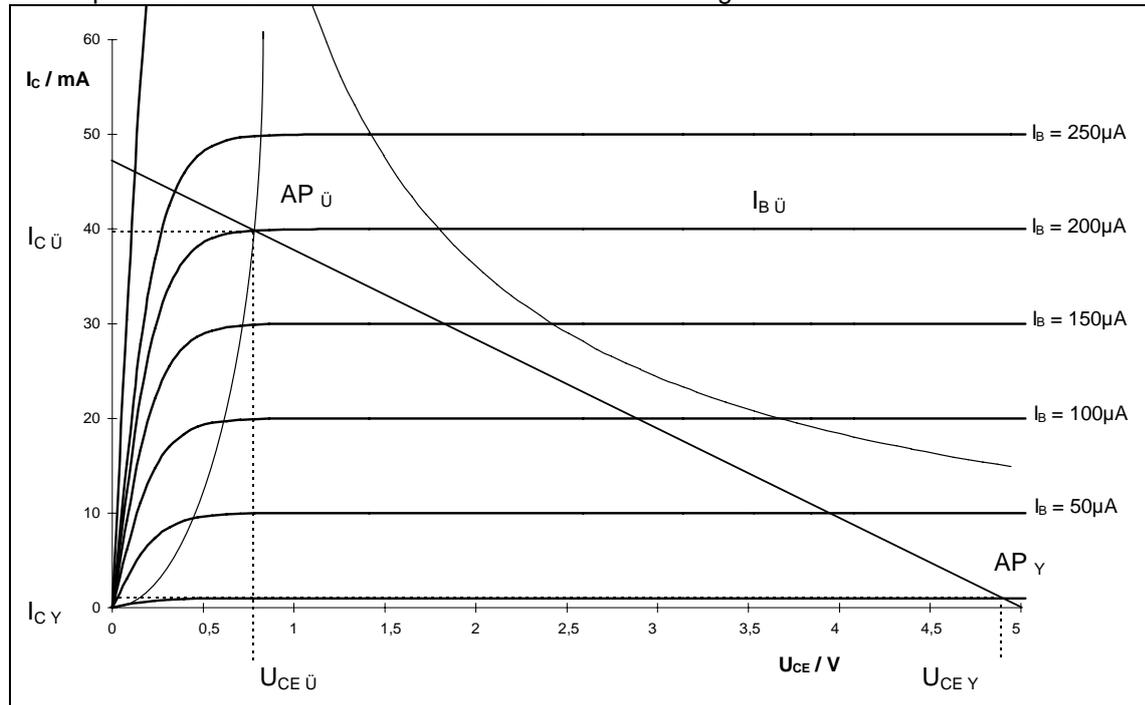
1.2.4.3.2.1 Allgemeine Aussagen

	EIN- oder X-Zustand	AUS- oder Y-Zustand
Basisstrom		
Kollektorstrom		
Basis-Emitter-Spannung		
Kollektor-Emitter-Spannung		

Größen am Transistor und deren typische Werte

1.2.4.3.2.2 Dimensionierung von Schaltstufen ohne Übersteuerung

Arbeitspunkte eines Transistorschalters ohne Übersteuerung

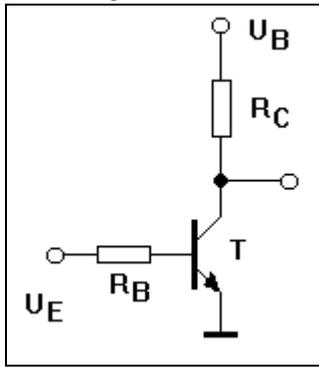


Ausgangskennlinienfeld mit Arbeitspunkten ohne Übersteuerung

Voraussetzung:

Es gilt ein Zusammenhang von $I_C = f(I_B)$ im „aktiv normal Bereich“.

Schaltung



Maschengleichungen:

Ableitung:

mit $I_B = \frac{I_C}{\beta_N}$

Transistorschaltstufe

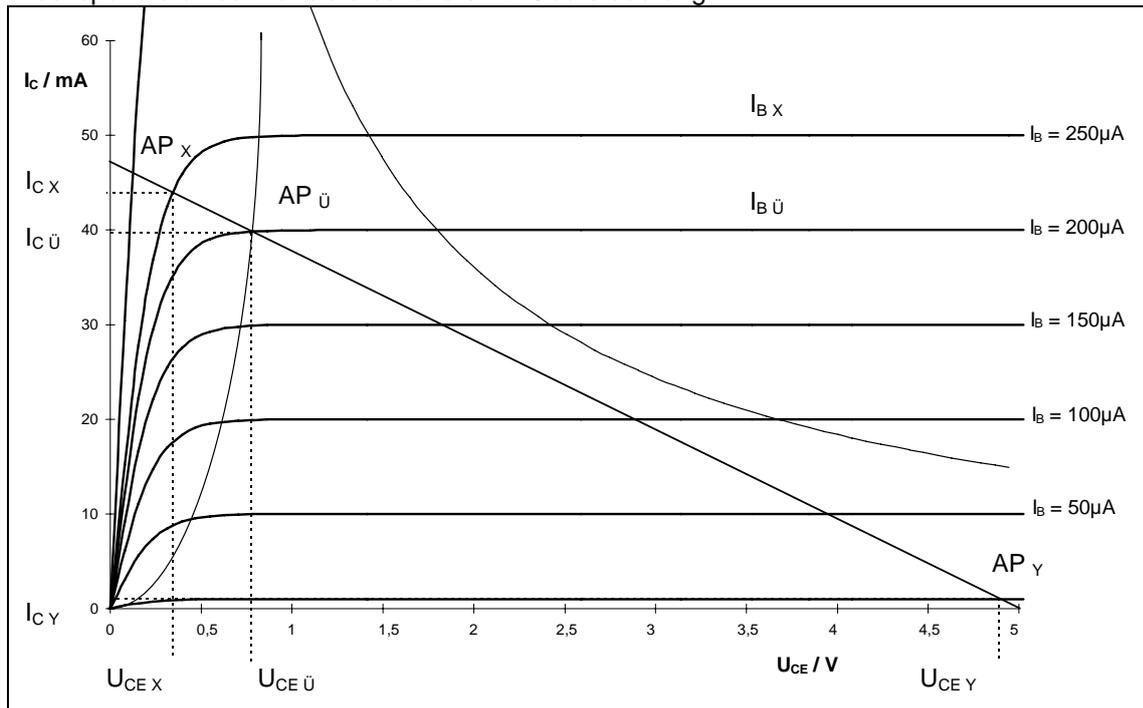
Unter Beachtung der Aussagen über die Größen am Transistor und deren typische Werte ist eine Dimensionierung ausschließlich für den X-Zustand relevant. Die o. g. Gleichungen werden daher wie folgt konkretisiert:

Basisvorwiderstand

Kollektorwiderstand

1.2.4.3.2.3 Dimensionierung von Schaltstufen mit Übersteuerung

Arbeitspunkte eines Transistorschalters mit Übersteuerung



Ausgangskennlinienfeld mit Arbeitspunkten mit Übersteuerung

Das Ein- und Ausschalten kann optimiert werden, wenn die Arbeitspunkte aus dem aktiv normalen Bereich verschoben werden. Der Arbeitspunkt für den X-Zustand wird in den Übersteuerungsbereich, der Arbeitspunkt für den Y-Zustand in den Sperrbereich verlagert.

Die Berechnungen der nichtlinearen Zusammenhänge von $I_C = f(I_B)$ im Übersteuerungs- und Sperrbereich werden durch Einführung je eines Faktors umgangen.

Die Optimierung des Einschaltverhaltens kann in der o. g. Schaltung erfolgen.
 Für die Optimierung der Ausschaltzeit oder beider Schaltzeiten sind Änderungen in der Schaltung notwendig (Widerstand zwischen Basis und negativer Hilfsspannung; dynamische Basisstromeinstellung).

Einschaltübersteuerung: Einschaltfaktor m und dessen Beziehungen

- I_B ... Basisstrom (beliebig),
- $I_{BÜ}$... Übersteuerungs-Basistrom,
Schnittpunkt Basisstrom mit der Arbeitsgerade an der Übersteuerungsgrenze
- I_{BX} ... Basisstrom im Übersteuerungsgebiet, (Transistor im X-Zustand)

Einbeziehung des Einschaltfaktors m in die Dimensionierung

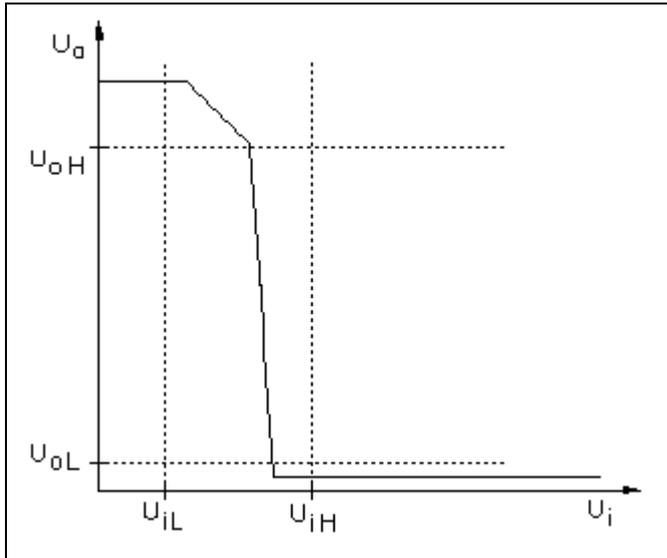
oder

Ausschaltübersteuerung: Ausschaltfaktor k und dessen Beziehungen

- I_B
- $I_{BÜ}$
- I_{BY}

$k = \frac{I_{BY}}{I_{BÜ}}$ mit folgt

1.2.4.3.2.3.1 Statisches Übertragungsverhalten der Transistorschaltstufe



Pegel: Definierte Werte zur Eingrenzung der zulässigen Ein- und Ausgangsspannungen von Logikschaltungen.

Die Pegel werden für digitale Schaltkreisfamilien vom Hersteller vorgegeben und für identische Baureihen diverser Hersteller gleich (Kompatibilität)!

Beispiel: TTL-Pegel

Eingang: $0V < U_{iL} < 0,8V$
 $2V < U_{iH} < 5V$

Ausgang: $0V < U_{oL} < 0,4V$
 $2,4V < U_{oH} < 5V$

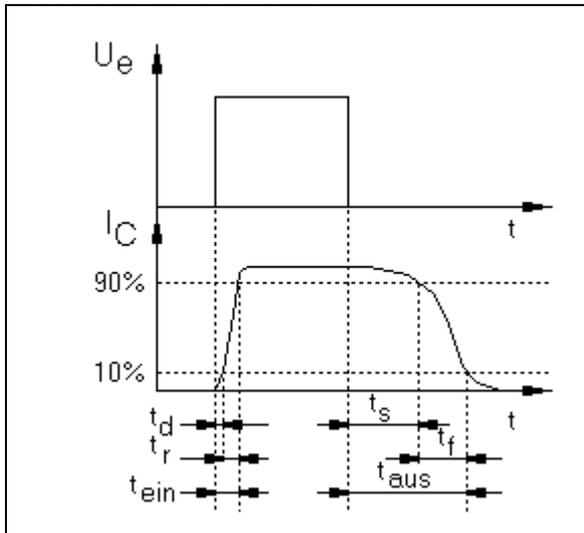
Übertragungskennlinie mit abstrakten Pegelgrenzen

Übung:

Markieren Sie anhand der in der Übertragungskennlinie vorgegebenen Pegelgrenzen die sicheren Pegelbereiche und die „Verbotene Zone“.

1.2.4.3.2.3.2 Dynamisches Übertragungsverhalten der Transistorschaltstufe

Schaltzeiten am Transistor



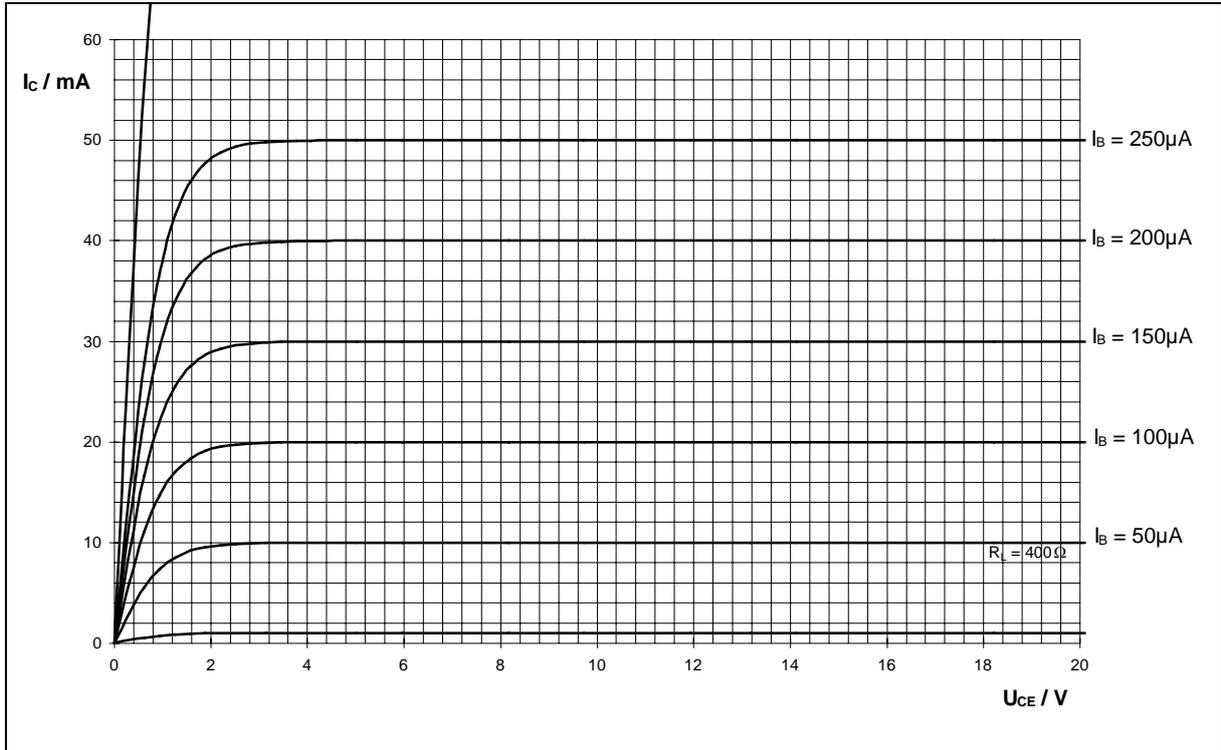
Die Übersteuerungsfaktoren und deren Wirkung auf die Schaltzeiten

	Vergrößerung von m	Vergrößerung von k
Verzögerungszeit		
Anstiegszeit		
Speicherzeit		
Fallzeit		

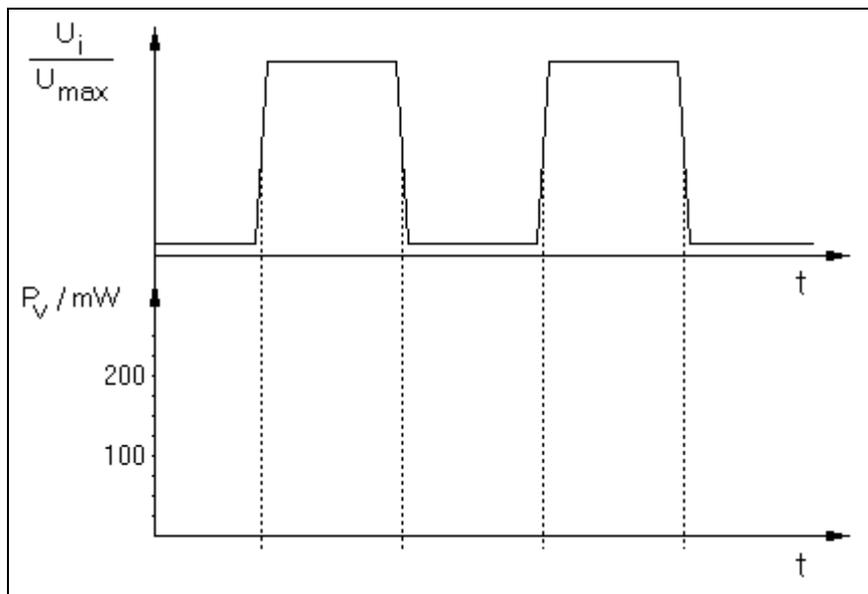
Leistungsumsatz bei Schaltvorgängen

Aufgabe:

- Von einem Transistor ist die Verlustleistung mit $P_V = 300\text{mW}$ gegeben! Berechnen Sie für die auf der Abszisse aufgeführten U_{CE} -Werte, die sich ergebenden Ströme und tragen Sie die Verlustleistungskurve in das Ausgangskennlinienfeld ein!
- Tragen Sie die Widerstandsgerade für $R_C = 400\Omega$ und $I_K = 50\text{mA}$ ein!



- Berechnen Sie die am Transistor umgesetzte Leistung für folgende Spannungen und charakterisieren Sie die jeweiligen Zustände am Transistor $U_{CE} = 0,5\text{V}$; $U_{CE} = 10\text{V}$ und $U_{CE} = 20\text{V}$!
- Tragen Sie für den vorgegebenen Signalverlauf die Leistungswerte in das folgende Diagramm ein!



- Wie verändert sich der Mittelwert der umgesetzten Leistung, wenn die Schaltfrequenz erhöht wird!

1.2.4.4 Unipolartransistor - SFET

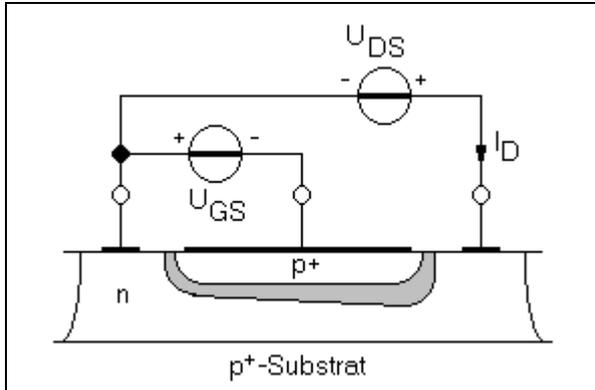
Unipolartransistor:

Funktion des BE wird durch eine Art Ladungsträger (Elektronen bzw. Defektelektronen) bestimmt.

SFET ... Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor

JFET ... junction field effect transistor

1.2.4.4.1 Aufbau



.....

.....

.....

.....

Lateralschnitt eines n-Kanal-SFET

1.2.4.4.2 Wirkungsweise (n-Kanal-SFET)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

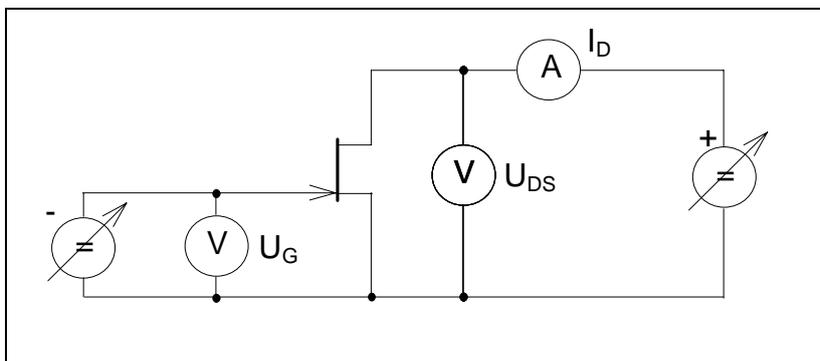
.....

.....

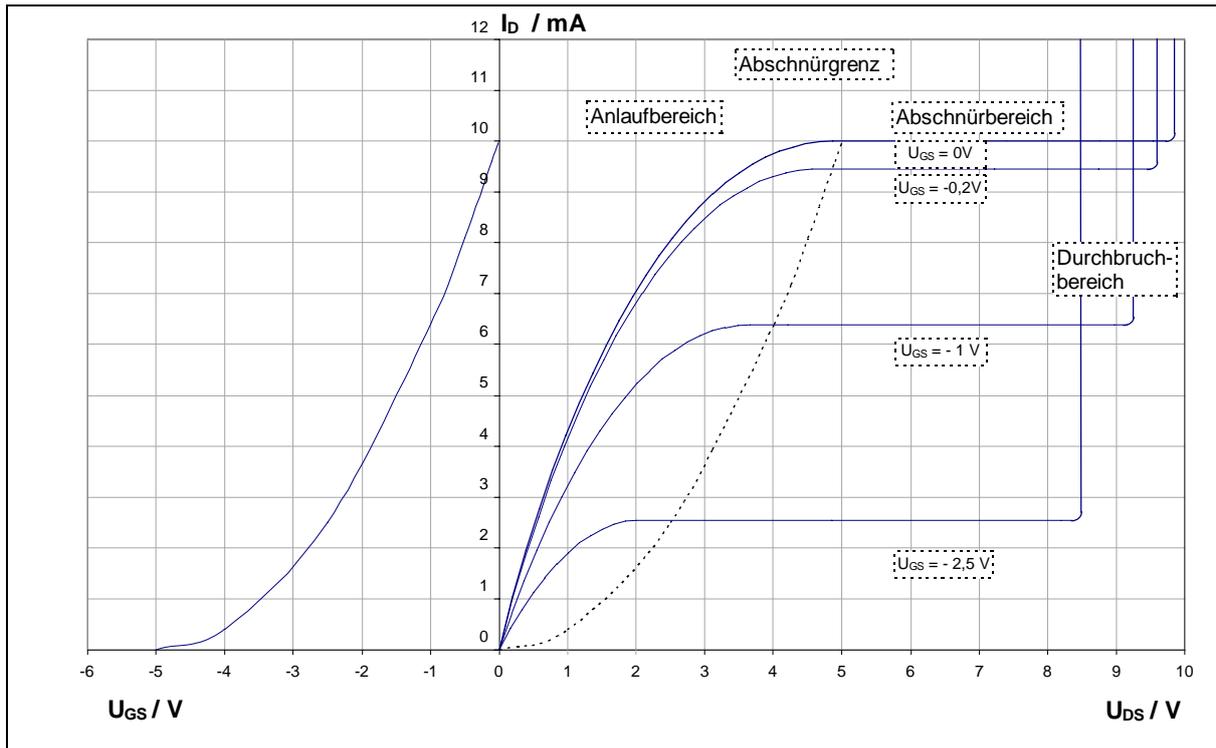
.....

.....

1.2.4.4.3 Schaltung zur Kennlinienaufnahme



1.2.4.4.4 Kennlinien des SFET



Übertragungs- und Ausgangskennlinienfeld mit Kennlinienbereichen

1.2.4.4.5 Kennliniengleichungen

(bei Einsatz der Beträge von U_P , U_{DS} , U_{GS} - Gültigkeit der Gleichungen für p- und n-Kanal-SFET)

Ausgangskennlinie für $U_{DS} < U_{DSP}$: (Anlaufbereich bzw. Ohmscher Bereich)

$$I_D = e \frac{\mu_n N_D A}{l} \left(U_{DS} - \frac{2}{3} U_P \left(\left(\frac{U_{DS} + U_{GS}}{U_P} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{U_{GS}}{U_P} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \right) \quad [1]$$

Ausgangskennlinie für $U_{DS} > U_{DSP}$: (Abschnür- bzw. Sättigungsbereich)

$$I_D = e \frac{\mu_n N_D A}{l} \left((U_P - U_{GS}) - \frac{2}{3} U_P \left(\left(\frac{U_{DS} + U_{GS}}{U_P} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{U_{GS}}{U_P} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \right) \quad [2]$$

[nach Möschwitzer/Lunze; Halbleiterelektronik; VT 1973; S. 545]

Übertragungskennlinie mit $U_{DS} = U_{DSP}$

$$I_{DSP} \approx I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 \quad [3]$$

Bereiche im Ausgangskennlinienfeld

- Anlaufbereich: Gültigkeit der Gleichung [1]
- Abschnürbereich: Gültigkeit der Gleichung [2], (geringer, quasi-linearer Anstieg des I_D)
- Abschnürgrenze: Gültigkeit der Gleichung [3]
- Durchbruchbereich: Spannungsdurchbruch, (erster Durchbruches einer HL-Diode in Sperrrichtung)

1.2.4.4.6 Kennwerte

1.2.4.4.6.1 Gleichstromkennwerte

I_D max maximaler Drainstrom

U_{DS} max maximale Drain-Source-Spannung,

I_{DSS} maximaler Sättigungsstrom,
 $I_{DSS} = I_D |_{U_{DS} = U_{DSS}}$ bzw. $I_{DSS} = I_{DSP} |_{U_{GS} = 0}$

U_{DSS} maximale Sättigungsspannung,
 U_{DS} , bei der für $U_{GS} = 0$ der Kanal abgeschnürt ist!

I_{DSP} Sättigungsstrom,
 $I_{DSP} = I_D |_{U_{DS} = U_{DSP}}$

U_{DSP} Sättigungsspannung
 U_{DS} , bei der für eine bestimmte U_{GS} der Kanal abgeschnürt ist!

U_P Abschnürspannung, pinch-off-voltage,
 $U_P = U_{GS} |_{I_D = 0}$,

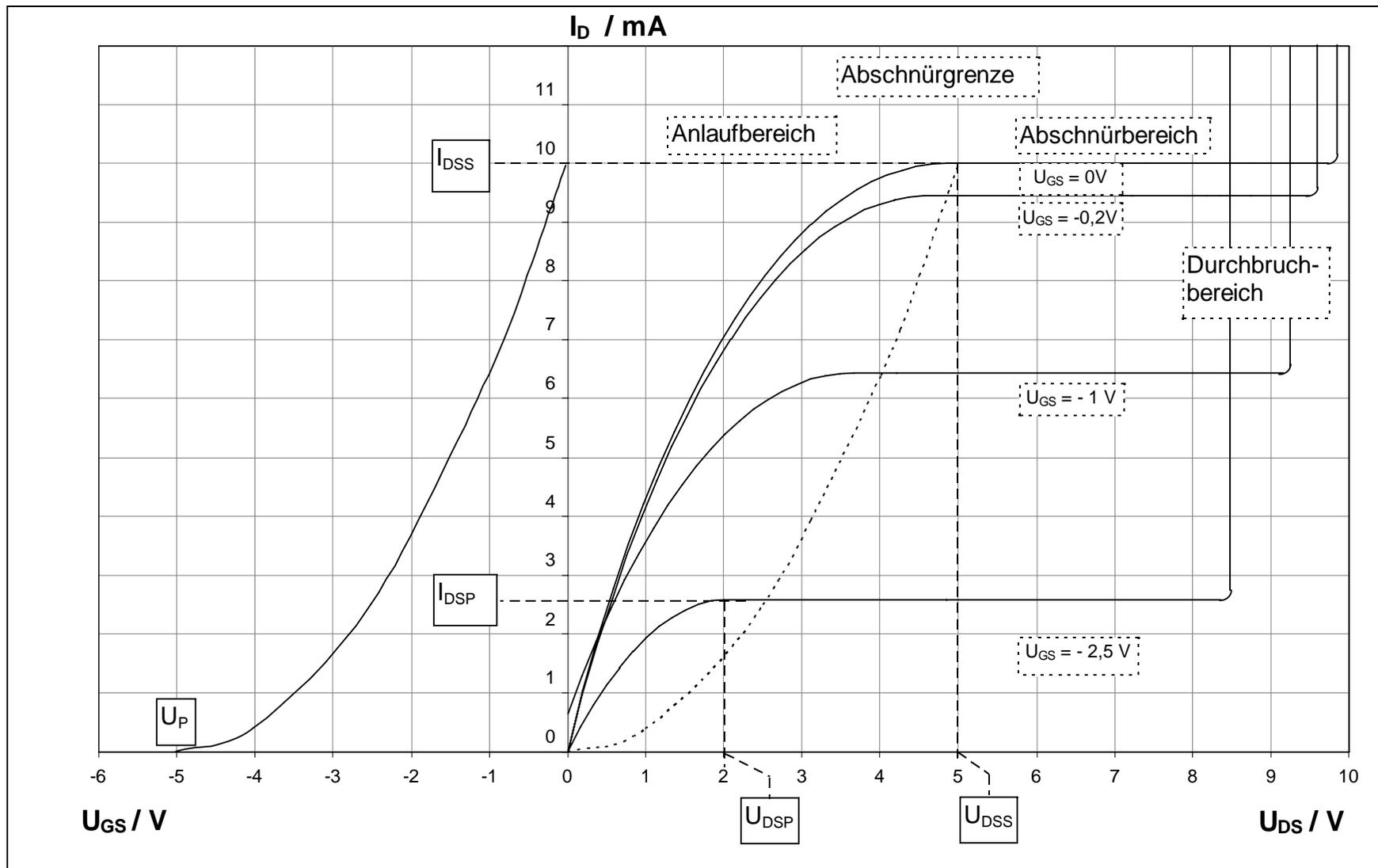
$P_V = U_{DS} I_D$ Verlustleistung,

Beziehungen zur Kennlinie

- Verbindungslinie der Abschnürpunkte (U_{DSP} , I_{DSP} bzw. U_{DSS} , I_{DSS}) ergibt Abschnürgrenze,
- die Lage der Abschnürpunkte, d. h. die sich jeweils ergebenden Ströme, sind abhängig von U_{GS} ,

- Beschreibung durch: $I_{DSP} \approx I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$

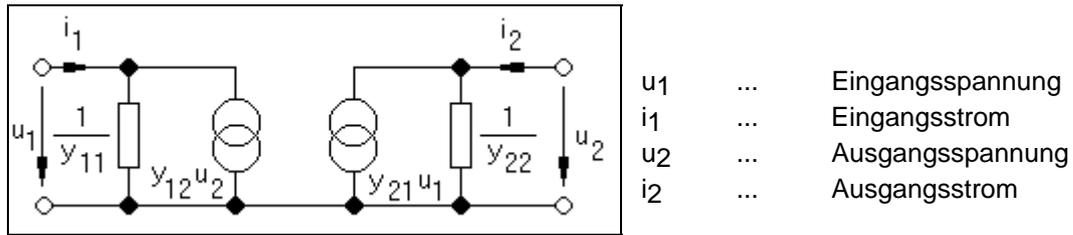
- Verknüpfung von Eingangs- und Ausgangsgröße,
 - mathematische Beschreibung - Übertragungsfunktion,
 - graphische Darstellung - Übertragungskennlinie, 2. Quadrant des Kennlinienfeldes



Idealisiertes Übertragungs- und Ausgangskennlinienfeld eines n-Kanal-SFET mit signifikanten Kennlinienbereichen und Kenngrößen

1.2.4.4.6.2 Wechselstromkennwerte

1.2.4.4.6.2.1 Transistor - Modell (y - Ersatzschaltbild)



Die Bezugs Pfeile im y-ESB sind i. d. R. in symmetrischer Form definiert.

1.2.4.4.6.2.2 y-Parameter (Admittanz)

y_{11}	(für $u_2 = 0$,	Kurzschluss am Ausgang)
y_{12}	(für $u_1 = 0$,	Kurzschluss am Eingang)
y_{21}	(für $u_2 = 0$,	Kurzschluss am Ausgang)
y_{22}	(für $u_1 = 0$,	Kurzschluss am Eingang)

Weitere dynamische Kennwerte:

s_s maximale Steilheit, (Maximalwert von y_{21})
 $S_S = S|_{U_{GS} = 0}$

1.2.4.4.6.2.3 Vierpolgleichungen:

Matrixform	expliziert
$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$	

1.2.4.4.6.2.4 Ermittlung der y-Parameter

- Anlegen einer Tangente am Arbeitspunkt im jeweiligen Kennlinienfeld,
- Ermittlung der zugehörigen Strom- und Spannungsänderung,
- Berechnung des betreffenden Parameters (Leitwertes).

Beispiel:

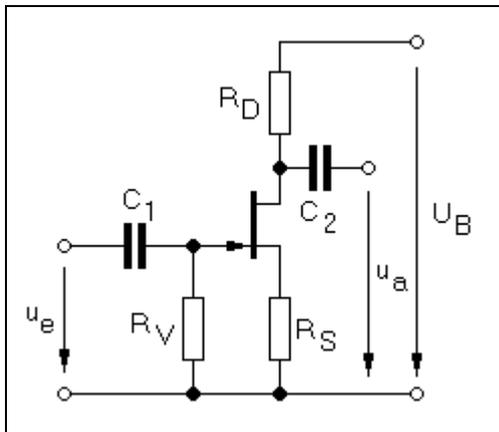
Graphische Bestimmung des Übertragungsleitwertes y_{21} bzw. der Steilheit S

$$y_{21} = \frac{i_2}{u_1} \quad \text{oder} \quad y_{21} = \frac{i_D}{u_{GS}} \quad \text{oder} \quad y_{21} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad y_{21} = \frac{\Delta I_{DSP}}{\Delta U_{GS}} \quad \text{bzw.} \quad y_{21} = s$$

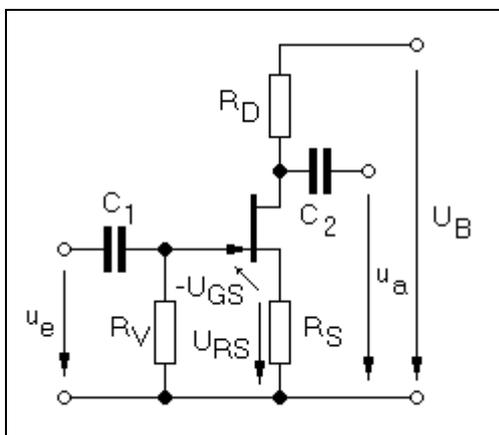
1.2.4.4.7 SFET als Verstärker

1.2.4.4.7.1 Statische Dimensionierung

1.2.4.4.7.1.1 Automatische Gate- Spannungserzeugung



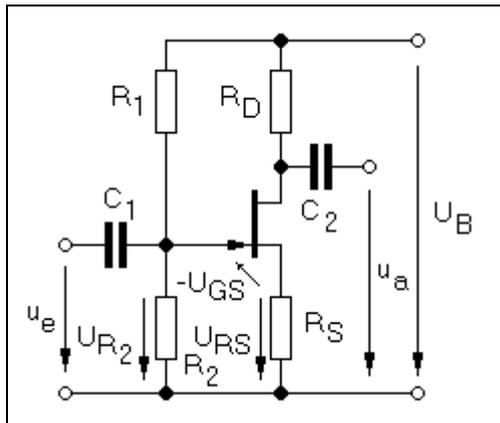
- Eintragen der Spannungen und Ströme,
- U_{RS}
 - Stromfluss von (+) nach (-),
 - Pfeilrichtung von U_{RS} wie eingetragen,
- U_{GS}
 - Stromfluss I_D nur, wenn Gate negativer als Source,
 - Pfeilrichtung von (+) nach (-),
 - Bezeichnungsindex:
 - Index 1: positivere Elektrode
 - Index 2: negativere Elektrode
 - Formulierung als U_{GS} ,
 - Pfeilrichtung invertieren,



- Aufstellung der Maschen im Ein- und Ausgangskreis,
- Berechnungsalgorithmus,

Berechnungsalgorithmus:

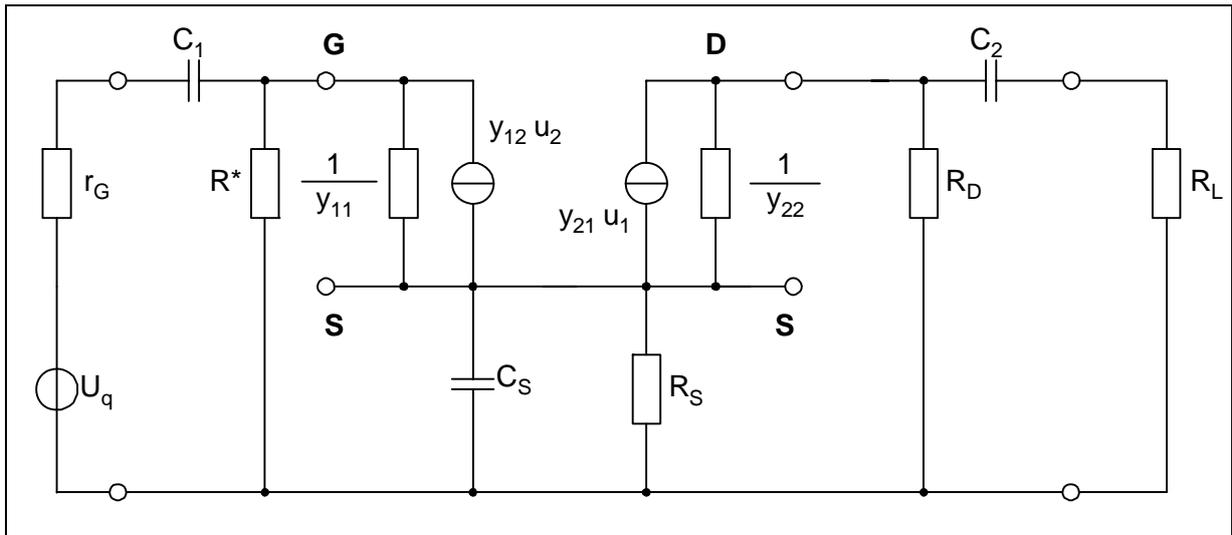
1.2.4.4.7.1.2 Gate-Spannungsteiler



Schaltung mit eingetragenen Spannungen

Berechnungsalgorithmus:

1.2.4.4.7.2 Dynamische Dimensionierung



WESB

Koppelkondensatoren:

1.2.4.4.7.3 Aufgaben

Statische Dimensionierung

Dimensionieren Sie die Schaltung mit automatischer Gate- Spannungserzeugung für folgende Daten:
 $I_S = 5\text{nA}$, $U_P = -5\text{V}$, $I_{DSP} = 5\text{mA}$, $I_{DSS} = 10\text{mA}$, $U_B = 12\text{V}$

Dimensionieren Sie die Schaltung mit Gate- Spannungsteiler für folgende Daten:
 $I_S = 5\text{nA}$, $U_P = -5\text{V}$, $I_{DSP} = 6,4\text{mA}$, $I_{DSS} = 10\text{mA}$, $U_B = 20\text{V}$

1.2.4.4.7.4 Eigenschaften und Anwendungen von SFET's

Eigenschaft	Anwendung