

4. Die Bitrate auf dem Token-Bus beträgt 4 Mbit/s. Berechnen Sie a) die Anzahl der übertragenen Bits nach einer Übertragungszeit von 2,75 s, b) die Übertragungszeit für die Übertragung von 24,85 KB, c) die Zeichenrate (Zeichenlänge = 8 bit).

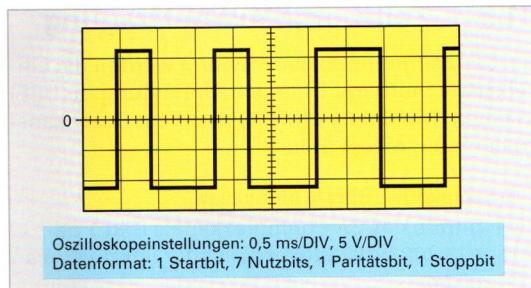
5. In der Datenübertragung werden Binärsignale häufig zur Verringerung der Leitungsdigitrate in mehrstufige Leitungssignale codiert. Das Binärsignal **Bild 1**, vorhergehende Seite, wird nach dem 4B/3T-Code umgesetzt und anschließend über eine Leitung übertragen. Berechnen Sie a) die Bitrate, b) die Digitrate des Ternärsignals, c) die Leitungsdigitrate. Hinweis: Bei der 4B/3T-Codierung werden jeweils vier Bits (4B) zu drei ternären Digits (3T) zusammengefasst.

6. In einem lokalen Netzwerk beträgt die maximale Leitungsdigitrate 10 MBaud. Berechnen Sie die Bitrate a) bei binärer Übertragung, b) bei Übertragung nach einer 8B/6T-Codierung. (Siehe Hinweis von Aufgabe 5).

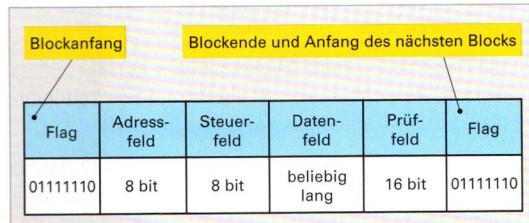
7. Das erste Bit mit dem logischen Wert 0 in **Bild 1** ist ein Startbit. Hinweis: Auf den Datenleitern der Schnittstelle V.24 wird ein 0-Bit mit positiver und ein 1-Bit mit negativer Spannung übertragen. Berechnen Sie a) die Bitrate, b) die Leitungsdigitrate, c) die Zeichenrate. d) Ordnen Sie den logischen Werten 0 und 1 die entsprechenden Spannungswerte zu.

8. Ein Schnittstellen-Schaltkreis für die serielle Ausgabe eines Datenwortes der Länge 8 bit ist auf eine Schrittgeschwindigkeit von 2400 Baud, auf asynchrone Betriebsart mit einem Startbit und zwei Stopppbits sowie auf Paritätsprüfung eingestellt. Hinweis: Startbit, Stopppbit und Paritätsbit werden im Schnittstellen-Schaltkreis den acht Datenbits hinzugefügt. Berechnen Sie a) die Anzahl der Bits eines Zeichens, b) die Bitrate, c) die Bitperiode, d) die Übertragungsdauer eines 8-Bit-Datenwortes.

9. Eine synchrone Datenübertragung in Blöcken nach **Bild 2** dauert insgesamt 11,9 s. Es werden  $n_b = 36$  Blöcke mit einer Bitrate von 19,2 kbit/s übertragen. Berechnen Sie a) die Anzahl der insgesamt übertragenen Bits, b) die Anzahl  $n_{bd}$  der insgesamt in den Datenfeldern der 36 Blöcke übertragenen Datenbits, c) die Anzahl der übertragenen Nutzeichen mit der Länge 7 bit, d) die Anzahl  $n_{zd}$  der Zeichen im Datenfeld eines Blockes.



**Bild 1:** Datensignal an der Schnittstelle V.24



**Bild 2:** Synchrone Übertragung eines Datenblocks

10. Eine synchrone Datenübertragung nach **Bild 2** mit der Bitrate 4800 bit/s erfolgt halbduplex, d.h. nach dem Senden eines Datenblocks wartet die Sendestation auf die Quittierung durch die Empfangsstation und sendet anschließend den nächsten Block. Eine einzelne Quittierung umfasst acht Bytes. Die gesamte Übertragungszeit  $t_{ü}$  setzt sich aus der Übertragungsdauer  $t_D$  der Datenblöcke und Quittierungen und aus den Umschalzeiten  $t_{m1}$  und  $t_{m2}$  der Modems (jeweils 10 ms) zusammen. Die Länge des Datenfeldes ist auf 100 B festgelegt. Es sollen 2500 Nutzeichen übertragen werden. Berechnen Sie a) die Anzahl  $n_b$  der Datenblöcke, b) die Anzahl  $n_{zges}$  der insgesamt zu übertragenen Bytes (einschließlich Quittierung), c) die gesamte Übertragungszeit  $t_{ü}$ , d) die effektive Zeichenrate.

11. Eine synchrone Übertragung mit der Bitrate 4800 bit/s dauert 70,83 s. Ein Datenblock umfasst 100 Nutzeichen der Länge 8 bit und zusätzlich 50 Steuerbits. Wie groß ist die effektive Zeichenrate, wenn 5 % der insgesamt übertragenen Blöcke Wiederholungen wegen Fehler sind?

## 11.5 Zeitmultiplexübertragung

Bei der Zeitmultiplexübertragung werden die Einzelkanäle mehrerer Datenendeinrichtungen (DEE) in einem Multiplexer (MUX) zu einem Datenkanal zusammengefasst (Bild 1).

### Beispiel 1: Bitrate berechnen

Die Bitrate des Zeitmultiplexkanals Bild 1 beträgt 19 200 bit/s. Wie groß ist die Bitrate eines Einzelkanals?

Lösung:

$$r_{bM} = n_K \cdot r_{bK} \Rightarrow r_{bK} = \frac{r_{bM}}{n_K} = \frac{19200 \text{ bit/s}}{4} = 4800 \text{ bit/s}$$

$$r_{bM} = n_K \cdot r_{bK}$$

$$r_{bM} = \frac{n_{bR}}{t_R}$$

$$f_{CM} = \frac{n_K \cdot n_{bZ}}{t_R}$$

$$n_{bR} = n_K \cdot n_{bZ}$$

$$n_{bRnutz} = n_K \cdot r_{bK} \cdot t_R$$

$r_{bM}$  Bitrate des Zeitmultiplexkanals

$n_K$  Anzahl der Einzelkanäle

$r_{bK}$  Bitrate des Einzelkanals

$n_{bRnutz}$  Anzahl der Nutzbits eines Rahmens

$t_R$  Dauer eines Zeitmultiplexrahmens

$t_Z$  Dauer eines Zeitschlitzes

$f_{CM}$  Taktfrequenz des Multiplexers

$n_{bZ}$  Anzahl der Bits eines Zeitschlitzes

$n_{bR}$  Anzahl der Bits eines Rahmens

### Aufgaben zu 11.5

- Die Dauer eines Zeitmultiplexrahmens beträgt 250 µs (Bild 1). Berechnen Sie a) die Bitrate des Zeitmultiplexkanals, b) die Bitrate eines Einzelkanals.
- Bei einer Zeitmultiplexübertragung werden 32 Datenkanäle mit jeweils einer Bitrate von 64 kbit/s byteweise zu einem Zeitmultiplexsignal zusammengefasst. Berechnen Sie a) die Bitrate des Multiplexkanals, b) die Dauer eines Multiplexrahmens.
- In einer Datenvermittlung werden 128 Einzelkanäle byteweise zu einem Multiplexkanal mit der Rahmendauer 125 µs zusammengefasst. Berechnen Sie a) die Taktfrequenz des Multiplexers, b) die Bitrate des Multiplexkanals, c) die Bitrate eines Einzelkanals.
- Die Taktfrequenz eines Multiplexers beträgt 2048 kHz. Es werden 32 Einzelkanäle byteweise verschachtelt.

Berechnen Sie a) die Dauer eines Multiplexrahmens, b) die Dauer eines Zeitschlitzes, c) die Bitperiode.

- In einem Zeitmultiplex-Übertragungssystem werden vier Einzelkanäle mit jeweils 2048 kbit/s zu einem Multiplexrahmen mit der Bitrate 8448 kbit/s und der Dauer 100,378 µs zusammengefasst. Für Rahmenkennung und Taktanpassung werden Zusatzbits in jeden Rahmen eingefügt. Berechnen Sie a) die Anzahl der Rahmenbits, b) die Anzahl  $n_{bRnutz}$  der Nutzbits in einem Rahmen, c) die Anzahl  $n_{bRzu}$  der Zusatzbits je Rahmen.
- Bei einer Multiplexübertragung werden vier Einzelkanäle zu jeweils 8448 kbit/s zu einem Multiplexkanal mit der Bitrate 34 368 kbit/s zusammengefasst. Ein Multiplexrahmen umfasst 1536 bit. Berechnen Sie a) die Dauer eines Multiplexrahmens, b) die Anzahl  $n_{bRnutz}$  der Nutzbits je Rahmen, c) die Anzahl  $n_{bRzu}$  der Zusatzbits, d) die Zusatzbitrate  $r_{bzu}$ .

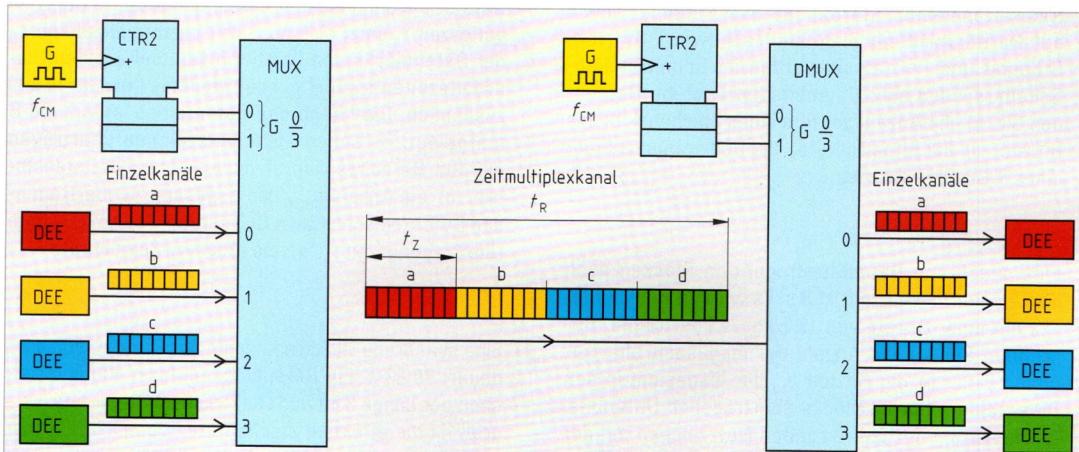


Bild 1: Prinzip einer Zeitmultiplexübertragung mit byteweiser Verschachtelung

## 11.6 Fehlerhäufigkeit

Das Verhältnis von Bitfehlerzahl zur Gesamtzahl der Bits ist die Bitfehlerhäufigkeit.

### Beispiel 1: Messzeit berechnen

Für einen Übertragungskanal der Bitrate 64 kbit/s wird die Bitfehlerhäufigkeit mit  $10^{-6}$  angegeben. Wie groß muss die Messzeit gewählt werden, damit mindestens 80 Bitfehler erfasst werden?

Lösung:

$$P_b = \frac{n_f}{r_b \cdot t_m}$$

$$\Rightarrow t_m = \frac{n_f}{P_b \cdot r_b} = \frac{80 \text{ bit}}{10^{-6} \cdot 64 \text{ kbit/s}} = 1250 \text{ s} \approx 21 \text{ min}$$

$$P_b = \frac{n_f}{n_b}$$

$$P_B = \frac{n_f}{n_B}$$

$$P_b = \frac{n_f}{r_b \cdot t_m}$$

$$P_B = n_{bB} \cdot P_b$$

$P_b$  Bitfehlerhäufigkeit

$n_f$  Zahl der Bitfehler

$n_b$  Zahl der Bits

$P_B$  Blockfehlerhäufigkeit

$n_f$  Zahl der Blockfelder

$n_B$  Zahl der Blöcke

$n_{bB}$  Zahl der Bits eines Blockes, Blocklänge

$r_b$  Bitrate

$t_m$  Messzeit

### Aufgaben zu 11.6

- Wie groß ist die Bitfehlerhäufigkeit, wenn von  $4,75 \cdot 10^6$  Bits acht Bits verfälscht werden?
- Ein Bitfehlermessgerät zeigt die Bitfehlerhäufigkeit  $1,5 \cdot 10^{-5}$  an. Berechnen Sie die Anzahl der Bitfehler, wenn  $10^7$  Bits übertragen werden.
- Auf einer Übertragungsstrecke mit der Bitfehlerhäufigkeit  $6,5 \cdot 10^{-6}$  werden die Daten zu je 8000 Bits geblockt. Die Bitrate beträgt 19,2 kbit/s. Jeder Block wird auf Fehler geprüft. Ein verfälschter Block wird wiederholt. Berechnen Sie a) die Blockfehlerhäufigkeit, b) die Anzahl der übertragenen Blöcke bei einer Übertragungszeit von 25 min, c) die Anzahl der verfälschten Blöcke, d) die für die Blockwiederholungen benötigte Zeit  $t_w$ .
- Auf einem Übertragungskanal für 9600 bit/s beträgt die Bitfehlerhäufigkeit  $2,5 \cdot 10^{-5}$ . Es werden Datenblöcke mit jeweils 100 Nutzeichen und acht Steuerzeichen gebildet (Zeichenlänge = 8 bit). Jeder verfälschte Block wird wiederholt. Es soll eine Datei der Größe 2,2 MB übertragen werden. Berechnen Sie a) die Anzahl der zu übertragenden Nutzeichen von je 8 Bits, b) die Anzahl der zu übertragenden Blöcke, c) die Anzahl der verfälschten Blöcke, d) die Zeichenrate  $r_z$ , e) die Übertragungszeit, f) die effektive Zeichenrate  $r_{\text{eff}}$ .

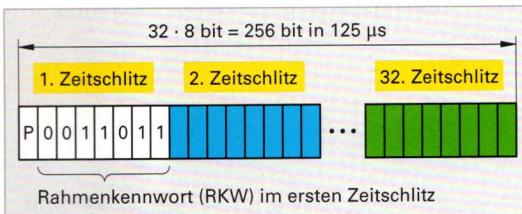


Bild 1: Rahmenkennwort im Multiplex-Übertragungssystem

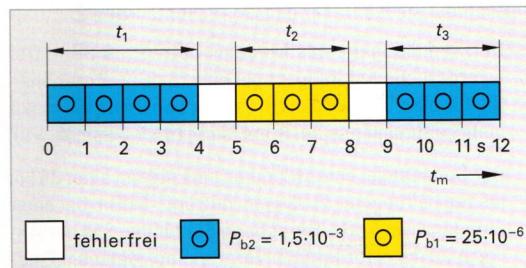


Bild 2: Fehlerbehaftete Übertragung

- Bei der Überwachung des Rahmenkennwortes Bild 1 werden während einer Betriebsdauer von 24 Stunden 480 Fehlerbits registriert. Wie groß ist die Bitfehlerhäufigkeit? Hinweis: Zuerst Bitrate des Rahmenkennwortes berechnen.
- Für einen Datenkanal mit  $r_b = 64$  kbit wird die Fehlerhäufigkeits-Verteilung Bild 2 gemessen. Berechnen Sie für die Blocklänge 1600 bit a) die Anzahl der je Zeitabschnitt  $t_1$ ,  $t_2$  und  $t_3$  übertragenen Blöcke, b) die Anzahl der je Zeitabschnitt  $t_1$ ,  $t_2$  und  $t_3$  verfälschten Blöcke, c) die Blockfehlerhäufigkeit für die Messzeit 12 s.

## 11.7 Pegel und Dämpfung von Datenleitungen

Die Betriebsdämpfung erfasst die gesamte Dämpfung eines Verbindungsweges zwischen zwei Datenübertragungseinrichtungen (DÜE) und setzt sich zusammen aus den positiven Dämpfungsmaßen der Leitungen, aus den positiven Stoßdämpfungsmaßen an unvollkommen angepassten Leitungsabschlüssen und aus den negativen Dämpfungsmaßen der Verstärker (**Bild 1**). Der Dämpfungskoeffizient einer Leitung ist frequenzabhängig (**Bild 2**).

### Beispiel 1: Pegel berechnen

Berechnen Sie für den Fall der Anpassung

$$(R_{i1} = Z_{w1} = R_{i2} = Z_{w2} = R_{i3})$$

den Empfangspegel der Datenübertragung

**Bild 1.**

Lösung:

$$A_b = A_1 + A_v + A_2 + A_{s1} + A_{s2} + A_{s3} + A_{s4} = 19 \text{ dB} - 18 \text{ dB} + 20 \text{ dB} + 0 \text{ dB} = 21 \text{ dB}$$

$$A_b = L_0 - L_e$$

$$\Rightarrow L_e = L_0 - A_b = -3 \text{ dBm} - 21 \text{ dB} = \mathbf{-24 \text{ dBm}}$$

### Aufgaben zu 11.7

Verwenden Sie die Dämpfungskoeffizienten **Bild 2**.

- Der Sendepegel eines Modems beträgt  $-6 \text{ dBm}$ . Der erforderliche Empfangspegel ist  $-26 \text{ dBm}$ . Berechnen Sie für eine Schwerpunktfrquenz von  $8 \text{ kHz}$  die maximale Leitungslänge bei Anpassung ( $d = 0,6 \text{ mm}$ ,  $A_v = 0$ ).
- Der Sendepegel eines Modems am Eingang einer  $36 \text{ km}$  langen Leitung mit  $d = 0,6 \text{ mm}$  beträgt  $-6 \text{ dBm}$  bei einer Frequenz von  $5 \text{ kHz}$ . Berechnen Sie für den Fall der Anpassung die erforderliche Verstärkung, wenn ein Empfangspegel von  $-27 \text{ dBm}$  erzielt werden soll.
- Mit welcher Bitrate kann eine  $15 \text{ km}$  lange Leitung ( $d = 0,6 \text{ mm}$ ) bei Anpassung ohne Verstärker betrieben werden, wenn bei einer Sendespannung von  $1,4 \text{ V}$  die Empfangsspannung mindestens  $60 \text{ mV}$  betragen muss ( $R_i = 150 \Omega$ )?
- Ein Digitalsignal wird mit  $60 \text{ kbit/s}$  über eine Zweidrahtleitung  $d = 0,6 \text{ mm}$  und dem Wellenwiderstand  $150 \Omega$  übertragen. Ermitteln Sie für die Sendespannung  $2,8 \text{ V}$  die maximale Leitungslänge bei Anpassung, wenn die Empfangsspannung mindestens  $70 \text{ mV}$  betragen soll.
- Berechnen Sie die Empfangsspannung einer Datenübertragung auf einer  $12 \text{ km}$  langen Leitung ( $d = 0,8 \text{ mm}$ ) bei einer Bitrate von  $12 \text{ kbit/s}$  und einer Sendespannung von  $2 \text{ V}$  ( $R_i = 150 \Omega$ ,  $Z_w = 320 \Omega$ ).

$$L_0 = 10 \cdot \lg \frac{U_0^2}{4 \cdot R_i \cdot 1 \text{ mW}} \text{ dBm}$$

$$A_b = L_0 - L_e$$

$$L_e = 10 \cdot \lg \frac{U_e^2}{R_i \cdot 1 \text{ mW}} \text{ dBm}$$

$$A = \alpha \cdot l$$

$$A_s = 20 \cdot \lg \frac{Z_w + R_i}{2 \cdot \sqrt{Z_w \cdot R_i}} \text{ dB}$$

$$f_s \approx 0,5 \cdot r_b$$

$$A_b = A + A_v + A_s$$

$L_0$  Sendepegel in dBm  
 $L_e$  Empfangspegel in dBm

$U_0$  Sendespannung  
 $U_e$  Empfangsspannung

$R_i$  Innenwiderstand

$Z_w$  Wellenwiderstand

$A$  Dämpfungsmaß in dB

$\alpha$  Dämpfungskoeffizient

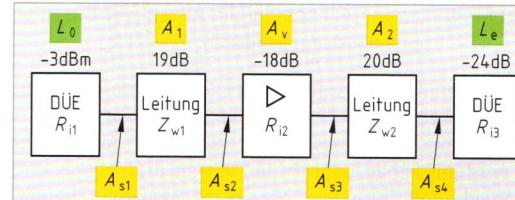
$A_b$  Betriebsdämpfungsmaß in dB  
 $A_s$  Stoßdämpfungsmaß in dB

$A_v$  Verstärkung (negatives Dämpfungsmaß) in dB

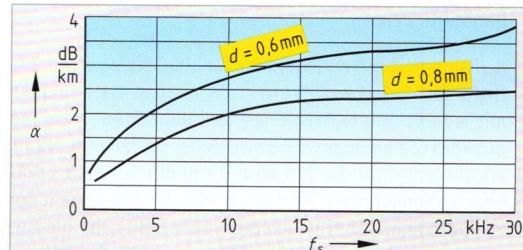
$f_s$  Schwerpunktfrquenz

$r_b$  Bitrate

$l$  Leitungslänge



**Bild 1:** Pegel und Dämpfungsmaße



**Bild 2:** Dämpfungskoeffizienten von Ortskabeln

- Welche Entfernung kann bei einer Bitrate von  $4,8 \text{ kbit/s}$  und bei einem Sendepegel von  $3 \text{ dBm}$  auf einer Leitung mit dem Aderdurchmesser  $0,6 \text{ mm}$  überbrückt werden, wenn die Empfangsspannung mindestens  $40 \text{ mV}$  betragen soll und unvollkommene Anpassung ( $R_i = 150 \Omega$ ,  $Z_w = 800 \Omega$ ) zu berücksichtigen ist?



## 11.8 Wellenwiderstand und Ausbreitungsgeschwindigkeit

Eine Leitung muss mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen werden, damit keine Reflexionen auftreten. Jedes Leitungsstück verhält sich wie ein Tiefpass, weil zusätzlich zum Leitungswiderstand  $R$  eine Kapazität  $C$  und eine Induktivität  $L$  wirkt (Bild 1).

### Beispiel 1: Wellenwiderstand berechnen

Eine Koaxialleitung hat die Induktivität  $L = 3,77 \mu\text{H}$  und die Kapazität  $C = 670 \text{ pF}$ . Wie groß ist der Wellenwiderstand  $Z_w$  der Leitung?

**Lösung:**

$$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{3,77 \mu\text{H}}{670 \text{ pF}}} = 75 \Omega$$

### Aufgaben zu 11.8

- Eine Leitung besitzt die Kapazität  $C = 0,6 \text{ nF}$  und eine Induktivität von  $L = 32 \mu\text{H}$ . Berechnen Sie den Wellenwiderstand  $Z_w$ .
- Eine Leitung mit dem Wellenwiderstand  $Z_w = 240 \Omega$  hat die Kapazität  $C = 1 \text{ nF}$ . Welche Induktivität besitzt die Leitung?
- Ein HF-Kabel mit der längenbezogenen Kapazität von  $34 \text{ pF/m}$  hat den Wellenwiderstand  $Z_w = 120 \Omega$ . Wie groß ist die längenbezogene Induktivität  $L'$ ?
- Bei einem HF-Kabel mit dem Wellenwiderstand  $Z_w = 50 \Omega$  ist die längenbezogene Induktivität  $0,25 \mu\text{H/m}$ . Berechnen Sie die längenbezogene Kapazität  $C'$ .
- Eine Koaxialleitung mit  $D = 6,8 \text{ mm}$  und  $d_i = 0,5 \text{ mm}$  besitzt ein Dielektrikum mit  $\epsilon_r = 1,7$ . Berechnen Sie den Wellenwiderstand  $Z_w$ .
- Eine Koaxialleitung hat die Durchmesser  $d_i = 0,7 \text{ mm}$  und  $D = 3,5 \text{ mm}$ .
  - Bei welcher Permittivitätszahl  $\epsilon_r$  beträgt der Wellenwiderstand  $Z_w = 75 \Omega$ ?
  - Wie groß ist bei  $\mu_r = 1$  der Verkürzungsfaktor  $k$ ?
- Im freien Raum sind  $\mu_r = 1$  und  $\epsilon_r = 1$ . Berechnen Sie den Wellenwiderstand  $Z_w = Z_{wo}$  des freien Raumes, an den Sendeantennen angepasst werden.
- Berechnen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0$  für eine elektromagnetische Schwingung im Vakuum.
- Eine Leitung mit den Kenngrößen  $R' = 0,22 \Omega/\text{m}$ ,  $L' = 0,25 \mu\text{H}/\text{m}$  und  $C' = 60 \text{ pF/m}$  überträgt ein Signal der Frequenz  $f = 5 \text{ kHz}$ .
  - Berechnen Sie den längenbezogenen Blindwiderstand  $2\pi f \cdot L'$ .
  - Wie groß ist das Verhältnis  $R'/(2\pi f \cdot L')$ ?
  - Welchen Wellenwiderstand hat die Leitung bei dieser Frequenz?

Für verlustarme Leitungen bei hohen Frequenzen ( $R' \ll 2\pi f \cdot L'$ ):

$$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$Z_w = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

$$Z_w = \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \mu_0}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}}$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}}$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$$

$$c = k \cdot c_0$$

Bei tiefen Frequenzen ( $R' \gg 2\pi f \cdot L'$ ):

$$Z_w \approx \frac{\ln(D/d_i)}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot 60 \Omega$$

$$Z_w = \sqrt{\frac{R'}{2\pi f \cdot C'}}$$

$R'$  längenbezogener Widerstand der Leitung  
 $f$  Frequenz

$Z_w$  Wellenwiderstand der Leitung

$L$  Induktivität der Leitung

$C$  Kapazität der Leitung

$L'$  längenbezogene Induktivität der Leitung

$C'$  längenbezogene Kapazität der Leitung

$\mu_r$  Permeabilitätszahl

$\mu_0$  magnetische Feldkonstante  $\mu_0 = 1,257 \mu\text{Vs}/(\text{Am})$

$\epsilon_r$  Permittivitätszahl der Isolierung

$\epsilon_0$  elektrische Feldkonstante  $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pAs}/(\text{Vm})$

$K$  Verkürzungsfaktor

$c_0$  Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum

$c$  Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle

$D$  Innendurchmesser des Außenleiters

$d_i$  Durchmesser des Innenleiters

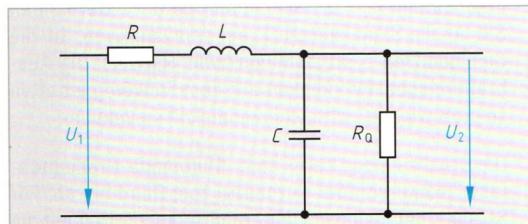


Bild 1: Erztschaltung eines kurzen Leitungsstückes

das Verhältnis  $R'/(2\pi f \cdot L')$ ? c) Welchen Wellenwiderstand hat die Leitung bei dieser Frequenz?

- Eine Leitung mit  $R' = 0,25 \Omega/\text{m}$  und  $C' = 35 \text{ pF/m}$  wird bei tiefen Frequenzen betrieben. Bei welcher Frequenz besitzt diese Leitung einen Wellenwiderstand von  $600 \Omega$ ?

## 11.9 Verbindungstechnik

### 11.9.1 Glasfasertechnik

Bei Multimodefasern werden die Lichtstrahlen durch Totalreflexion im Kern geführt. Die Eintrittswinkel der Lichtstrahlen müssen innerhalb des Akzeptanzwinkels  $\theta_a$  liegen (**Bild 1**). Die Streuung der Lichtstrahlen (Dispersion) bewirkt eine Verbreiterung der übertragenen Impulse (**Bild 2**).

#### ■ Beispiel 1: Akzeptanzwinkel berechnen

Für eine Multimodefaser wird die numerische Apertur mit 0,21 angegeben. Berechnen Sie den Akzeptanzwinkel der Einstrahlung.

*Lösung:*

$$\sin \theta_a = A_N$$

$$\Rightarrow \theta_a = \arcsin A_N = \arcsin 0,21 = 12,1^\circ$$

$$\sin \theta_a = A_N = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$c_n = \frac{c}{n}$$

$$D = \frac{\sqrt{t_{i2}^2 - t_{i1}^2}}{l}$$

$$r_{\text{bmax}} \approx \frac{0,375}{l \cdot D}$$

$\theta_a$	Akzeptanzwinkel
$A_N$	numerische Apertur
$n$	Brechzahl (Index 1 für Kern, Index 2 für Mantel)
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $\approx 0,3 \cdot 10^9$ m/s)
$c_n$	Lichtgeschwindigkeit in einem Material
$D$	Dispersion
$t_{i1}$	Dauer des Eingangsimpulses
$t_{i2}$	Dauer des Ausgangsimpulses
$r_{\text{bmax}}$	höchste übertragbare Bitrate
$l$	Faserlänge

#### Aufgaben zu 11.9.1

- Die Kernbrechzahl einer Multimodefaser beträgt 1,46 und die Mantelbrechzahl 1,42. Berechnen Sie a) die numerische Apertur, b) den Akzeptanzwinkel.
- Bei einer Multimodefaser betragen der Akzeptanzwinkel  $20,5^\circ$  und die Brechzahl des Kerns 1,527 (**Bild 1**). Berechnen Sie a) die numerische Apertur, b) die Brechzahl des Mantels.
- Ein Telefongespräch von Köln nach Berlin wird einmal über Glasfaserleitung ( $l_1 = 680$  km,  $n_1 = 1,4$ ) und einmal über Satellit ( $l_2 = 2 \cdot 36\,000$  km) geführt. Berechnen Sie a) die Signallaufzeit  $t_1$  auf dem Landweg, b) die Signallaufzeit  $t_2$  auf dem Funkweg. Hinweis: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Funkweg ist etwa so groß wie die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.
- Die Brechzahl des Kerns einer Multimode-Gradientenfaser nimmt von der Kernmitte zum Rand hin ab. Für Strahl 1, der sich axial in Kernmitte ausbreitet, gilt die Brechzahl  $n_{11} = 1,5$ , für Strahl 2, der durch Totalreflexion geführt wird  $n_{12} = 1,45$ . Berechnen Sie a) die Ausbreitungsgeschwindigkeiten  $c_{11}$  und  $c_{12}$ , b) die Laufzeiten  $t_1$  für  $l_1 = 10$  km und  $t_2$  für  $l_2 = 10,353$  km.
- Am Anfang eines Glasfaserleiters der Länge 10 km beträgt die Dauer eines Messimpulses 7,5 ns. Am Ende des Leiters wird die Impulsdauer 30,9 ns gemessen (**Bild 2**). Berechnen Sie die Dispersion der Glasfaser.
- Berechnen Sie die maximale Länge eines Glasfaserleiters mit der Dispersion 2,8 ns/km, wenn eine Verbreiterung der Eingangsimpulsdauer von 5,5 ns auf 20,5 ns zugelassen wird.

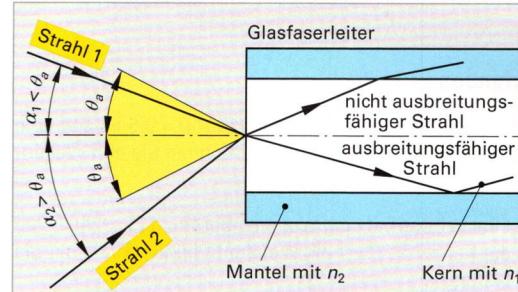


Bild 1: Akzeptanzwinkel einer Multimodefaser

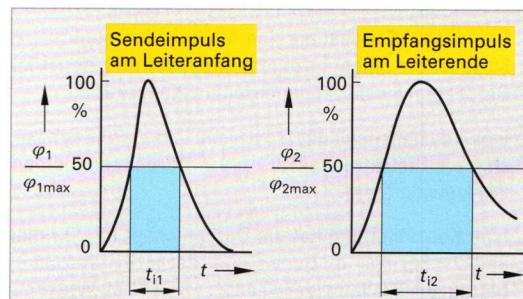


Bild 2: Impulsverbreiterung durch Modendispersion

- Berechnen Sie die maximale Bitrate auf einer Multimode-Gradientenfaser mit der Dispersion 2,9 ns/km und mit der Länge 25 km.
- Berechnen Sie die durch Dispersion begrenzte maximale Übertragungslänge ohne Zwischenregenerator für ein Signal mit der Bitrate 622 Mbit/s auf einer Monomodefaser mit der Dispersion 15 ps/km.



## 11.9.2 Übertragungsreichweiten in Glasfaser netzen

Die Übertragungsreichweiten in Glasfaser netzen werden durch die Bandbreite und die Dämpfung der Glasfaserleiter begrenzt.

### ■ Beispiel 1: Dämpfungsmaß berechnen

Ermitteln Sie das Dämpfungsmaß eines Gradientenfaserleiters mit der Länge 5 km für eine Infrarotstrahlung der Wellenlänge 900 nm.

*Lösung:*

$$\text{Aus Bild 1: } \alpha = 2,2 \text{ dB/km}$$

$$A = \alpha \cdot l = 2,2 \text{ (dB/km)} \cdot 5 \text{ km} = 11 \text{ dB}$$

### Aufgaben zu 11.9.2

- Ein Signal soll mit der Bitrate 300 Mbit/s über einen Gradientenfaserleiter mit dem Modenkopplungsgrad 0,8 ohne Zwischenverstärker (Regenerator) über eine Strecke von 25 km übertragen werden. Welches Bandbreiten-Längen-Produkt muss die Faser mindestens aufweisen?
- Ein Signal der Bitrate 1,6 Gbit/s soll über eine Monomodefaser übertragen werden. Für diese Faser wird vom Hersteller ein Bandbreiten-Längen-Produkt von 16 GHz · km angegeben. Der Modenkopplungsgrad von Monomodefasern beträgt 1. Berechnen Sie die maximale Länge einer Übertragungsstrecke ohne Regenerator.
- Ein Infrarotsignal der Wellenlänge 900 nm wird mit einer Strahlungsleistung von 0,8 mW in eine Gradientenfaser mit dem Dämpfungsverlauf nach Bild 1 eingekoppelt. Berechnen Sie den Leistungspegel in dBm am Ende einer Übertragungsstrecke von 12 km.
- Ein optisches Signal mit der Wellenlänge 1300 nm wird über eine Gradientenfaser mit dem Dämpfungsverlauf Bild 1 übertragen. Die eingekoppelte Leistung beträgt 40 μW. Der Empfänger benötigt einen Leistungspegel von mindestens -40 dBm. Berechnen Sie die maximale Streckenlänge.
- Für die Planung eines Glasfaser netzes mit der Bitrate 1 Gbit/s soll der maximale Regeneratorabstand ermittelt werden. Die Anlagenplanung beruht auf einer Gradientenfaser, für die der Hersteller ein Bandbreiten-Längen-Produkt von 10 GHz · km bei einem Modenkopplungsgrad von 0,75 und einem Dämpfungs koeffizienten von 2 dB/km angibt. Die von einer Infrarot-Leuchtdiode (IRED) in die Faser eingekoppelte Strahlungsleistung beträgt -13 dBm. An den Empfängereingängen und Regeneratoreingängen ist ein Leistungspegel von -45 dBm erforderlich. Die Ankopplung

$$B_0 \approx 1,6 \cdot f_s \cdot l^\delta$$

$$f_s = 0,5 \cdot r_b$$

$$A = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ dB}$$

$$A = \alpha \cdot l$$

$$L_P = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ mW}} \text{ dBm}$$

$$A = L_{P1} - L_{P2}$$

$B_0$  Bandbreiten-Längen-Produkt

$f_s$  Schwerpunkt fre quenz

$l$  Länge des Glasfaserleiters

$\delta$  Modenkopplungsgrad

$r_b$  Bitrate

$A$  Dämpfungsmaß in dB

$P_1, P_2$  Eingangsleistung, Ausgangsleistung

$\alpha$  Dämpfungs koeffizient in dB/km

$L_P$  Leistungspegel in dBm

$L_{P1}$  Eingangsleistungspegel in dBm

$L_{P2}$  Ausgangsleistungspegel in dBm

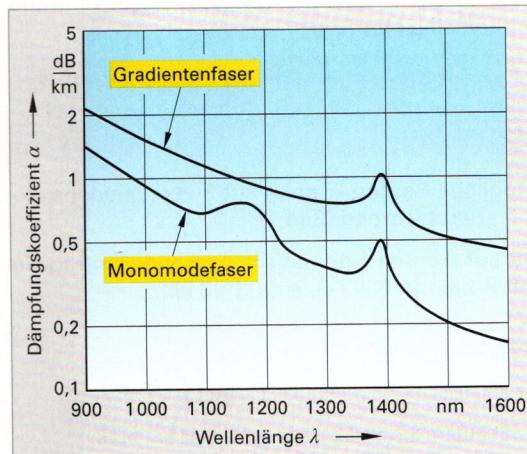


Bild 1: Dämpfungs koeffizient von Glasfaserleitern

der Leiter an die Sender, Empfänger und Regenerator erfolgt über Steckverbinder mit einer Dämpfung von jeweils 1 dB. Ermitteln Sie die maximale Reichweite (Regeneratorabstand) nur unter Berücksichtigung a) des Bandbreiten-Längen-Produktes, b) der Dämpfung. c) Welche Reichweite muss in die Netzeplanung übernommen werden? d) Wie groß müsste die Strahlungsleistung sein, wenn das volle Bandbreiten-Längen-Produkt ausgenutzt wird?

## 12 Netztechnik

### 12.1 Aufbau von IT-Netzen, Routingtabelle

Eine Routingtabelle enthält Informationen, auf welchem Weg (Route) sich eine netzwerkfähige Komponente, z.B. ein PC oder ein Router, mit anderen Netzwerken und deren Teilnehmern verbindet.

Routingtabellen von Routern enthalten umfangreiche Informationen über alle erreichbaren Netzwerke, Routingtabellen von PCs enthalten Informationen des LAN und der Schnittstellen zu weiteren Netzwerken.

Das Betriebssystem eines PCs erstellt eine Routingtabelle beim Booten und ergänzt diese laufend während des Betriebes.

Jeder Eintrag in der Routingtabelle eines Routers weist einem IP-Adressbereich eines Netzwerkziels eine Angabe zu, über welchen Router (Hop) und welche Schnittstelle (Interface) die Daten als Paketstrom zu leiten sind. Jeder dieser Einträge enthält eine Metrik.

Anhand der Metrik kann der kürzeste Weg mit den wenigsten Weiterleitungen (Hops) ermittelt werden.

Mögliche Routen können auf 3 verschiedene Arten erlernt werden (**Bild 1**).

Daraus werden automatisch passende Einträge in der Routingtabelle erzeugt (**Bild 2**).

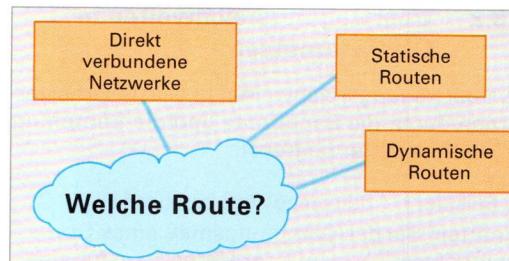
#### Aufgaben zu 12.1

Gegeben ist die Routingtabelle in **Bild 3**.

1. Erläutern Sie die Einträge in den Zeilen 1 bis 3.
2. Erläutern Sie die Einträge in den Zeilen 4 bis 6.
3. Erläutern Sie die Einträge in die Routingtabelle in **Bild 2** in den Zeilen 1 bis 3.
4. Skizzieren Sie zu **Bild 2** ein mögliches Netzwerk.

Aktive Routen:					
Netzwerkziel	Netzwerkmaske	Gateway	Schnittstelle	Anzahl	
0.0.0.0	0.0.0.0	192.168.2.1	192.168.2.116	20	
127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.1	127.0.1	1	
192.168.2.0	255.255.255.0	192.168.2.116	192.168.2.116	20	
192.168.2.116	255.255.255.255	127.0.1	127.0.1	20	
192.168.2.255	255.255.255.255	192.168.2.116	192.168.2.116	20	
224.0.0.0	240.0.0.0	192.168.2.116	192.168.2.116	20	
255.255.255.255	255.255.255.255	192.168.2.116	192.168.2.116	1	

**Bild 3:** Routingtabelle



**Bild 1:** Möglichkeiten für Routing

Router # show ip route

Codes: C-connected, S-static, I-IGRP, R-RIP, M-Mobile

172.16.0.0/24 is subnetted, 4 subnets

S 172.16.4.0 is directly connected, Serial 0/0/1

R 172.16.1.0 via 172.16.2.1

C 172.16.2.0 is directly connected, Serial 0/0/0

C 172.16.3.0 is directly connected, FastEthernet 0/0

**Bild 2:** Ausschnitt Routingtabelle an einem Router

#### Beispiel 1: Routingtabelle erläutern

Gegeben ist die folgende Routingtabelle eines PC mit der IP-Adresse 10.28.16.21. Erläutern Sie die Einträge.

> netstat -r (oder route print unter Windows)					
Aktive Routen:	Netzwerkziel	Netzwerkmaske	Gateway	Schnittstelle	
	0.0.0.0	0.0.0.0	10.28.1.253		10.28.16.21
	127.0.0.0	255.0.0.0	127.0.1		127.0.1
	10.28.16.21	255.255.255.255	127.0.1		127.0.1
	224.0.0.0	240.0.0.0	10.28.16.21		10.28.16.21

**Lösung:** Das Standard-Gateway ist die 10.28.1.253. In Zeile 1 ist die Standardroute eingetragen, Netzwerkziel 0.0.0.0 und die Netzmaske 0.0.0.0 oder /0, die verfügbare Metrik beträgt 21. In Zeile 2 ist die Loopback-Route mit Netzwerkziel 127.0.0.0 und der Netzwerkmaske 255.0.0.0 (/8) eingetragen. Für alle Pakete, die an Adressen in der Form 127.x.y.z gesendet werden, wird die Adresse des nächsten Knotens auf 127.0.0.1 (die Loopback-Adresse) gesetzt, das Paket wird nicht in das Netzwerk gesendet. In Zeile 3 ist die Hostroute mit Netzwerkziel 10.28.16.21 und Netzwerkmaske 255.255.255.255 (/32) für die IPv4-Adresse des Hosts eingetragen. Für alle (von einer lokalen Anwendung) an die Adresse 10.28.16.21 (eigene IP-Adresse) gesendeten IPv4-Pakete wird die Adresse des nächsten Knotens auf 127.0.0.1 gesetzt. Der Eintrag mit dem Netzwerkziel 224.0.0.0 und der Netzwerkmaske 240.0.0.0 (/4) ist eine Route für Multicast-Verkehr, der von diesem Host gesendet wird.



## 2.1.1 Routingtabellen auslesen

um LAN in **Bild 1** sind folgende Routingtabellen erkannt: Routingtabelle Router 1

Netz-adresse	Netzmaske	Gate-way	Metrik (Anzahl der Hops)
192.168.0.0	255.255.255.0	*	0
192.168.1.0	255.255.255.0	*	0
0.0.0.0	0.0.0.0	192.168.0.254	10

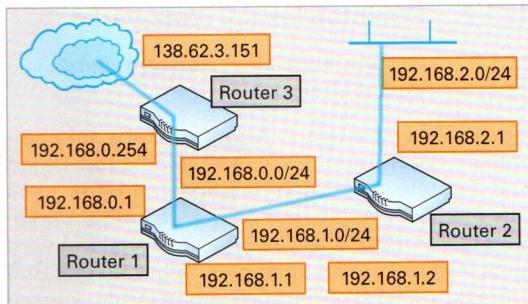


Bild 1: LAN mit drei Subnetzen

Der Stern bedeutet, dass sich der Router selbst in diesem Netz befindet. Die IP-Adresse und Subnetzmuske 0.0.0.0 kennzeichnen die Default-Route bzw. das Default-Gateway. Sie soll benutzt werden, falls einer der Einträge aus der Tabelle zum momentan analysierten Frame passt, jedoch nicht, wenn der Frame in eines der bekannten Netze weitergeleitet werden soll. Um dies zu verhindern, wird der Route eine hohe Metrik zugewiesen, z. B. 10.

Die Routingtabellen der Router 2 und 3:

Router 2	Netz-adresse	Netzmaske	Gate-way bzw. Router	Metrik (Anzahl der Hops)
	192.168.0.0	255.255.255.0	192.168.1.1	1
	192.168.1.0	255.255.255.0	*	0
	192.168.2.0	255.255.255.0	*	0
	0.0.0.0	0.0.0.0	192.168.1.1	10
Router 3	192.168.0.0	255.255.255.0	*	0
	192.168.1.0	255.255.255.0	192.168.0.1	1
	192.168.2.0	255.255.255.0	192.168.0.1	2
	0.0.0.0	0.0.0.0	*	10

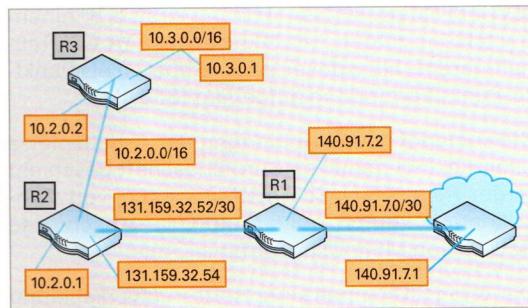


Bild 2: Ausschnitt Netzwerk

Zeile	Netz	Subnetz-maske	Gateway
1	10.2.0.0	/16	*
2	131.159.32.52	/30	*
3	10.3.0.0	/16	10.2.0.2
4	0.0.0.0	/0	131.159.32.53

Bild 3: Ausschnitt Routingtabelle am Router R2

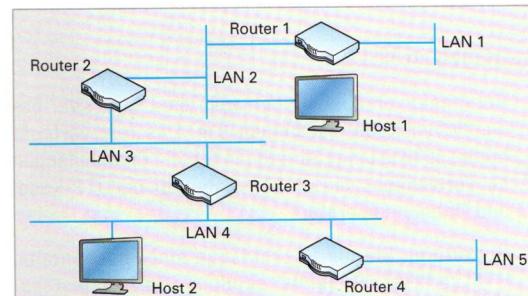


Bild 4: Netzwerk mit 5 lokalen Netzwerken

Router	Zielnetz	Interface	Next Hop
Router 1	137.226.32.0/19	if1	*
	137.226.64.0/19	if2	*
	137.226.96.0/19	if2	137.226.64.2
	137.226.128.0/19	if2	137.226.64.2
	137.226.160.0/19	if2	137.226.64.2
	default	ifi	„Internet“

Bild 5: Routingtabelle Router 1



## 12.1.2 Errichten lokaler Netzwerke

### 12.1.2.1 Gesamtlänge einer horizontalen Verkabelung

Anwendungsneutrale Kommunikationskabelanlagen versorgen Büroarbeitsplätze mit Daten und Energie. Die Verkabelungsstandards nach DIN EN 50173-1 sehen eine sternförmige Verkabelung vor (**Bild 1**). Eine Etagenverkabelung wird auch als horizontale Verkabelung bezeichnet und umfasst den Tertiärbereich einer strukturierten IT-Verkabelung. Die horizontale Verkabelung erfolgt sternförmig und reicht vom Etagenverteiler (EV) oder dem letzten aktiven Gerät, z.B. einem Switch, bis zu den Anschlussdosen (TA von Teilnehmeranschlussdose). Jedes Kabel ist als Punkt-zu-Punkt-Verbindung aufgebaut (**Bild 1**).

Die kostengünstige Anbindung der Arbeitsplätze einer flexibel genutzten Bürolandschaft geschieht in der Regel über Sammelpunkte (CP von Consolidation Points) oder Multi-User-Anschlüsse (MUTO von Multi User Terminal Outlet).

Der Strang (Channel) einer Horizontalverkabelung umfasst nach dem Cross-Connect-CP-TO-Modell ab dem Etagenverteiler die Patchfeldkabel (Equipment Cord, Patch Control), das fest verlegte Installationskabel (Permanent Link), das CP-Kabel (Work Area Cord) und das Anschlusskabel zum Endgerät (TO von Terminal Outlet, **Bild 2**).

Planer und Installateure berechnen die einzelnen Kabellängen auf Einhaltung der Maximallänge zur sicheren Funktion und als Dokumentationsnachweis für die Gewährleistung.

#### Aufgaben zu 12.1.2.1

- Bei Etagenverkabelung betragen die Längen der beweglichen Kabel zusammen 9 m. Das fest verlegte Kabel ist 30 m lang. Berechnen Sie die Channellängen bei Verwendung von a) STP-Kabel, b) bei UTP-Kabel und Normaltemperatur.
- Überprüfen Sie die Gesamtlänge einer horizontalen UTP-Verkabelung bei Verwendung von 76 m fest installiertem Kabel und 20 m beweglichen Kabeln.
- Ermitteln Sie die maximale Länge in Metern des fest verlegten Kabels (Permanent Link) nach dem Cross-Connect-CP-TO-Modell bei Verwendung von UTP-Kabeln und 20 °C. Anschlusskabel 4 m, Patchkabel 3 m, Rangierkabel 2 m, CP-Kabel 4 m.
- Eine Büroverkabelung wird nach dem Cross-Connect-CP-TO-Modell geplant. Es soll eine geschirmte Kat-6-Installation (STP) für Normaltemperatur verlegt

Die Normen erlauben nur eine gesamte Stranglänge (Channel) von maximal 100 m.

Gesamtlänge einer horizontalen Verkabelung beim Cross-Connect-CP-TO Modell

$$l_{\text{Channel}} = (l_A + l_B + l_E + l_{CP}) \cdot k + l_{\text{Fix}} \leq 100 \text{ m}$$

$l_{\text{Channel}}$	Gesamtlänge der horizontalen Verkabelung
$l_A$	Länge Arbeitsplatzkabel zum Endgerät
$l_B$	Länge Rangierkabel im Verteiler
$l_E$	Länge Rangierkabel (Anschlusskabel)
$l_{CP}$	Länge CP-Kabel
$l_{\text{Fix}}$	Länge fest verlegtes Kabel
$k$	Korrekturfaktor ( $k = 1,5$ bei STP-Kabel, $k = 1,2$ bei UTP-Kabel)

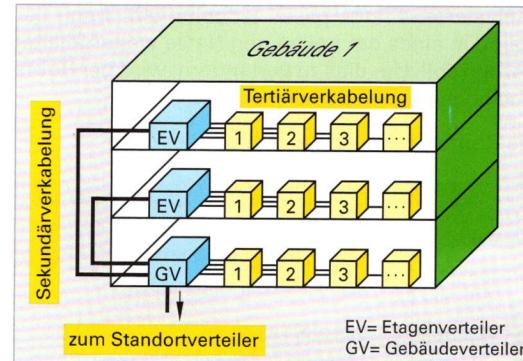


Bild 1: Strukturierte Verkabelung

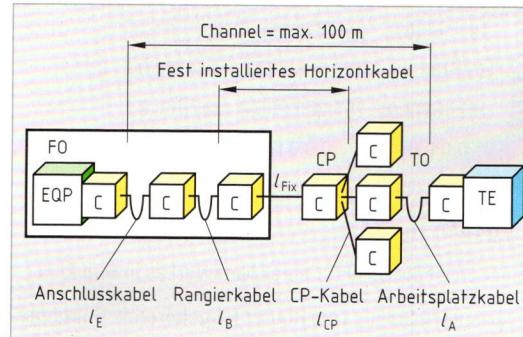


Bild 2: Verkabelung nach dem Cross-Connect-CP-TO-Modell

werden. Die Bürogrundfläche umfasst 1000 m<sup>2</sup> und ist quadratisch. Der Etagenverteiler mit Patchfeld befindet sich in einer Ecke des Raumes. Überprüfen Sie durch Berechnung, ob für einen Arbeitsplatz an der gegenüberliegenden Raumcke die geforderte Channellänge eingehalten werden kann.



### 12.1.2.2 Längeneinschränkungen von fest verlegten Verkabelungsstrecken

Fest verlegte Kabelstrecken als Durchverbindungsstrecken (Interconnect-TO-Modell) oder Anzigerverkabelungsstrecken (Cross-Connect-TO-Modell) sind in ihrer Länge beschränkt (**Bild 1**). Vom Planer oder Installateur berechnete Längen dürfen auch bei Erweiterungen nicht überschritten werden. Flexible Kabel haben meist eine höhere Dämpfung als fest verlegte Installationskabel. Werden bei Wartungsarbeiten andere Längen von Rangierleitungen oder Anschlussleitungen eingesetzt, kann nicht garantiert werden, dass die berechnete Übertragungsstrecke einwandfrei funktioniert.

Bei Umgebungstemperaturen von über 20 °C im Betrieb, muss bei geschirmten Installationen die Länge des fest verlegten Kabels um 0,2 % pro °C reduziert werden; für ungeschirmte Installationen gilt: 0,4 % bei über 20 °C bis 40 °C und 0,6 % bei größer 40 °C bis 60 °C.

#### Aufgaben zu 12.1.2.2

- Bei einer Etagenverkabelung nach dem Cross-Connect-TO-Modell (**Bild 1, B**) mit STP-Kabel beträgt die Länge aller beweglichen Kabel 12 m. Berechnen Sie die Länge des fest verlegten Kabels bei Normaltemperatur.
- Eine Kabelstrecke (STP) nach dem Interconnect-CP-TO-Modell (**Bild 1, C**) enthält 12 m bewegliche Kabel und 76 m fest verlegtes Kabel bei Normaltemperatur. Welche Länge darf das CP-Kabel maximal besitzen?
- Berechnen Sie die maximal zulässige fest installierte STP-Verkabelungsstrecke mit Kat-7-Komponenten (Klasse-F-Channel) für das Interconnect-TO-Modell (**Bild 1, A**) bei Normaltemperatur und je 5 m Anschlusskabel.
- Eine ungeschirmte Kat-7-Installation mit STP-Kabel nach **Bild 1, C**, soll für 35 °C berechnet werden. Welche maximale Länge der festen Verkabelung ist erlaubt bei 5 m Anschlusskabel, 5 m Arbeitsplatzkabel und 15 m CP-Kabel?
- Bei einem Verkabelungsprojekt nach dem Cross-Connect-TO-Modell werden 3 m Anschlusskabel, 2 m Rangierkabel und 5 m Arbeitsplatzkabel eingeplant. Die ungeschirmte Kat-7-Installation (UTP) soll noch bei 45 °C sicher arbeiten. Berechnen Sie die maximale Länge des fest verlegten Kabels.

Längeneinschränkungen von fest verlegten Verkabelungsstrecken:

A: Interconnect-TO-Modell

$$l_{\text{Fix}} = L_A - 2a - l_F \cdot k$$

B: Cross-Connect-TO-Modell

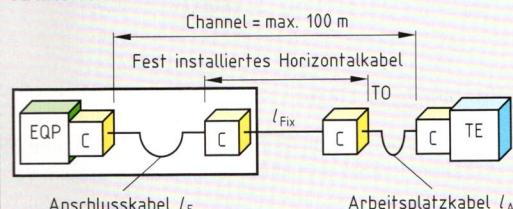
$$l_{\text{Fix}} = L_B - 3a - l_F \cdot k$$

C: Interconnect-CP-TO-Modell

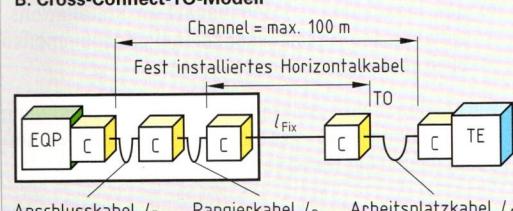
$$l_{\text{Fix}} = L_C - 3a - l_F \cdot k - l_{\text{CP}} \cdot k$$

$L$	Ausgangswert ( $L_A = 107 \text{ m}$ , $L_B = L_{AC} = 106 \text{ m}$ )
$l_{\text{Fix}}$	Länge des fest verlegten Kabels in m (maximal 90 m)
$l_F$	kombinierte Länge aller beweglichen Kabel in m (maximal je 5 m)
$l_{\text{CP}}$	Länge CP-Kabel
$a$	Längenreduktion in Metern als Reserve für Dämpfungsabweichungen, z.B. 2a, 3a.
$k$	Korrekturfaktor, $k = 1,5$ bei STP-Kabel, $k = 1,2$ bei UTP-Kabel

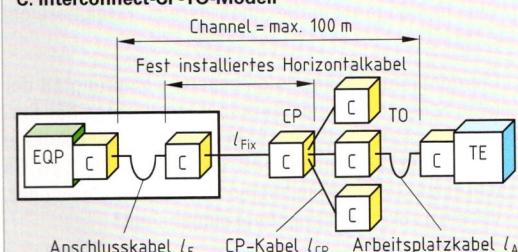
#### A: Interconnect-TO-Modell



#### B: Cross-Connect-TO-Modell



#### C: Interconnect-CP-TO-Modell



**Bild 1:** Verbindungsmodelle für fest verlegte Kabel mit Kat-7-Komponenten (Klasse-F-Channel)



### 12.1.2.3 Gebäudeverkabelung

Unternehmen mit mehreren Gebäuden werden durch strukturierte Verkabelungen miteinander verbunden (**Bild 1**).

Für die Gelände-, Gebäude- und Etagenverkabelung sind maximal zulässige Kabellängen festgelegt (**Bild 2**).

Die Länge der Rangierpaare im Standortverteiler und im Gebäudeverteiler sollten jeweils 20 m nicht überschreiten. Längen über 20 m müssen von der größten zulässigen Länge der Primär- bzw. Sekundärverkabelung abgezogen werden.

#### Beispiel 1: Netzwerk entwerfen

Auf einem Firmengelände sollen drei Gebäude wie in **Bild 3** durch strukturierte Verkabelung verbunden werden. Bestimmen Sie a) die Anzahl der Gebäudeverteiler, b) die Anzahl der Etagenverteiler.

*Lösung:*

- 3 Gebäude  $\Rightarrow$  3 Gebäudeverteiler
- 1 Gebäude mit 4 Etagen und 2 Gebäude mit je 3 Etagen ergibt  
 $N = 4 \text{ EV} + 2 \cdot 3 \text{ EV} = 10 \text{ EV}$

### Aufgaben zu 12.1.2.3

- Im Tertiärbereich eines Firmennetzwerkes sollen 85 Arbeitsplätze im Horizontalbereich auf 3 Etagen verkabelt werden. Bestimmen Sie
  - die Anzahl der Etagenverteiler,
  - den maximalen Leistungsbedarf an Installationskabel zu den Anschlussdosen bei angenommenen 90 m im Horizontalbereich.
- Berechnen Sie die größtmögliche Längenausdehnung einer strukturierten Verkabelung, wenn alle Verbindungen auf einer Geraden liegen würden (**Bild 2**).
- Im Standortverteiler beträgt die Länge der Rangierkabel einer Verbindung 15 m, im Gebäudeverteiler 35 m. Welche Länge ist im Sekundärbereich (Steigbereich) zulässig?
- Die gesamte maximal zugelassene Dämpfung an der LWL-Strecke in einer Verkabelung beträgt bei Einmodenfasern 11 dB. Im Primärbereich einer Anlage beträgt die Dämpfung 2,5 dB, im Steigbereich 2 dB. Es wurden 4 Steckverbindungen zu je 1,5 dB verwendet. Wird die zulässige Dämpfung eingehalten?
- Auf einem Gelände einer Messe sollen 5 nebeneinander stehende Hallengebäude miteinander verkabelt werden. Die Gebäudeverteiler sind jeweils 75 m von-

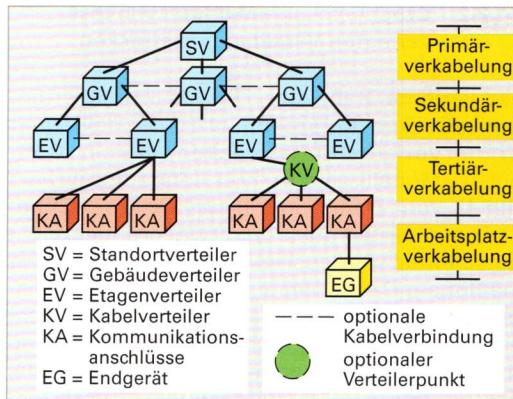


Bild 1: Verkabelungshierarchie

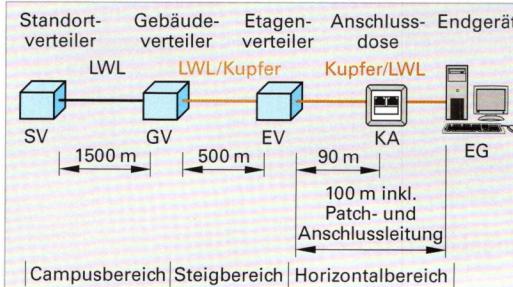


Bild 2: Zulässige Kabellängen

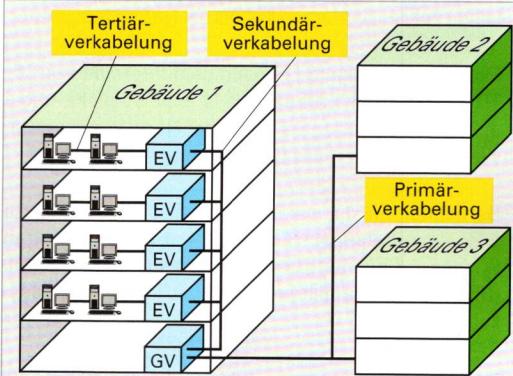


Bild 3: Firmennetzwerk

einander entfernt. Der Hauptverteiler befindet sich beim ersten GV.

- Wie viele Meter Primärkabel müssen eingeplant werden?
- Wird die zulässige Dämpfung eingehalten, wenn LWL mit 1 dB/km verwendet werden und 3,6 dB im Primärbereich zugelassen wird?



## 2.2 Messen im LAN

Messungen im LAN stellen den korrekten Anschluss der Datenleitungen sicher. Es wird die geforderte Bandbreite überprüft und zertifiziert. Zwischen zwei benachbarten Leitungen, die über eine längere Strecke parallel verlaufen, kann es zu einer induktiven oder kapazitiven Beeinflussung kommen (Bild 1). Diese Kopplung führt zu einer Störung bei der Signalübertragung durch Übersprechen (crosstalk). Typische Messwerte sind NEXT von Near End Crosstalk und FEXT von Far End Crosstalk. Mit einem Kabeltester werden meist alle Adernpaare vermessen (Tabelle 1).

### 2.2.1 Grundlagen NEXT, FEXT

Die Nahnebensprech-Dämpfung (NEXT von near-end-crosstalk) gibt das Nebensprechen bezogen auf den Leitungsanfang an. Der NEXT-Wert des Signals in dB sollte möglichst groß sein. NEXT wird immer nur zwischen zwei Leiterpaaren gemessen, unabhängig davon, wie viele Leiterpaare im Kabel vorhanden sind.

Gute Übertragungsleitungen weisen hohe NEXT-Werte auf.

#### Beispiel 1: NEXT-Wert berechnen

Bei einer Datenleitung wird am sendenden Adernpaar eine Spannung von 1 V gemessen. Am gestörten Adernpaar werden am nahen Ende 0,003 V Spannung gemessen. Berechnen Sie den NEXT-Wert.

$$\text{Lösung: } \text{NEXT} = \frac{20 \log 1 \text{ V}}{0,003 \text{ V}} = 50,5 \text{ dB}$$

Die Fernnebensprech-Dämpfung (FEXT von far-end-crosstalk) gibt das Nebensprechen bezogen auf das Leitungsende an. Der FEXT-Wert des Signals in dB sollte möglichst groß sein. Das in eine Leitung eingespeiste Signal ist am Leitungsende um die Kabeldämpfung verringert. Da die Kabeldämpfung den Störpegel dämpft, ist dieser am Ende des Kabels niedriger. Der FEXT-Wert ist somit auch längenabhängig. FEXT wird immer nur zwischen zwei Leiterpaaren gemessen.

#### Beispiel 2: FEXT-Wert berechnen

Bei einer Datenleitung wird am sendenden Adernpaar eine Spannung von 0,5 V gemessen. Am gestörten Adernpaar werden am fernen Ende 0,002 V Spannung gemessen. Berechnen Sie den FEXT-Wert.

$$\text{Lösung: } \text{FEXT} = 20 \log \frac{0,5 \text{ V}}{0,002 \text{ V}} = 47,95 \text{ dB}$$

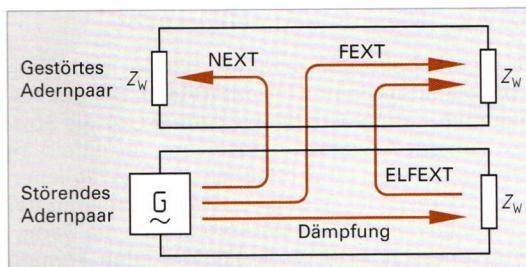


Bild 1: Prinzip LAN-Messen

$$\text{NEXT} = 20 \lg \frac{U_{1N}}{U_{2N}} [\text{dB}]$$

$$\text{FEXT} = 20 \lg \frac{U_{1N}}{U_{2F}} [\text{dB}]$$

$U_{1N}$	erzeugte Spannung am nahen Ende
$U_{2N}$	induzierte Spannung am nahen Ende
$U_{2F}$	induzierte Spannung am fernen Ende
Index 1	sendendes Adernpaar
Index 2	gestörtes Adernpaar

Tabelle 1: Messergebnisse Kabeltester

gemessenes Paar	Ende	Wert	Frequenz
7,8–3,6	NE	47,6 dB	250 MHz
7,8–5,4	NE	54,7 dB	226 MHz
7,8–1,2	NE	50,4 dB	200 MHz
7,8–3,6	FE	47,0 dB	249 MHz
7,8–5,4	FE	50,8 dB	220 MHz
7,8–1,2	FE	54,4 dB	210 MHz

FE = Far End, NE = Near End

### Aufgaben zu 12.2.1

- Bei einer Datenleitung wird am sendenden Adernpaar eine Spannung von 0,5 V gemessen, am gestörten Adernpaar am nahen Ende 0,001 V. Berechnen Sie den NEXT-Wert.
- Bei einer Datenleitung wird am sendenden Adernpaar eine Spannung von 1 V gemessen. Am gestörten Adernpaar werden am fernen Ende 0,001 V gemessen. Berechnen Sie den FEXT-Wert.
- Zwischen Adernpaar 1,2 und 7,8 wird gemäß Tabelle 1 gemessen. Berechnen Sie bei 1 V Spannung am sendenden Adernpaar a) die Spannung am nahen Ende, b) die Spannung am fernen Ende.
- Zwischen Adernpaar 3,6 und 7,8 wird gemäß Tabelle 1 gemessen. Berechnen Sie bei 0,5 V Spannung am sendenden Adernpaar a) die Spannung am nahen Ende, b) die Spannung am fernen Ende.

## 12.2.2 Messen und Fehlersuche

Büroverkabelungen erfolgen häufig nach dem Consolidation-Point-Konzept (**Bild 1**). Bei der Abnahmemessung wird beim Channel-Link die Strecke von der Arbeitsplatzdose zum Verteilfeld im Etagenverteiler einschließlich der beweglichen Kabel gemessen (**Bild 2**). Für die Beurteilung der Qualität einer Netzwerkstrecke dienen die Dämpfung und der ACR-Wert. Fehlerstellen können durch Laufzeitmessungen bestimmt werden.

$$ACR = NEXT - A$$

<b>ACR</b>	Signaldynamik in dB (ACR von Attenuation to Crosstalk Ratio)
<b>NEXT</b>	Nahnebensprechen in dB (NEXT von Near-End-Crosstalk)
<b>A</b>	Leitungsdämpfung in dB (A von attenuation)

$$l = 0,5 \cdot t \cdot c_0 \cdot k$$

<i>l</i>	Entfernung zur Fehlerstelle einer Datenleitung
<i>t</i>	Laufzeit des Testsignals (hin und zurück)
<i>k</i>	Verkürzungsfaktor
<i>c<sub>0</sub></i>	Lichtgeschwindigkeit $3 \cdot 10^8$ m/s

### Beispiel 1: ACR-Wert berechnen

Eine Netzwerkkarte hat bei  $f = 100$  MHz einen Dämpfungswert von 22 dB und einen NEXT-Wert von 32,3 dB. Berechnen Sie den ACR-Wert.

*Lösung:*

$$ACR = NEXT - A = 32,3 \text{ dB} - 22 \text{ dB} = 10,2 \text{ dB}$$

### Beispiel 2: Leitungslänge berechnen

Die Laufzeit eines Testsignals beträgt  $t = 0,23 \mu\text{s}$ . Das Netzwerk besitzt einen Verkürzungsfaktor von  $k = 0,7$ . Berechnen Sie die Leitungslänge  $l$  bis zur Fehlerstelle.

*Lösung:*

$$\begin{aligned} l &= 0,5 \cdot t \cdot c_0 \cdot k \\ &= 0,5 \cdot 0,23 \mu\text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 0,7 = 24,15 \text{ m} \end{aligned}$$

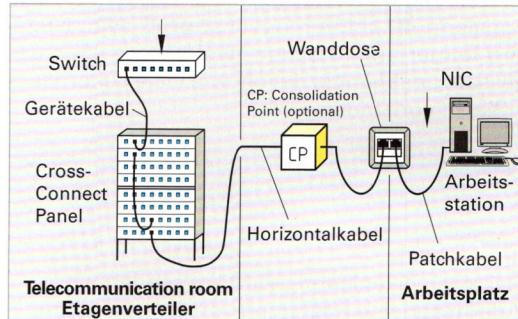


Bild 1: Netzwerkverkabelung nach dem CP-Konzept

## Aufgaben zu 12.2.2

- Berechnen Sie aus den Werten der **Tabelle 1** den ACR-Wert für die Klasse E bei 100 MHz.
- Bei einer Netzwerkverbindung Klasse E ergeben sich bei Messungen ein Dämpfungswert von 16,9 dB und ein NEXT-Wert von 43,4 dB bei 100 MHz. Erfüllen diese Werte die Anforderungen von **Tabelle 1**?
- Für die Link-Klasse F ergibt sich bei 100 MHz und 15 dB Dämpfung ein berechneter Wert von 57,5 dB. Wie groß war der NEXT-Wert?
- Im Prüfbericht einer Übertragungsstrecke (Channel) wurden als Grenzwerte bei 100 MHz für die Dämpfung 21,7 dB und für das Nahnebensprechen 39,9 dB angegeben. Bestimmen Sie a) den ACR-Wert, b) die Link-Klasse.
- Welchen Weg legt ein Testimpuls in einer Kabelverbindung mit einem Verkürzungsfaktor von 0,65 in einer Mikrosekunde zurück?
- Mit einem LAN-Messgerät wird die Laufzeit eines Prüfimpulses zur Fehlerstelle und zurück mit 0,433 µs gemessen. Der Verkürzungsfaktor beträgt 0,77. Wie weit ist die Fehlerstelle vom Messpunkt entfernt?

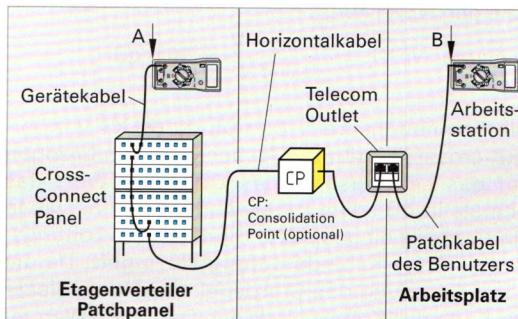


Bild 2: Messung des Übertragungskanals (Channel-Messung) von A nach B

**Tabelle 1: Eigenschaften von Verbindungsstrecken (Channel-Link)**

Link-Klasse	Klasse E	Klasse F
Frequenz in MHz	100	200
Dämpfung in dB	21,7	31,7
NEXT in dB	39,9	34,8
	62,9	56,9



## 2.3 Adressierung von Netzen

### 2.3.1 Internetadressierung IPv4

Pv4-Adressen sind binäre Zahlenfolgen. Sie bestehen aus 4 Gruppen zu je 8 Bit. Für die einfachere Eingabe und Ausgabe am PC werden die Gruppen in dezimaler Schreibweise dargestellt und durch Punkte getrennt (**Bild 1**). PCs arbeiten intern immer mit der dualen Darstellung. Die Anfangsbalkombinationen geben die Internetadressklassen an (**Tabelle 1**). Die Struktur des Internets ist durch die unterschiedliche Aufteilung in Netzadresse und PC-Adresse (Hostadresse) festgelegt.

Ahnlich der Ortsvorwahl einer Telefonnummer, wird im ersten Teil der IP-Adresse die Netzadresse angegeben, ihr folgt dann im zweiten Teil die Hostadresse (**Bild 2**). Die Aufteilung ist zunächst bei jeder Internetadressklasse unterschiedlich und fest vorgegeben. Weitere Unterteilungen der Adressräume sind durch Bildung von Subnetzen möglich.

Bei der Rundrufadresse (Broadcastadresse) sind alle Bits der Hostadresse auf 1 gesetzt. Bei der Netzadresse sind alle Hostadressbits auf 0 gesetzt.

Die Anzahl der verfügbaren Hostadressen ist um 2 Adressen reduziert.

#### Aufgaben zu 12.3.1

- Eine Internetadresse lautet 194.62.15.2 a) Wie lautet diese Adresse in dualer Darstellung? b) Zu welcher Internetadressklasse gehört sie? c) Kennzeichnen Sie bei der Adresse den Netzteil und den Hostteil.
- Die Netzwerkschnittstelle eines PCs soll mit der IP-Adresse 192.168.2.2 konfiguriert werden. a) Prüfen Sie nach, ob dies eine gültige Adresse ist. b) Bestimmen Sie die Broadcastadresse dieses Netzes.
- Berechnen Sie für die Internetklassen A, B und C die Anzahl der verfügbaren Adressen.
- Die Konfiguration eines Routers enthält die IP-Adresse 134.189.22.107. Bestimmen Sie a) die Netzadresse und b) die Broadcastadresse dieses Netzes. c) Geben Sie den verfügbaren Adressbereich dieses Netzes an. d) Prüfen Sie nach, ob sich die Rechneradresse 134.189.21.34 im gleichen Netz befindet.

$$H = 2^h - 2$$

H Anzahl der verfügbaren Hostadressen

h Anzahl der Hostbits aus der IP-Adresse

#### Beispiel 1: IP-Adresse analysieren

Die Netzwerkschnittstelle eines PCs ist konfiguriert mit der IP-Adresse 194.77.124.35. a) Wie lautet diese Adresse in dualer Schreibweise? b) Zu welcher Internetadressklasse gehört diese Adresse? c) Wie ist die Aufteilung der Netzadressbits und der Hostadressbits? d) Wie viele Hosts können in diesem Netz adressiert werden?

Lösung:

- 11000010.01001101.01111100.00100011 (**Bild 1**)
- Die ersten Bits der Adresse: 110... sind der Klasse C zugeordnet.
- In der Klasse C gehören die ersten 24 Bit zum Netzadressteil und die restlichen 8 Bit zum Hostadressteil.
- $H = 2^h - 2 = 2^8 - 2 = 254$   
Es können 254 Hosts adressiert werden.

Tabelle 1: Adressklassen im Internet

Klasse	Kennzeichnung der ersten Bit	Adressbereich des ersten Byte
A	0	0–127
B	10	128–191
C	110	192–223
D	1110	224–239
E	1111	240–255

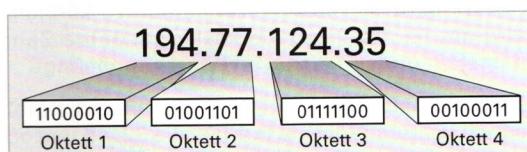


Bild 1: Punktierter-dezimale und duale Schreibweise von Internetadressen

Aufteilung für Klasse C

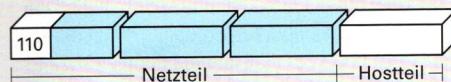


Bild 2: Aufteilung einer Klasse C IP-Adresse



### 12.3.2 Internetadressierung IPv6

Das Internet Protocol Version 6, IPv6, ist für die Vermittlung von Datenpaketen durch ein Netzwerk, die Adressierung von Netzknoten und -stationen, sowie die Weiterleitung von Datenpaketen zwischen Teilnetzen zuständig.

Eine IPv6-Adresse besteht aus 128 Bit. Dies ergibt  $2^{128}$  mögliche Adressen. Je 4 Bit werden als eine hexadezimale Zahl dargestellt (**Bild 1**).

Um die Schreibweise zu vereinfachen, können führende Nullen in den Blöcken wegfallen. Eine Folge von 8 oder mehr Nullen kann man einmalig durch zwei Doppelpunkte ("::") ersetzen.

#### Beispiel 1: Regeln für Adressen anwenden

Vereinfachen Sie die Schreibweise der gegebenen Adressen.

- 2001.0db8:0000:08d3:0000:8a2e:0070:7344
  - 2001:0db8:0:0:0:1428:57
  - 2001:0db8:0:0:8d3:0:0:0
- Lösung:*
- 2001.db8:0:8d3:0:8a2e:70:7344
  - 2001.db8::1428:57
  - 2001.db8:0:0:8d3:: oder 2001.db8::8d3:0:0:0

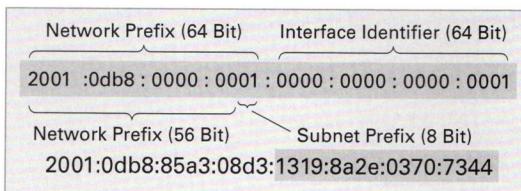


Bild 1: IPv6-Adressbeispiele

Die Netzmaske bzw. Subnetzmaske fällt bei IPv6 weg. Um trotzdem ein Aufteilung von Adressbereichen bzw. Subnetzen vornehmen zu können, wird an die Adresse eine Präfix genannte Zahl festgelegt und mit einem "/" (Slash) angehängt.

Standardmäßig ist "/64" die Präfixlänge. Es gibt jedoch weitere typische Präfixe, die 32, 48 und 56 Bit lang sind.

#### Aufgaben zu 12.3.2

- Vereinfachen Sie die folgende IPv6-Adressen:
  - 1080:0000:0000:0000:0007:0700:0003:316b
  - 2001:0db8:0000:0000:f065:00ff:0000:03ec
  - 2001:0db8:3c4d:0016:0000:0000:2a3f:2a4d
  - 2001:0c60:f0a1:0000:0000:0000:0001
  - 2111:00ab:0000:0004:0000:0000:0000:1234

#### Beispiel 2: Subnetze berechnen

Gegeben ist die Adresse 3FFA:FF2B:4D:A000::/51. Diese ist in 4 weitere Subnetze einzuteilen.

*Lösung:*

4 Subnetze  $\Rightarrow$  2 Bit, da  $2^2 = 4$

3FFA:FF2B:4D:A000::/51 entspricht

3FFA:FF2B:4D:A000:0000:/51

In Dualzahlen geschrieben: 0011 1111 1111 1010.

1111 1111 0010 1011 . 0000 0000 0100 1101 . 1010

0000 0000 0000 . 0000 0000 0000 0000 . /51

das existierende Netz /51 wird in 4 weitere Subnetze aufgeteilt, d.h. 2 Stellen nach rechts /53.

51 Bit als bisherige Grenze markiert mit \\  
0011 1111 1111 1010 . 1111 1111 0010 1011 . 0000 0000  
0100 1101 . 101//0000 0000 0000 0000 . 0000 0000  
0000 0000

Die folgenden 2 Bit werden 0 oder 1 gesetzt, es gibt 4 Subnetze:

101 00000 = A0 Beispiel von oben 8020 = 10 als hexadezimal A, danach Nullen also A0

101 01000 = A8 Beispiel von oben 8020 = 10 als hexadezimal A, danach 1000, also Bit 4 = 8 belegt, 8+0+0+0=8 also A8

101 10000 = B0 Beispiel von oben 8021 = 11 als hexadezimal B, danach Nullen also B0

101 11000 = B8 Beispiel von oben 8020 = 11 als hexadezimal B, danach 1000, also Bit 4 = 8 belegt, 8+0+0+0=8 also B8

Es gibt die Subnetze:

3FFA:FF2B:4D:A000::/53 3FFA:FF2B:4D:A800::/53

3FFA:FF2B:4D:B000::/53 3FFA:FF2B:4D:B800::/53

- Geben Sie alle Stellen der folgenden vereinfachten IPv6-Adressen an:
  - 2001::2:0:0:1
  - 2001:db8:0:c::1c
  - 1080::9956:0:0:234
  - 2001:638:208:ef34::91ff:0:5424
  - 2001:0:85a4::4a1e:370:7112
- Gegeben ist die Adresse 2001:db8:AAAA:BB00::/56. Diese soll in 4 gleich große Subnetze eingeteilt werden. Geben Sie jeweiligen Adressen der Subnetze an.
- Gegeben ist die Adresse 2001:db8:1234:0000::/52. Diese soll in 16 gleich große Subnetze eingeteilt werden. Geben Sie die jeweiligen Adressen der Subnetze an.



### 2.3.3 Subnetze

Subnetze ermöglichen die weitere Unterteilung der starren Internetadressklassen. Durch Subnetzmasken erkennt der Router, ob eine Nachricht im gleichen Subnetz bleibt oder zum nächsten Netz weitergeleitet (geroutet) werden muss. Die bitweise UND-Verknüpfung der IP-Adresse mit der Subnetzmaske ergibt die Netzadresse des Subnetzes (**Bild 1**). Ist ein Bit der Subnetzmaske gesetzt, wird das entsprechende Bit der IP-Adresse als Teil der Netzadresse angesehen.

Bei vollständigen Adressierung einer Netzwerkschnittstelle gehören IP-Adresse und die dazugehörige Subnetzmaske (**Bild 2**).

#### Beispiel 1: IP-Adressen berechnen

Die Netzwerkschnittstelle eines PCs ist wie in **Bild 2** konfiguriert. Bestimmen Sie a) die Netzadresse, b) die erste und letzte verfügbare Hostadresse des Subnetzes und c) die Broadcastadresse.

*Lösung:*

- a) Netzadresse = IP-Adresse & Subnetzmaske =  
...147.01111011.00010100 &  
...255.11111111.10000000 =  
...147.01111011.00000000 =  
**134.147.123.0 (Bild 1)**
- b)  $H = 2^h - 2 = 2^7 - 2 = 126$  Hosts  
134.147.123.1 bis 134.147.123.126
- c) 134.147.123.127

#### Aufgaben zu 12.3.3

1. Die Netzwerkschnittstelle eines Rechners ist konfiguriert mit der IP-Adresse 192.168.63.12 und der Subnetzmaske 255.255.255.0. Welche Netzadresse hat das Subnetz?
2. Berechnen Sie die Anzahl der adressierbaren Hosts für die Netzmasks a) 255.255.255.0 b) 255.255.0.0 c) 255.255.192.0 d) 255.255.255.252
3. Ermitteln Sie die erste und letzte verfügbare Hostadresse in einem Subnetz mit der Netzadresse 147.126.160.0 und der Subnetzmaske 255.255.224.0.
4. Vier Steuerungen, eine Visualisierungseinheit und ein Leitrechner werden für eine Produktionslinie benötigt. Alle Geräte sind über einen Switch verbunden. Mit welcher Subnetzmaske lassen sich gerade noch alle Geräte adressieren?

#### Klasse C Subnetzmaskierung:

$$HID = 256 - 2^x$$

$$x = \frac{\lg(h+2)}{\lg 2}$$

HID Host-Subnetzmaske (Host-Identifier)

h Anzahl der Hostrechner

[a] Aufrunden (von a) als Rechenvorschrift

x aufgerundete Hochzahl

Subnetz (134.147.123.0) mit Subnetz-Maske (255.255.255.0) 255.255.255.0															
2 <sup>7</sup>	2 <sup>6</sup>	2 <sup>5</sup>	2 <sup>4</sup>	2 <sup>3</sup>	2 <sup>2</sup>	2 <sup>1</sup>	2 <sup>0</sup>	2 <sup>7</sup>	2 <sup>6</sup>	2 <sup>5</sup>	2 <sup>4</sup>	2 <sup>3</sup>	2 <sup>2</sup>	2 <sup>1</sup>	2 <sup>0</sup>
128	64	32	16	8	4	2	1	128	64	32	16	8	4	2	1
0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Netzwerkadresse (9 Bit)								Hostadresse (7 Bit)							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Netzwerk  
Hosts: ...1..126  
Broadcast

**Bild 1:** Ermittlung von Subnetz-Adressmasken

Allgemein

IP-Einstellungen können automatisch zugewiesen werden, wenn das Netzwerk diese Funktion unterstützt. Wenden Sie sich andernfalls an den Netzwerkadministrator, um die geeigneten IP-Einstellungen zu beziehen.

IP-Adresse automatisch beziehen  
 Folgende IP-Adresse verwenden:

IP-Adresse:	134 . 147 . 123 . 20
Subnetzmaske:	255 . 255 . 255 . 128
Standardgateway:	134 . 147 . 123 . 1

**Bild 2:** Konfiguration einer Netzwerkschnittstelle

5. Eine Steuerung ist in einem Netzwerk eingebunden und mit der IP-Adresse 194.173.102.19 konfiguriert. Es werden 5 Bits der IP-Adresse zur Adressierung der Hosts benötigt.
- Wie lautet die Subnetzmaske?
  - Berechnen Sie die erste und die letzte verfügbare IP-Adresse.
6. Oft wird statt der Subnetzmaske die Anzahl der Subnetzbits mit einem Schrägstrich hinter die IP-Adresse geschrieben. Eine Maschinensteuerung soll in das Subnetz 210.255.0.224/28 eingebunden werden. Die unteren 12 IP-Adressen sind bereits vergeben. Ermitteln Sie die freien IP-Adressen.



### 12.3.4 Aufteilung in Subnetze

Netzadressen lassen sich in mehrere logische Einheiten (Subnetze) aufteilen (**Bild 1**). Die Größe und die Anzahl der Subnetze werden durch die Subnetzmaske festgelegt, die oft in verkürzter Form hinter die IP-Adresse geschrieben wird.

Die Subnetze können unterschiedlich groß sein. Dazu sind unterschiedliche Subnetzmasken (VLSM von variable-length subnet mask = längenveränderbare Subnetzmaske) erforderlich (**Tabelle 1**).

Das erste Subnetz enthält immer die Gesamt-netz-Adresse und das letzte Subnetz immer die Broadcastadresse des Gesamtnetzes. Beim älteren Standard RFC 950 muss auf diese beiden Subnetze verzichtet werden. Somit sind immer zwei Subnetze weniger als theoretisch möglich. Das hat zur Folge, dass mindestens 2 Subnetzbits zur Bildung von Subnetzen notwendig sind. Der neuere Standard RFC 1878 lässt eine Aufteilung über den kompletten Adressbereich zu.

#### Beispiel 1: Subnetze berechnen

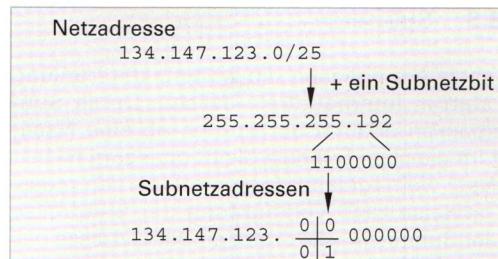
Die Netzwerkadresse 192.168.10.0/24 (/24 = 24 gesetzte Subnetzbits in der Subnetzmaske) soll in zwei Subnetze nach RFC 1878 aufgeteilt werden. Das erste Subnetz enthält 62 Netzwerkschnittstellen (Hosts) und das zweite Subnetz 25 Hosts. Geben Sie a) die Subnetzmasken, b) die Subnetzadressen, c) die erste und letzte Hostadresse je Subnetz und d) den nicht verwendeten Adressbereich an.

Lösung:

1. Subnetz: Anzahl der Hostbits  
 $H = 2^h - 2 \Rightarrow h = \lfloor b(H+2) \rfloor = 6$
2. Subnetz: Anzahl der Hostbits  
 $H = 2^h - 2 \Rightarrow h = \lfloor b(H+2) \rfloor = 4,75 \Rightarrow h = 5$
- a) 1. Subnetzmaske: 255.255.255.192 (**Tabelle 1**)  
2. Subnetzmaske: 255.255.255.224
- b) 1. Subnetzadresse: 192.168.10.0  
2. Subnetzadresse: 192.168.10.64
- c) 1. Subnetz: 192.168.10.1 bis 192.168.10.62  
2. Subnetz: 192.168.10.65 bis 192.168.10.94
- d) nicht verwendet: 192.168.10.96 bis 192.168.10.254

### Aufgaben zu 12.3.4

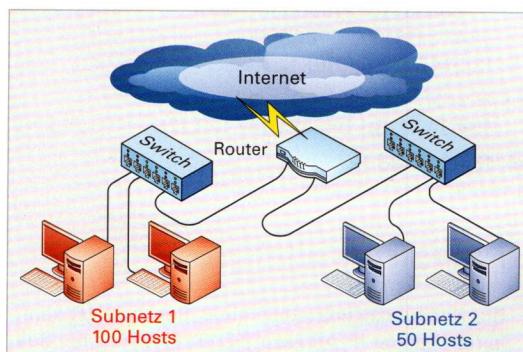
1. Wie viele Subnetze können mit 4 zusätzlichen Subnetzbits adressiert werden?
2. Das Klasse-C-Netz 192.168.10.0 soll vollständig in 4 gleichgroße Subnetze aufgeteilt werden. Geben Sie



**Bild 1:** Aufteilung einer Netzadresse in zwei Subnetze

**Tabelle 1: Erweiterung der Subnetzmaske**

... .255.	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Anzahl der Subnetzbits $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	
Dezimale Schreibweise	128	192	224	240	248	252	254	255	
Anzahl der Subnetze	2	4	8	16	32	64	128	255	



**Bild 2:** Firmennetzwerk

- a) die Subnetzmaske, b) die Anzahl der adressierbaren Hosts und c) die Subnetzadressen je Subnetz an.
3. Geben Sie für das kleinste noch sinnvolle Subnetz a) die Subnetzmaske und b) die Anzahl der möglichen Hosts an.
4. Das Netzwerk eines Unternehmens soll in zwei Subnetze aufgeteilt werden (**Bild 2**). Für das gesamte Firmennetz steht die Netzwerkadresse 134.212.32.0/16 zur Verfügung. Bestimmen Sie nach RFC 1878 die Subnetze und geben Sie die Subnetzadressen, die Subnetzmasken und die Hostadressbereiche an.

# 13 Regelungstechnik

## 13.1 Unstetige Regler

### Zweipunktregler

Zweipunktregler (ZPR) verändern die Stellgröße unstetig durch Schalten zwischen zwei Stufen (Bild 1). Sie bestehen z.B. aus Schaltkontakte oder elektronischen Kippschaltungen (Bild 2).

Ein Regler mit der Schaltdifferenz  $\Delta U_1$  schaltet die Stellgröße  $U_y$ , wenn die Regelgröße  $U_x$  die Schaltschwellen  $U_o$  oder  $U_u$  erreicht (Bild 1).

Meist folgt die Stellgröße der Regelgröße mit einer Verzugszeit  $T_e$ . Sie schwankt mit der Periodendauer  $T$  mit der Schwankungsbreite  $\Delta U_x$  um den Sollwert  $U_w$  (Bild 3). Ohne Regler würde die Regelgröße  $U_x$  und damit z.B. die Temperatur  $\vartheta$  des Thermostaten nach der Ausgleichszeit  $T_b$  einen Beharrungswert, z.B.  $U_{x\infty}$  annehmen.

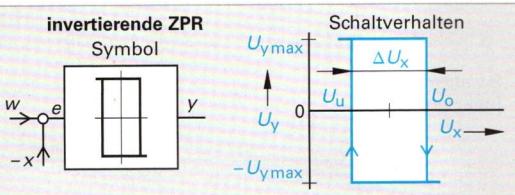


Bild 1: Schaltzeichen und Schaltdifferenz

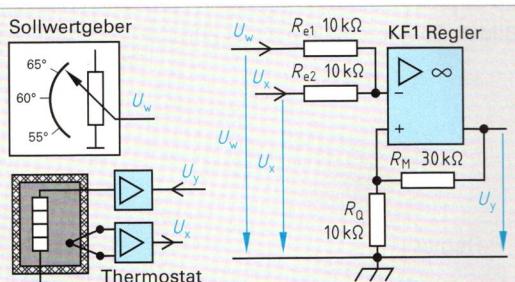


Bild 2: Thermostatregelung mit invertierendem ZPR

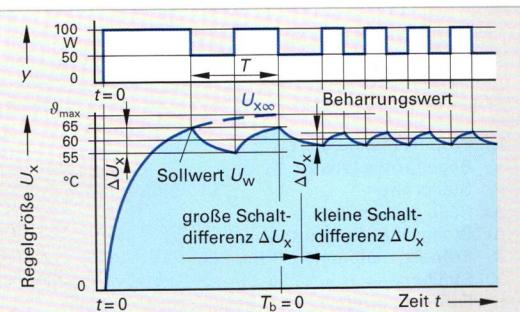


Bild 3: Regelvorgang der Thermostatregelung

Invertierender ZPR:

$$\Delta U_x = 4 \cdot \frac{R_Q}{R_M + R_Q} \cdot U_{y\max}$$

$$U_o = \frac{2 \cdot R_Q}{R_M + R_Q} \cdot U_{y\max} - U_w$$

$$U_u = \frac{-2 \cdot R_Q}{R_M + R_Q} \cdot U_{y\max} - U_w$$

Nichtinvertierender ZPR:

$$\Delta U_x = 2 \cdot \frac{R_{e1}}{R_K} \cdot U_{y\max}$$

$$U_o = \frac{R_{e1}}{R_K} \cdot U_{y\max} - U_w$$

$$U_u = -\frac{R_{e1}}{R_K} \cdot U_{y\max} - U_w$$

$U_b$	Betriebsspannung
$U_o, U_u$	Schaltspannungen (o oben, u unten)
$\Delta U_x$	Schaltdifferenz, Hysteresis
$U_w$	Sollwert
$U_x$	Regelgröße
$U_{x\infty}$	Beharrungswert der Regelgröße
$U_{y\max}$	Ausgangsspannung
$R_K$	Rückkopplungswiderstand
$R_{e1}, R_{e2}$	Eingangswiderstände
$R_M$	Mitkopplungswiderstand
$R_Q$	Querwiderstand

### Beispiel 1: Invertierender Zweipunktregler

Der Regler Bild 2 arbeitet mit  $U_w = -4 \text{ V}$  und  $U_b = U_{y\max} = \pm 12 \text{ V}$ . a) Berechnen Sie die Schaltschwellen  $U_o$ ,  $U_u$  und  $\Delta U_x$ . b) Zeichnen Sie die Kennlinie  $U_y = f(U_x)$ .

Lösung:

$$\begin{aligned} a) U_o &= \frac{2 R_Q}{R_M + R_Q} \cdot U_{y\max} - U_w \\ &= \frac{2 \cdot 10 \text{ k}\Omega}{30 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \cdot 12 \text{ V} + 4 \text{ V} = 10 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_u &= \frac{-2 R_Q}{R_M + R_Q} \cdot U_{y\max} - U_w \\ &= \frac{-2 \cdot 10 \text{ k}\Omega}{30 \text{ k}\Omega + 10 \text{ k}\Omega} \cdot 12 \text{ V} + 4 \text{ V} = -2 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_x &= 4 \cdot \frac{R_Q}{R_M + R_Q} \cdot U_{y\max} \\ &= 4 \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{30 \text{ k}\Omega + 10 \text{k}\Omega} \cdot 12 \text{ V} = 6 \text{ V} \end{aligned}$$

### ■ Beispiel 1: Invertierender Zweipunktregler

Lösung:

b) Siehe Lösungsbuch

Zweipunktregler können auch als nicht invertierende Schaltung ausgeführt werden (**Bild 1**). Zur Einstellung der Schaltdifferenz (Hysterese) wird der Rückkopplungswiderstand als Reihenschaltung eines Potenziometers mit einem Festwiderstand ausgeführt.

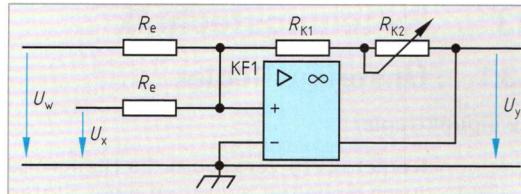
### Aufgaben zu 13.1

- Ein invertierender Zweipunktregler (**Bild 2**, vorhergehende Seite) hat die Sollspannung  $U_w = -6 \text{ V}$  und wird mit  $U_b = U_{y\max} = \pm 15 \text{ V}$  versorgt. a) Berechnen Sie  $U_u$  und  $\Delta U_x$ . b) Zeichnen Sie die Kennlinie  $U_y = f(U_x)$ .
- Ein nicht invertierender Zweipunktregler (**Bild 1**) ist mit  $R_e = 10 \text{ k}\Omega$  und  $R_K = 30 \text{ k}\Omega$  beschaltet. Berechnen Sie a) die Schaltdifferenzen  $U_0$ ,  $U_u$  und b) die Schaltdifferenz  $\Delta U_x$  für  $U_w = 4 \text{ V}$  und  $U_b = U_{y\max} = \pm 15 \text{ V}$ .
- Ein nicht invertierender Zweipunktregler hat die Daten: Potenziometer  $R_K = 33 \text{ k}\Omega$  in Reihe mit einem Festwiderstand von  $33 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{e1} = R_{e2} = 10 \text{ k}\Omega$ . Berechnen Sie die möglichen Schaltdifferenzen  $\Delta U_x$ .
- Bei einem nicht invertierenden ZPR wird der Rückkopplungswiderstand  $R_K$  hochohmig. a) Welche Werte nehmen die Schaltdifferenzen an? b) Wie groß wird die Schaltdifferenz?
- Ein Tauchbad für das Aluminieren von Blechen verwendet einen Messwandler mit linearer Kennlinie, der bei einer Temperatur von  $100^\circ\text{C}$  die Spannung  $1 \text{ V}$  abgibt. a) Entnehmen Sie den unteren und den oberen Temperaturwert des ZPR (**Bild 2**). b) Wie groß ist der verwendete Sollwert? c) Welche Schaltdifferenz (Hysterese) weist der Regler auf? d) Ermitteln Sie die Einschaltzeit  $t_i$  und die Pausenzeiten  $t_p$  im stationären Zustand (**Bild 2**). e) Zeichnen Sie anhand Bild 2 ein Diagramm für die Schaltzustände mit der Einschaltzeit  $t_i$  und der Pausenzeiten  $t_p$ .

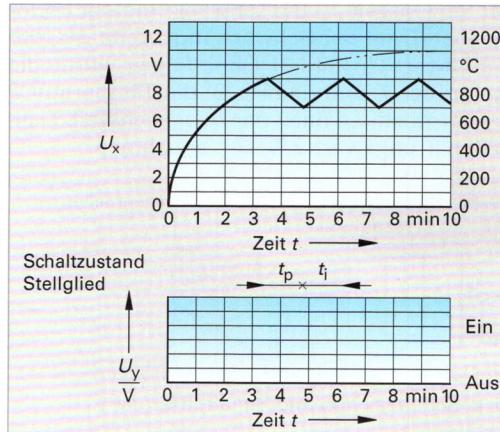
## 13.2 Stetige Regler

### 13.2.1 P-Regler

Bei einem P-Regler besteht im Beharrungszustand ein linearer (proportionaler) Zusammenhang zwischen der Regelgrößenänderung  $\Delta x$  und der Stellgrößenänderung  $\Delta y$  (**Bild 1**, Seite 223). Das Verhältnis  $\Delta y / \Delta x$  entspricht dem Proportionalbeiwert  $K_p$ .



**Bild 1:** Nicht invertierender Zweipunktregler



**Bild 2:** Schaltverhalten eines ZPR

P-Regler:

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$K_p = \frac{Y_h}{X_p}$$

$$e = w - x$$

$$\Delta y = -K_p \cdot e$$

$K_p$  Proportionalbeiwert

$x$  Regelgröße; Istwert

$y$  Stellgröße

$\Delta x$  Regelgrößenänderung

$\Delta y$  Stellgrößenänderung  $y_0 - y$

$X_p$  Proportionalbereich, P-Bereich

$Y_h$  Stellbereich

$w$  Führungsgröße

$e$  Regeldifferenz

### Aufgaben zu 13.2.1

Der Verstärkungsfaktor eines P-Reglers beträgt  $2 \text{ min} \cdot \text{mm}$ , der Stellbereich  $40 \text{ mm}$ . Berechnen Sie den P-Bereich.

Der P-Bereich eines Drehzahlreglers beträgt  $80/\text{min}$ , der Stellbereich  $200 \text{ mm}$ . Der Skalenbereich beträgt  $240/\text{min}$ . a) Wie groß ist der Übertragungsbeiwert des P-Reglers? b) Wie groß ist der P-Bereich in Prozent vom Skalenbereich?

Bei einer Flüssigkeitsstandsregelung (**Bild 2**) soll die Sollhöhe  $w = 250 \text{ mm}$  im Behälter betragen. Bei konstantem Durchfluss beträgt die Ausgangsstellung des Stellgliedes  $y_0 = 20 \text{ mm}$ . Der Regler ist auf  $l_1 = 40 \text{ mm}$  und  $l_2 = 120 \text{ mm}$  eingestellt. Durch Störeinfluss (Abfluss) sinkt der Flüssigkeitsspiegel auf  $x = 245 \text{ mm}$ .  
a) Wie groß ist die Regelabweichung  $e$ ? b) Welchen Wert  $y$  hat jetzt das Stellglied?

Bei der Flüssigkeitsstandsregelung **Bild 2**, mit  $l_1 = 40 \text{ mm}$  und  $l_2 = 120 \text{ mm}$  soll durch Verringerung der Abflussmenge der Flüssigkeitsstand auf die Isthöhe  $x_i = 255 \text{ mm}$  ansteigen. a) Berechnen Sie die Regelabweichung  $e$ ? b) Welche neue Stellung  $y$  hat das Stellglied, wenn  $y_0 = 20 \text{ mm}$  ist?

Die Regeldifferenz  $e$  der Flüssigkeitsstandsregelung **Bild 2**, beträgt  $1\%$  der Sollhöhe von  $250 \text{ mm}$ . Sie soll eine Stellgliedverstellung von  $80\%$  der Ausgangsstellung von  $y_0 = 20 \text{ mm}$  hervorrufen. Wie groß ist der Proportionalbeiwert  $K_p$ ?

Der Proportionalbeiwert des P-Reglers der Flüssigkeitsstandsregelung **Bild 2**, ist auf  $K_p = 8$  eingestellt. Das Stellglied wird auf  $y = y_n = 40 \text{ mm}$  aus der Ausgangsstellung  $y_0 = 20 \text{ mm}$  voll geöffnet. Wie groß ist die Regelabweichung  $e$ ?

Ein P-Regler **Bild 3** ist mit  $R_K = 50 \text{ k}\Omega$  und  $R_e = 10 \text{ k}\Omega$  beschaltet. Der Sollwert beträgt  $U_w = 4 \text{ V}$ . Berechnen Sie als Stellgröße die Ausgangsspannung  $U_y$ , wenn der Istwert a)  $U_x = -2 \text{ V}$ , b)  $U_i = -6 \text{ V}$  beträgt.

Bestimmen Sie die Eingangswiderstände  $R_e$  des P-Reglers **Bild 3**, wenn  $R_K = 27 \text{ k}\Omega$ ,  $U_w = 3 \text{ V}$ ,  $U_x = -2 \text{ V}$  und  $U_a = -5 \text{ V}$  sind.

Der P-Regler **Bild 3** hat mit  $R_K/R_e = 8,5$  beim Sollwert  $U_w = 5 \text{ V}$  eine Ausgangsspannung  $U_y = 12 \text{ V}$ . Wie groß ist der Istwert  $U_i$ ?

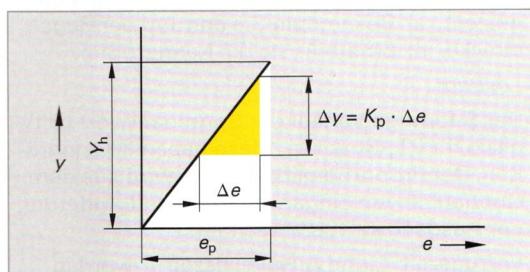
Der volle Stellbereich des P-Reglers **Bild 3** soll  $U_y = \pm 12 \text{ V}$  betragen. Der P-Bereich, innerhalb dem der Istwert sich bewegen darf, soll  $\pm 40\%$  bezogen auf den Sollwert  $U_w = 4 \text{ V}$  betragen. Berechnen Sie die Kenngrößen  $R_K/R_e$  des P-Reglers.

### Beispiel 1: Proportionalbeiwert berechnen

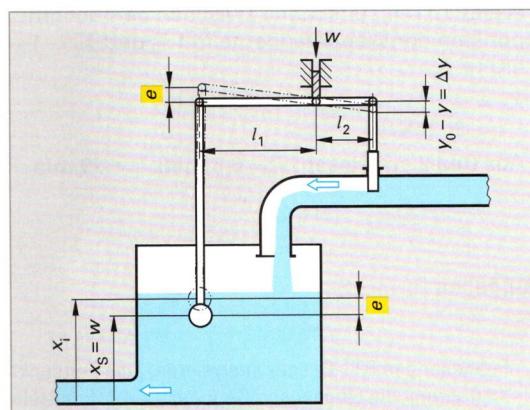
Der P-Bereich eines Drehzahlreglers beträgt  $30/\text{min}$ , der Stellbereich  $45 \text{ mm}$ . Der Skalenbereich (Übertragungskoeffizient) beträgt  $200/\text{min}$ . Berechnen Sie den Proportionalbeiwert  $K_p$ .

Lösung:

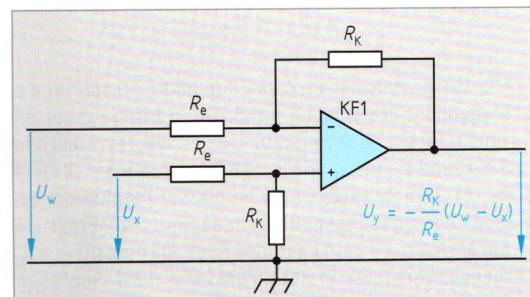
$$K_p = \frac{Y_h}{X_p} = \frac{45 \text{ mm}}{30/\text{min}} = 1,5 \text{ min} \cdot \text{mm}$$



**Bild 1:** Kennlinie eines P-Reglers



**Bild 2:** Flüssigkeitsstandsregelung



**Bild 3:** Elektronischer P-Regler

## 13.2.2 Analyse von Regelstrecken

Vor dem Reglerentwurf wird die Regelstrecke analysiert. Aus der Sprungantwort werden der Streckentyp und die Kenngrößen ermittelt.

### Beispiel 1: Heizung eines Ölbads

Die Heizung mit einer Heizleistung  $P = 2 \text{ kW}$  wird zum Zeitpunkt  $t = 0$  eingeschaltet. Die Temperatur des Ölbads steigt wie in Bild 1 dargestellt. a) Bestimmen Sie den Typ der Regelstrecke. b) Ermitteln Sie die Kenngrößen.

**Lösung:**

Der S-förmige Verlauf der Sprungantwort ist typisch für  $\text{PT}_n$ -Strecken. Diese haben 3 Kenngrößen. Der Proportionalbeiwert  $K_p$  wird aus dem Quotienten von Eingangssprung und Änderung der Ausgangsgröße berechnet.

Verzugszeit  $T_e$  und Ausgleichszeit  $T_b$  werden mithilfe der Wendetangente grafisch ermittelt. Die Zeitspanne von  $t = 0$  bis zum Schnittpunkt der Wendetangente mit der Temperatur  $T_0$  ergibt  $T_e$ . Die Zeitspanne zwischen den Schnittpunkten der Wendetangente mit  $T_0$  und  $T_\infty$  ergibt  $T_b$ .

$$K_p = \frac{\Delta x}{\Delta y} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = 180 \text{ K}/2 \text{ kW} = 90 \text{ mK/W}$$

Aus Bild 2 abgelesen:  $T_e = 6,5 \text{ min}$ ;  $T_b = 39 \text{ min}$

## Aufgaben zu 13.2.2

1. P-Glieder und  $\text{PT}_t$ -Glieder analysieren. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  springt die Eingangsgröße  $y$  von 0 auf 2. Ermitteln Sie aus Bild 3 a) die Proportionalbeiwerte  $K_p$  für die Sprungantworten  $x_A$  und  $x_B$ , b) die Proportionalbeiwerte  $K_p$  und die Totzeiten  $T_t$  für die Sprungantworten  $x_C$  und  $x_D$ .
2.  $\text{PT}_1$ -Glied analysieren. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  springt die Eingangsgröße  $y$  von 0 auf 5. Die Sprungantworten sind in Bild 1, nächste Seite, dargestellt. a) Ermitteln Sie  $x_0$  und  $x_\infty$  für  $x_E$  und  $x_F$ . b) Berechnen Sie  $\Delta x$  und  $K_p$ . c) Zum Zeitpunkt  $t = \tau$  ist die Sprungantwort um  $0,63 \cdot \Delta x$  angestiegen. Berechnen Sie  $x_\tau$ . d) Ermitteln Sie grafisch die Zeitkonstante  $\tau$ . e) Sprungantwort  $x_G$  reagiert verzögert. Ermitteln Sie für  $x_G$  die Kenngrößen  $K_p$ ,  $\tau$  und  $T_t$ . f)  $y$  springt zum Zeitpunkt  $t = 1 \text{ s}$  von 0 auf 2. Skizzieren Sie die veränderten Zeitverläufe.

$$K_p = \frac{\Delta x}{\Delta y}$$

$$T_{tE} = T_t + T_e$$

$$K_I = \frac{\Delta x}{y \cdot \Delta t}$$

$$T_I = \frac{1}{K_I}$$

$T_e$ ;  $\tau$ ;  $T_e$ ;  $T_b$  werden grafisch aus der Sprungantwort ermittelt.

x Regelgröße

$T_t$

Totzeit

y Stellgröße

$T_{tE}$

Ersatztotzeit

$K_p$  Proportionalbeiwert

$\tau$

Zeitkonstante

$K_I$  Integralbeiwert

$T_e$

Verzugszeit

$T_I$  Integrierzeit

$T_b$

Ausgleichszeit

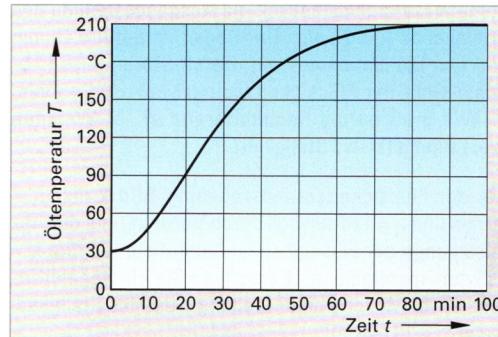


Bild 1: Temperaturverlauf Ölbad

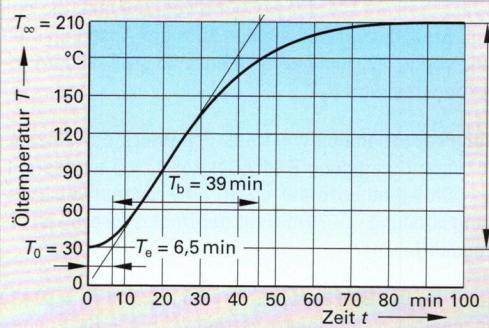


Bild 2: Ermittlung der Kenngrößen

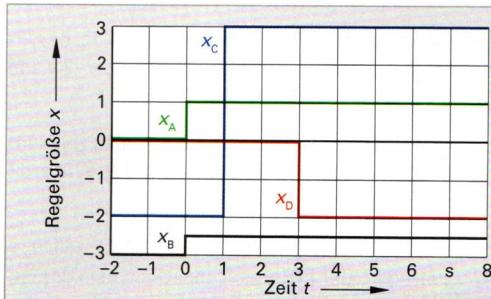


Bild 3: Sprungantworten von P-Gliedern und  $\text{PT}_t$ -Gliedern

Skizzieren Sie die Sprungantwort einer Regelstrecke höherer Ordnung a)  $K_p = 2$ ,  $T_e = 5 \text{ ms}$ ,  $T_b = 25 \text{ ms}$ . Der Eingang springt von 0 auf 1, zur Zeit  $t = 0$  beträgt die Regelgröße  $x = 0$ . b)  $K_p = -5$ ,  $T_e = 10 \text{ s}$ ,  $T_b = 1,5 \text{ min}$ . Der Eingang springt von 0 auf 2, zur Zeit  $t = 0$  beträgt die Regelgröße  $x = 10$ .

In Bild 2 werden die Zeitverläufe des Luftdrucks (Überdruck) in zwei verschiedenen Leitungssystemen dargestellt. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird ein Kompressor zugeschaltet ( $\Delta y = 1$ ). a) Ermitteln Sie  $p_0$  und  $p_\infty$ . b) Berechnen Sie  $\Delta p$  und  $K_p$ . c) Bestimmen Sie grafisch  $T_e$  und  $T_b$ . d) Welche Änderungen müssen im Diagramm vorgenommen werden, um den Druck  $p_1(t)$  absolut darzustellen?

In Bild 3 ist der Zeitverlauf des Füllstands  $h_1(t)$  eines Wasserbehälters dargestellt. Zur Zeit  $t = 0$  öffnet ein pneumatisch betätigter Schieber von 0 auf 100%. a) Lesen Sie aus Bild 3 ab, um wie viel der Füllstand in 10 Minuten steigt. b) Bestimmen Sie den Integralbeiwert  $K_I$  und die Integrierzeit  $T_I$ . c) Bestimmen Sie die Zeitverzögerung  $\tau$  des Anlaufs der Pumpe.

In Bild 3 ist der Zeitverlauf des Füllstands  $h_2(t)$  eines Wasserbehälters dargestellt. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  startet der Pumpenmotor ( $\Delta y = 100\%$ ). Der Füllvorgang wird durch das Anlaufverhalten der Pumpe verzögert. a) Lesen Sie ab, um wie viel der Füllstand nach vollständigem Anlauf in 10 Minuten steigt. b) Bestimmen Sie den Integralbeiwert  $K_I$  und die Integrierzeit  $T_I$ . c) Bestimmen Sie die Zeitverzögerung  $\tau$  des Anlaufs der Pumpe.

In Tabelle 1 sind für drei Strecken unterschiedlichen Typs Messwerte der Sprungantworten eingetragen. Skizzieren Sie deren Zeitverlauf. Bestimmen Sie mithilfe der Sprungantworten Typ und Kenngrößen der Strecken. Die Eingangsgrößen springen zur Zeit  $t = 0$  bei Strecke a) von 0 auf 4 kW; bei Strecke b) von 0 auf  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ; bei Strecke c) von 0 auf 10 V.

Tabelle 1: Messwerte verschiedener Strecken

$t \text{ in s}$	a) $v \text{ in m/s}$	b) $T \text{ in K}$	c) $h \text{ in m}$
0	0	300,0	0
1	0,221	300,4	0
2	0,393	303,4	0
3	0,528	309,6	0
4	0,632	317,6	0,15
5	0,713	326,0	0,30
6	0,777	333,5	0,45
7	0,826	339,9	0,60
8	0,865	345,0	0,75
9	0,895	348,9	0,90
10	0,918	351,9	1,05
12	0,950	355,7	1,35
14	0,970	357,8	1,65
16	0,982	358,8	1,95
18	0,989	359,4	2,25
20	0,993	359,7	2,55
30	1	360	4,05

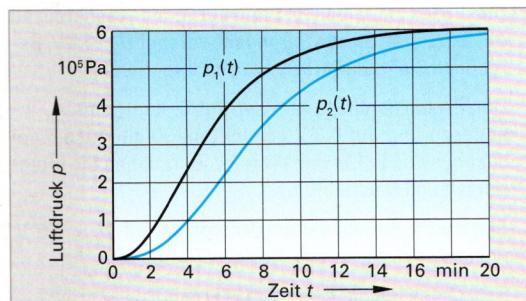


Bild 2: Luftdruck in zwei Leitungssystemen

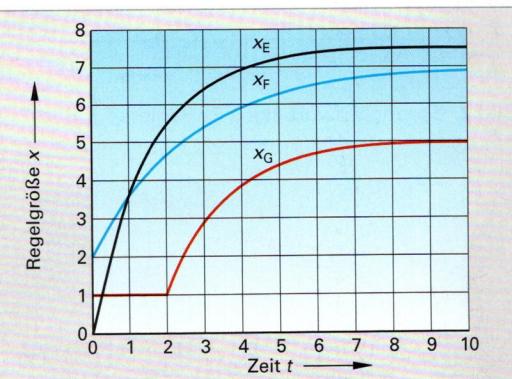
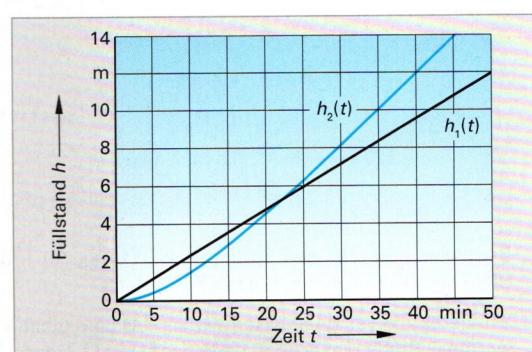
Bild 1: Sprungantworten von  $PT_1$ -Gliedern

Bild 3: Füllstand Wasserbehälter

### 13.2.3 PI-Regler

Der PI-Regler wird vorwiegend bei Strecken höherer Ordnung für Führungsregelungen verwendet. Der P-Anteil sorgt bei Änderungen der Führungsgröße für schnelles Reagieren, der I-Anteil für vollständiges Ausregeln der Regelgröße (**Bild 1**).

#### Beispiel 1: PI-Regler-Kennwerte bestimmen

In **Bild 2** ist die Antwort eines PI-Reglers auf einen Eingangssprung auf 1 V dargestellt.

- a) Bestimmen Sie  $K_p$ ,  $T_i$  und  $K_I$ ,  $T_I$ . b) Berechnen Sie den Wert des Reglerausgangs nach 4 s. c) Der Reglerausgang ist auf 10 V begrenzt. Nach welcher Zeit wird dieser Wert erreicht?

*Lösung:*

- a)  $K_p = U_{m0}/U_e = 1,4 \text{ V}/1 \text{ V} = 1,4$   
 $T_i = t(U_m = 2 \cdot U_{m0}) = 0,8 \text{ s}$   
 $K_I = K_p/T_i = 1,4/0,8 \text{ s} = 1,75/\text{s}$   
 $T_I = T_i/K_p = 1/K_I = 0,57143 \text{ s}$
- b)  $U_m = U_e (K_p + K_I \cdot t) = 8,4 \text{ V}$
- c)  $t = (U_m/U_e - K_p)/K_I = 4,9143 \text{ s}$

$$T_i = \frac{K_p}{K_I}$$

$$T_i = K_p \cdot T_I$$

$$K_p = \frac{R_K}{R_e}$$

$$T_i = R_K \cdot C_K$$

Reglergleichung:

$$U_m = K_p \left( U_e + \frac{1}{T_i} \int U_e dt \right)$$

Sprungantwort:

$$U_m = U_0(K_p + K_I \cdot t)$$

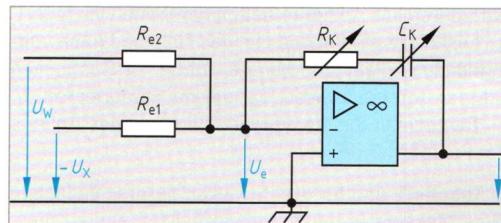
$K_I$	Integrierbeiwert	$U_e$	Regeldifferenzspannung
$K_p$	Proportionalbeiwert	$U_m$	Reglerausgangsspannung
$T_i$	Nachstellzeit	$C_K$	Rückkopplungskapazität
$T_I$	Integrierzeit	$R_K$	Rückkopplungswiderstand
$U_w$	Sollwertspannung	$R_e$	Eingangswiderstand
$U_x$	Istwertspannung		
$U_0$	Eingangssprung		

### Aufgaben zu 13.2.3

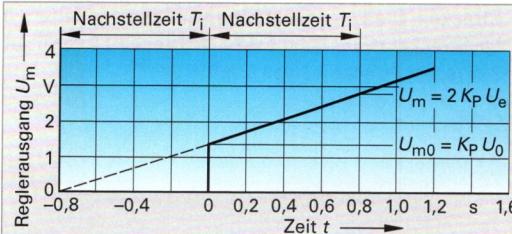
- Der Proportionalbeiwert beträgt 3, die Nachstellzeit 4 s. Skizzieren Sie die Sprungantwort auf  $U_e = 0,8 \text{ V}$ . Berechnen Sie Integrierbeiwert und Integrationszeit.
- Der Proportionalbeiwert beträgt 5, nach einem Eingangssprung auf 0,3 V erreicht die Reglerausgangsspannung nach 13 s den Wert 8 V. Berechnen Sie Integrierzeit und Nachstellzeit.
- Skizzieren Sie die Sprungantworten auf  $U_e = 0,5 \text{ V}$ , wenn  $R_e = 75 \text{ k}\Omega$ ,  $R_K = 0,45 \text{ M}\Omega$ ,  $C_K = 100 \text{ nF}$ .
- Berechnen Sie die fehlenden Werte.

	a)	b)	c)	d)	e)	f)
$K_p$	2	2,5				8
$T_i$		4 s	20 ms			
$K_I$	3/s				80/s	
$T_I$		0,05 s	400 ms			
$R_e$	80 k $\Omega$		0,1 M $\Omega$	20 k $\Omega$		
$R_K$	120 k $\Omega$		0,5 M $\Omega$	600 k $\Omega$		
$C_K$		220 nF		25 nF	0,5 $\mu\text{F}$	

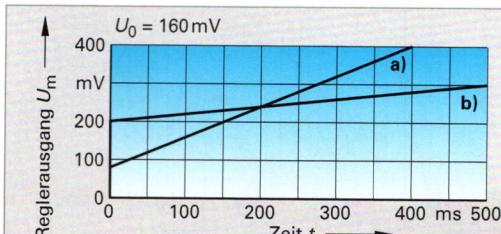
- Bestimmen Sie aus den Sprungantworten a), b) in **Bild 3** sämtliche Kenngrößen des PI-Reglers.
- Skizzieren Sie den geänderten Verlauf der Sprungantworten in **Bild 3**, wenn a)  $K_p$  verdoppelt; b)  $T_i$  verdoppelt; c) gleichzeitig  $K_p$  halbiert und  $T_i$  verdreifacht wird.



**Bild 1:** PI-Regler mit Operationsverstärker



**Bild 2:** Sprungantwort eines PI-Reglers für Bild 1



**Bild 3:** Sprungantworten PI-Regler

### 3.2.4 PDT<sub>1</sub>-Regler und PD-Regler

Die Regler werden vorwiegend bei Strecken ohne Ausgleich verwendet. Da ein I-Anteil in der Strecke enthalten ist, kann der P-Regler vollständig ausregeln. Durch den D-Anteil reagiert der Regler schneller. Dieser D-Anteil lässt sich nicht verzögerungsfrei realisieren. Deshalb muss bei realen PD-Reglern eine Zeitkonstante  $T_1$  berücksichtigt werden.

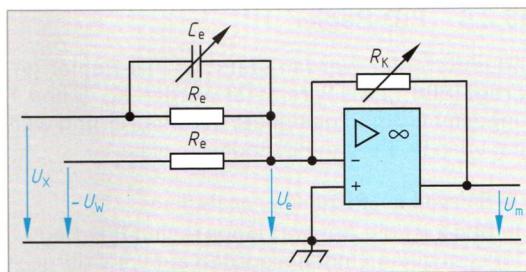


Bild 1: PD-Regler mit Operationsverstärker

#### Beispiel 1: Regelgrößen berechnen

In Bild 2 links ist die Antwort eines realen PDT<sub>1</sub>-Reglers auf einen Eingangssprung auf 0,5 V dargestellt. a) Bestimmen Sie  $K_p$ ,  $T_d$  und  $K_D$ . b) Berechnen Sie den Wert des Reglerausgangs nach 0,4 s. c) Der Reglerausgang ist auf 10 V begrenzt. Bei welcher Vorhaltverstärkung  $a$  wird dies erreicht? d) Der Regler soll mit einem OP Bild 1 realisiert werden. Berechnen Sie  $R_K$  und  $C_e$ . Der Eingangswiderstand beträgt  $R_e = 270 \text{ k}\Omega$ .

Lösung:

a)  $K_p = U_{m\infty} / U_0 = 1 \text{ V} / 0,5 \text{ V} = 2$

$$T_d = T_1 \cdot a = T_1 \cdot U_{m0} / U_{m\infty} = 0,25 \text{ s} \cdot 4 \text{ V} / 1 \text{ V} = 1 \text{ s}$$

$$K_D = K_p \cdot T_d = 2 \cdot 1 \text{ s} = 2 \text{ s}$$

b)  $U_m = K_p U_0 \left(1 + (a - 1) e^{-\frac{t}{T_d/a}}\right) = 1,6 \text{ V}$

c)  $a = U_{m0} / U_{m\infty} = 10 \text{ V} / 1 \text{ V} = 10$

d)  $R_K = K_p \cdot R_e = 2 \cdot 270 \text{ k}\Omega = 540 \text{ k}\Omega$

$$C_e = T_d / R_e = 1 \text{ s} / 540 \text{ k}\Omega = 1,852 \mu\text{F}$$

#### Aufgaben zu 13.2.4

Ein PDT<sub>1</sub>-Glied ist eingestellt auf  $K_p = 2,5$ ;  $T_d = 4 \text{ s}$ ;  $a = 5$ . Die Eingangsspannung springt auf 0,4 V. Berechnen Sie die Spannung am Reglerausgang bei  $t = 0; 0,1 \text{ s}; 0,5 \text{ s}; 0,8 \text{ s}; 1,6 \text{ s}; 2,4 \text{ s}; 4 \text{ s}$ . Skizzieren Sie den Zeitverlauf der Sprungantwort.

Berechnen Sie  $K_p$ ,  $T_d$  und  $K_D$ , wenn  $R_e = 75 \text{ k}\Omega$ ,  $R_K = 0,15 \text{ M}\Omega$ ,  $C_e = 100 \text{ nF}$ . Skizzieren Sie die Sprungantwort auf  $U_0 = 0,8 \text{ V}$  für die Zeit von 8 ms. Die Vorhaltverstärkung wird mit  $a = 4$  angenommen.

Bestimmen Sie aus den Sprungantworten in Bild 3 sämtliche Kenngrößen der PDT<sub>1</sub>-Regler.

Skizzieren Sie geänderten Verlauf der Sprungantwort in Bild 3 (Kurve a), wenn a)  $K_p$  verdoppelt; b)  $T_d$  verdoppelt; c) gleichzeitig  $K_p$  halbiert und  $T_d$  verdreifacht wird?

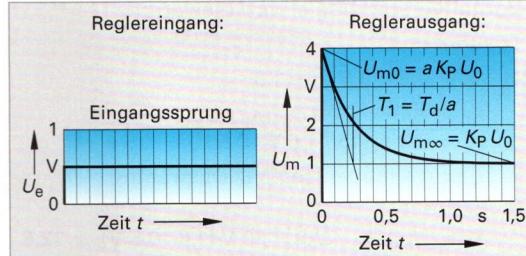


Bild 2: Sprungantwort eines PDT<sub>1</sub>-Glieds

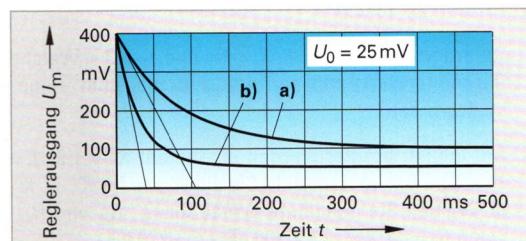


Bild 3: Sprungantworten realer PDT<sub>1</sub>-Regler

$$T_D = T_d \cdot K_p$$

$$T_d = T_1 \cdot a$$

$$T_d = R_e \cdot C_e$$

$$K_p = \frac{U_{m\infty}}{U_0}$$

$$K_p = \frac{U_{m0}}{a \cdot U_0}$$

$$K_p = \frac{R_K}{R_e}$$

Sprungantwort realer PDT<sub>1</sub>-Regler:

$$U_m = K_p U_0 \left(1 + (a - 1) e^{-\frac{a \cdot t}{T_d}}\right)$$

$K_D$	Differenzierbeiwert
$K_p$	Proportionalbeiwert
$T_d$	Vorhaltezeit
$T_D$	Differenzierzeit
$T_1$	Verzögerungszeit
$U_w$	Sollwertspannung
$U_x$	Istwertspannung
$U_0$	Eingangsspannung
$C_e$	Eingangskapazität

$R_e$	Eingangswiderstand
$U_e$	Regeldifferenzspannung
$U_m$	Reglerausgangsspannung
$R_K$	Rückkopplungswiderstand
$a$	Vorhaltverstärkung

### 13.2.5 PID-Regler

Industrierelager werden stets als PID-Regler gefertigt (**Bild 1**). Als Parameter werden  $K_p$ ,  $T_d$  und  $T_i$  eingestellt. Durch geeignete Parametrierung werden auch P-, PI- und PD-Regler realisiert.

#### Beispiel 1: PID-Regler analysieren

In **Bild 2** ist die Antwort eines realen PID-Reglers auf einen Eingangssprung auf 0,5 V dargestellt. a) Bestimmen Sie  $K_p$ ,  $T_d$ ,  $T_i$ . b) Der Reglerausgang ist auf 10 V begrenzt. Bei welcher Vorhaltverstärkung  $a$  wird dies erreicht?

*Lösung:*

$$a) K_p = 0,8 \text{ V}/0,5 \text{ V} = 1,6$$

$$T_d = T_i/a = T_i \cdot U_{m0}/(K_p \cdot U_{m0}) \\ = 0,3 \text{ s} \cdot 4 \text{ V}/(1,6 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ V}) = 1,5 \text{ s}$$

$T_i = 1 \text{ s}$  (abgelesen aus Diagramm)

b) Bei  $t=0$ :

$$a = U_{m0}/(K_p \cdot U_0) = 10 \text{ V}/(1,6 \cdot 0,5 \text{ V}) = 12,5$$

#### Aufgaben zu 13.2.5

1. Gefordert werden  $K_p = 8$ ,  $K_I = 4/\text{s}$  und  $K_D = 3 \text{ s}$ . Welche Parameterwerte müssen am Industrierelager eingestellt werden?
2. Am Industrierelager wurden eingestellt  $K_p = 1,5$ ,  $T_i = 10 \text{ s}$ ,  $T_d = 4 \text{ s}$ . a) Ermitteln Sie die Werte für  $K_I$ ,  $T_I$ ,  $K_D$ . b) Wählen Sie geeignete Werte für  $R_K$ ,  $R_{eI}$  und  $R_{KD}$ , wenn  $R_e = 100 \text{ k}\Omega$ ;  $C_{eD} = 100 \text{ nF}$ ;  $C_{KI} = 220 \text{ nF}$ .
3. Welche Werte müssen am Industrierelager eingestellt werden, wenn a) ein PI-Regler mit  $K_p = 3$ ,  $T_i = 4 \text{ s}$ , b) ein P-Regler mit  $K_p = 3$  benötigt wird?
4. Berechnen Sie die fehlenden Werte:

	a)	b)	c)	d)	e)	f)
$K_p$	2	5	4		1	3
$T_i$		2 s		4 s		
$K_I$	3/s				0	
$T_I$			0,5 s	6 s		2 s
$T_d$		4 s		5 s	10 s	0
$K_D$	4 s		2 s			
$U_0$	1 V	80 mV			120 mV	0,5 V
$a$	4		6	3	5	
$U_{m0}$	1,2 V	0,6 V	2 V			

5. Ermitteln Sie aus der Sprungantwort in **Bild 3** die Kennwerte des PID-Reglers.

$$K_p = \frac{R_K}{R_e}$$

$$T_d = R_{KD} \cdot C_{eD}$$

$$T_i = C_{KI} \cdot R_{eI}$$

Sprungantwort realer PID<sub>T<sub>1</sub></sub>-Regler:

$$U_m = K_p U_0 \left( 1 + (a - 1) e^{-\frac{t}{T_d/a}} + \frac{t}{T_i} \right)$$

Formelzeichen siehe vorhergehende Seiten.

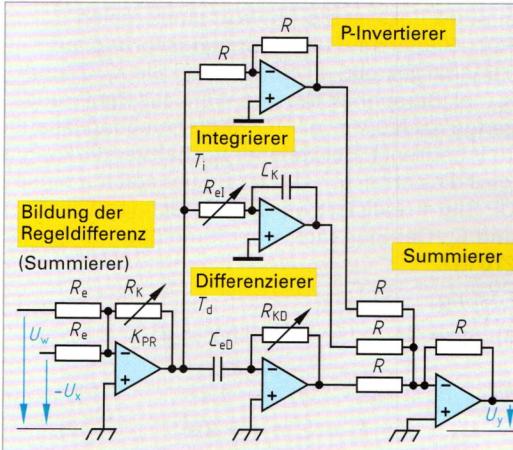


Bild 1: PID-Regler mit Operationsverstärker

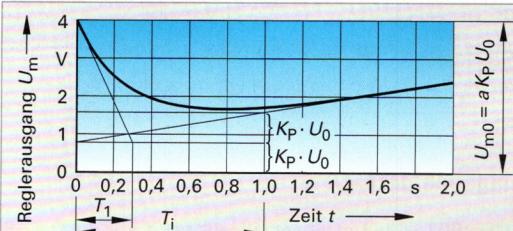


Bild 2: Sprungantwort eines PID-Glieds

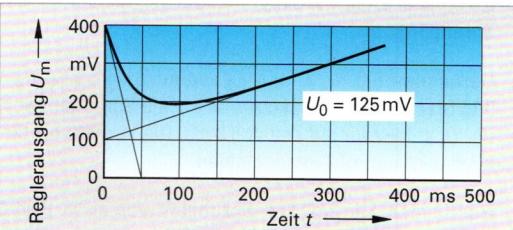


Bild 3: Sprungantwort eines PID-Glieds

6. In **Bild 1** sind 6 gleiche Widerstände  $R$  vorhanden. Warum ist der Wert von  $R$  ohne Einfluss auf den Regler?

### 3.2.6 Regler einstellen (Ziegler/Nichols)

Die Regelgröße  $x$  soll bei Sprüngen von  $w$  schnell den neuen Beharrungswert erreichen (Bild 1). Regelstrecken mit Verzugszeit  $T_e$  und Ausgleichszeit  $T_d$  stellt man oft nach dem Verfahren von Ziegler und Nichols<sup>1</sup> ein.

#### ■ Beispiel 1: Regler einstellen

Stellen Sie den Regler einer Regelstrecke mit  $PT_1$ -Glied und Totzeit nach Ziegler und Nichols ein.

*Lösung:*

Zunächst stellt man den Regler als P-Regler ein und verändert den Proportionalbeiwert  $K_p$  so lange, bis beim kritischen Proportionalbeiwert  $K_{pkrit}$  der Regelkreis schwingt. Nun misst man die Periodendauer  $T_0$  dieser Schwingung (Bild 1). Die Einstellwerte entnimmt man Tabelle 1.

zu große Werte des Proportionalbeiwertes  $K_p$  und zu kleine Werte der Nachstellzeit  $T_i$  oder ein falsches Vorzeichen von  $x$  führen zu Schwingungen, der Regelkreis ist instabil (Bild 2).

#### ■ Beispiel 2: P-Regler einstellen

Ein Regler (Bild 3) mit  $R_e = 12 \text{ k}\Omega$  wird instabil, wenn  $R_{k0} \approx 100 \text{ k}\Omega$  wird. Bestimmen Sie a) den kritischen Proportionalbeiwert  $K_{pkrit}$ , b) den Proportionalbeiwert  $K_p$  und c) den Gegenkopplungswiderstand  $R_K$ .

*Lösung:*

- $K_{pkrit} = R_K/R_{e1} = 100 \text{ k}\Omega/12 \text{ k}\Omega = 8,33$
- $K_p = 0,5 \cdot K_{pkrit} = 4,16$
- $R_K = 100 \text{ k}\Omega/2 = 50 \text{ k}\Omega$

#### Aufgaben zu 13.2.6

- Ein P-Regler (Bild 3) ist mit den Eingangswiderständen  $R_e = 12 \text{ k}\Omega$  und dem Gegenkopplungswiderstand  $R_K = 60 \text{ k}\Omega$  beschaltet. Berechnen Sie a)  $K_{pkrit}$  und b)  $K_p$ .
- Ein PI-Regler (Bild 4) hat die Daten  $R_e = 15 \text{ k}\Omega$ ,  $R_K = 56 \text{ k}\Omega$ ,  $C_K = 10 \mu\text{F}$  und die Nachstellzeit  $T_i = 0,2 \text{ s}$ . Berechnen Sie a) den Gegenkopplungswiderstand  $R_K$ , b)  $K_p$ , c)  $K_{pkrit}$  und d) die Periodendauer  $T_0$ .
- Bei einem PID-Regler (Bild 5) wurde nach Ziegler und Nichols  $R_K$  auf den Wert  $56 \text{ k}\Omega$  und  $C_K = 10 \mu\text{F}$  eingestellt. Berechnen Sie a) den Proportionalbeiwert  $K_p$ , b) die Nachstellzeit  $T_i$ , c) den kritischen Proportionalbeiwert  $K_{pkrit}$ , d) den Gegenkopplungswiderstand  $R_{k0}$ , e) die Periodendauer  $T_0$ , f) die Vorhaltezeit  $T_d$ , g) die Eingangskapazität  $C_e$ .

Tabelle 1: Reglereinstellung nach Ziegler/Nichols

P-Regler	$K_p = 0,5 \cdot K_{pkrit}$
PI-Regler	$K_p = 0,45 \cdot K_{pkrit}$ ; $T_i = 0,85 T_e$
PID-Regler	$K_p = 0,6 \cdot K_{pkrit}$ ; $T_i = 0,5 T_e$ ; $T_d = 0,12 T_e$

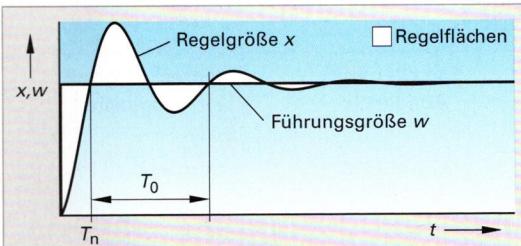


Bild 1: Einschwingvorgang bei einem Führungsgrößensprung

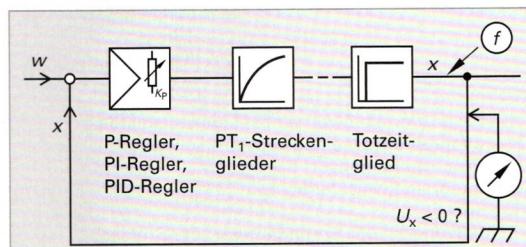


Bild 2: Regelung von  $PT_1$ -Strecken

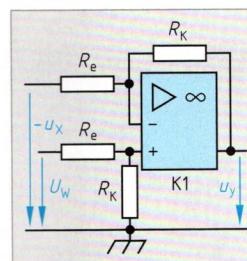


Bild 3: P-Regler

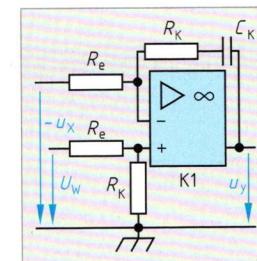


Bild 4: PI-Regler

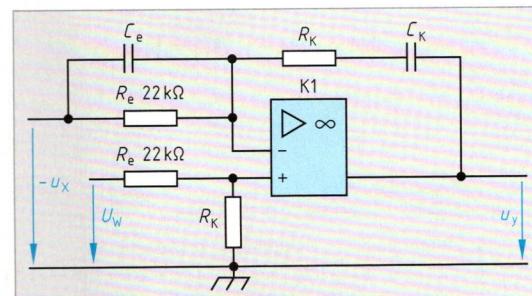


Bild 5: PID-Regler

<sup>1</sup> J. G. Ziegler und N. B. Nichols, amerik. Wissenschaftler, entwickelten das Verfahren 1942

### 13.2.7 Auswahl der Reglerkennwerte

Auswahl der Kennwerte kontinuierlicher Regler mit dem CHR-Verfahren<sup>1</sup>: Zuerst aus den Sprungantworten die Kennwerte der Regelkreisglieder ermitteln, Regelaufgabe und -typ bestimmen, die Reglerkennwerte ermitteln aus **Tabelle 1** und **Tabelle 2**.

Strecken mit Ausgleich:

$$K_{PS} = \Pi K_P$$

$$T_{tE} = T_e + \sum T_t$$

Strecken ohne Ausgleich:

$$K_{IS} = K_I \cdot \Pi K_P$$

$$T_{tE} = \tau + \sum T_t$$

$$\frac{T_b}{K_{PS}} = \frac{1}{K_{IS}}$$

$K_p$  Proportionalbeiwert eines Regelkreisglieds

$K_i$  Integralbeiwert eines Regelkreisglieds

$K_{PS}$  Proportionalbeiwert der Strecke

$K_{IS}$  Integralbeiwert der Strecke

$T_t$  Totzeit

$T_e$  Verzugszeit der Sprungantwort der Strecke

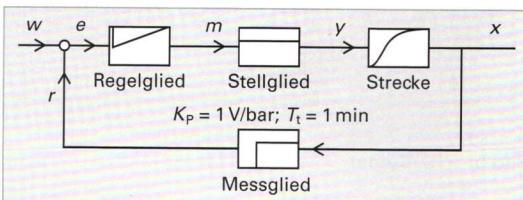
$T_b$  Ausgleichszeit der Sprungantwort der Strecke

$\tau$  Zeitkonstante einer  $PT_1$ -Strecke (auch  $T_S$ )

$T_{tE}$  Ersatztotzeit

**Tabelle 1: CHR-Kennwerte bei Führungsregelung**

Regler Typ	Aperiodischer Regelvorgang	Regelvorgang mit Überschwingen
P	$K_{PR} = 0,3 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$	$K_{PR} = 0,71 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$
PI	$K_{PR} = 0,34 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$ $T_i = 1,2 \cdot T_b$	$K_{PR} = 0,59 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$ $T_i = 1 \cdot T_b$
PID	$K_{PR} = 0,59 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$ $T_i = 1 \cdot T_b$ $T_d = 0,5 \cdot T_{tE}$	$K_{PR} = 0,95 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$ $T_i = 1,35 \cdot T_b$ $T_d = 0,47 \cdot T_{tE}$



**Bild 1:** Strukturbild des Druckregelkreises

### Beispiel 1: Druckregelung berechnen

Luftdruck in einer Pneumatikanlage regeln:

Stellglied: Frequenzumrichter,  $K_{P1} = 6 \text{ Hz/V}$

Strecke: Kompressor  $K_{P2} = 0,6 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{Hz})$

$K_{P3} = 20 \text{ mbar}(\text{m}^3/\text{s})$ ,  $T_e = 5 \text{ min}$ ,  $T_b = 30 \text{ min}$

Messeinrichtung:  $K_{P4} = 1 \text{ V/bar}$ ,  $T_t = 1 \text{ min}$

a) Skizzieren Sie das Strukturbild des Regelkreises.

b) Fassen Sie die Kenngrößen der Regelkreisglieder zusammen.

c) Bestimmen Sie nach CHR<sup>1</sup> Kennwerte eines PID-Reglers für das Ausregeln von Störgrößen mit 20% Überschwingen.

d) Skizzieren Sie das neue Strukturbild.

Lösung:

a) **Bild 1**

$$b) K_{PS} = \Pi K_P = K_{P1} \cdot K_{P2} \cdot K_{P3} \cdot K_{P4} \\ = 6 \text{ Hz/V} \cdot 0,6 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{Hz}) \cdot 20 \text{ mbar}/(\text{m}^3/\text{s}) \\ 1 \text{ V/bar} = 0,072$$

$$T_{tE} = 5 \text{ min} + 1 \text{ min} = 6 \text{ min}$$

$$T_b = 30 \text{ min}$$

$$c) K_{PR} = 1,2 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}} = \frac{1,2 \cdot 30 \text{ min}}{0,072 \cdot 6 \text{ min}} = 83,3$$

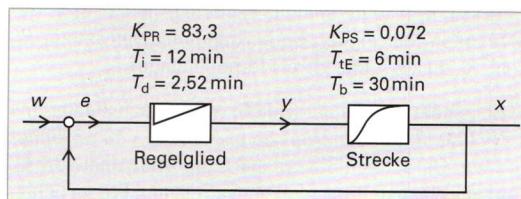
$$T_i = 2 \cdot T_{tE} = 2 \cdot 6 \text{ min} = 12 \text{ min}$$

$$T_d = 0,42 \cdot T_{tE} = 0,42 \cdot 6 \text{ min} = 2,52 \text{ min}$$

d) **Bild 2**

**Tabelle 2: CHR-Kennwerte bei Störungsregelung**

Regler Typ	Aperiodischer Regelvorgang	Regelvorgang mit 20 % Überschwingen
P	$K_{PR} = 0,3 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$	$K_{PR} = 0,7 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$
PI	$K_{PR} = 0,59 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$ $T_i = 4 \cdot T_{tE}$	$K_{PR} = 0,71 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$ $T_i = 2,3 \cdot T_{tE}$
PID	$K_{PR} = 0,95 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$ $T_i = 2,4 \cdot T_{tE}$ $T_d = 0,42 \cdot T_{tE}$	$K_{PR} = 1,2 \cdot \frac{T_b}{K_{PS} \cdot T_{tE}}$ $T_i = 2 \cdot T_{tE}$ $T_d = 0,42 \cdot T_{tE}$



**Bild 2:** Strukturbild nach Zusammenfassung

<sup>1</sup> CHR von Chien, Hrones und Reswick

Die Reglerkennwerte für Strecken mit Ausgleich können direkt mithilfe der **Tabellen 1** und **2**, vorhergehende Seite, ermittelt werden. Bei Regelstrecken ohne Ausgleich muss zuvor die Ausgleichszeit ersetzt werden, siehe Formelkasten Seite 230.

### Aufgaben zu 13.2.7

In den CHR-Tabellen (**Tabellen 1** und **2**, vorhergehende Seite) wird unterschieden zwischen Störungs- und Führungsregelung jeweils ohne oder mit 20 % Überschwingen. Ordnen Sie die folgenden Regelaufgaben je einer der vier Möglichkeiten zu. Begründen Sie die Zuordnung kurz. a) Lageregelung eines Fräskopfes, b) Temperaturregelung eines Glühofens, c) Drehzahlregelung eines Transportbands, d) Regelung des Durchflusses beim Befüllen von Flaschen, e) Geschwindigkeitsregelung eines fahrerlosen Transportsystems.

- Bei folgenden Strecken mit Ausgleich sind Kennwerte bekannt. Bestimmen Sie Reglerkennwerte nach CHR. a) PI-Regler, Führung ohne Überschwingen.  $K_p = 5$ ,  $T_e = 2 \text{ s}$ ,  $T_b = 30 \text{ s}$ , b) PID-Regler, Störung mit Überschwingen.  $K_p = 6$ ,  $T_e = 3 \text{ min}$ ,  $T_b = 12 \text{ min}$ . c) PID-Regler, Störung ohne Überschwingen.  $K_p = 0,05$ ,  $T_e = 20 \text{ ms}$ ,  $T_b = 0,1 \text{ s}$ .

- Ein Temperaturregelkreis besteht aus einem Heizwiderstand mit Schwingungspaketsteuerung als Stellglied ( $K_p = 0,25 \text{ kW/V}$ ,  $T_t = 1 \text{ s}$ ), einem Ölbad als Strecke ( $K_p = 0,1 \text{ K/W}$ ,  $T_e = 4 \text{ s}$ ,  $T_b = 60 \text{ s}$ ), einer Messeinrichtung ( $K_p = 10 \text{ mV/K}$ ) und einem PI-Regler. a) Skizzieren Sie das Strukturbild des Regelkreises. b) Fassen Sie die Kennwerte von Stellglied, Strecke und Messeinrichtung zusammen. Ermitteln Sie  $K_{PS}$ ,  $T_b$  und  $T_{tE}$ . c) Skizzieren Sie das Strukturbild des Regelkreises nach Zusammenfassung.

- Bei folgenden Strecken ohne Ausgleich sind Kennwerte bekannt. Bestimmen Sie Reglerkennwerte nach CHR. a) P-Regler, Führung ohne Überschwingen,  $K_I = 20/\text{s}$ ,  $\tau = 30 \text{ ms}$ , b) PD-Regler, Störung ohne Überschwingen,  $K_I = 5/\text{h}$ ,  $\tau = 15 \text{ min}$ . c) PD-Regler, Störung mit Überschwingen,  $K_I = 30/\text{min}$ ,  $\tau = 90 \text{ s}$ .

- Der Füllstand eines Wasserbehälters wird mit einem PID-Regler auf Störung mit 20 % Überschwingen geregelt. Stellglied: Proportionalventil, Durchfluss  $10 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{V})$ ;  $T_t = 0,2 \text{ s}$ . Strecke: Behälter mit Füllstand  $1 \text{ m}/\text{m}^3$ . Messeinrichtung:  $1 \text{ V/m}$ ;  $T_t = 0,05 \text{ s}$ . a) Skizzieren Sie das Strukturbild des Regelkreises. b) Fassen Sie die Kennwerte von Stellglied, Strecke und Messeinrichtung zusammen. Ermitteln Sie  $K_{IS}$  und  $T_{tE}$ . c) Ermitteln Sie die Reglerkennwerte. d) Skizzieren Sie das Strukturbild des zusammengefassten Regelkreises.

### Beispiel 2: Strecke ohne Ausgleich regeln

Das Füllen eines Wasserhochbehälters wird mit einem PD-Regler geregelt. Kennwerte sind: Stellglied: Pumpe, Durchfluss  $K_{P1} = 1 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{V})$ , Zeitkonstante  $\tau = 2 \text{ s}$ .

Strecke: Behälter mit Füllstand  $K_{I1} = 1 \text{ cm}/\text{m}^3$   
Messeinrichtung:  $K_{P2} = 1 \text{ V/m}$  mit Totzeit  $T_t = 0,1 \text{ s}$ .

- Skizzieren Sie das Strukturbild des Regelkreises.
- Fassen Sie die Kennwerte von Stellglied, Strecke und Stelleinrichtung zusammen, ermitteln Sie  $K_{IS}$  und  $T_{tE}$ .
- Ermitteln Sie die Einstellwerte des Reglers.
- Stellen Sie das Strukturbild zusammengefasst dar.

Lösung:

#### a) Bild 1

$$\begin{aligned} b) \quad K_{IS} &= K_{P1} \cdot K_{I1} \cdot K_{P2} \\ &= 1 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{V}) \cdot 1 \text{ cm}/\text{m}^3 \cdot 1 \text{ V/m} = 0,01/\text{s} \\ T_{tE} &= \tau + T_t = 2 \text{ s} + 0,1 \text{ s} = 2,1 \text{ s} \\ c) \quad K_{PR} &= 0,6/(K_I \cdot T_{tE}) = 0,6/(0,01/\text{s} \cdot 2,1 \text{ s}) = 28,6 \\ T_d &= 0,5 \cdot T_{tE} = 0,5 \cdot 2,1 \text{ s} = 1,05 \text{ s} \\ K_{DR} &= K_{PR} \cdot T_d = 30 \text{ s} \end{aligned}$$

#### d) Bild 2

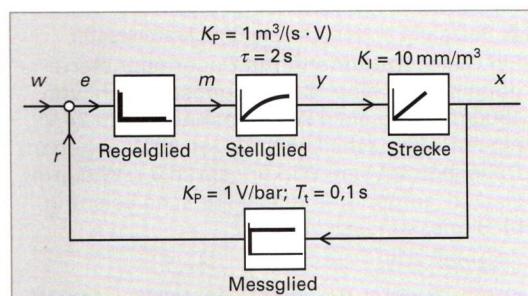


Bild 1: Strukturbild des Füllstandregelkreises

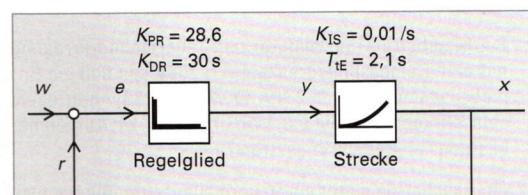


Bild 2: Zusammengefasstes Strukturbild



# 14 Antriebstechnik

## 14.1 Antrieb mit Gleichstrommotoren

Bei Antrieben mit Gleichstrommotor unterscheidet man fremderregte Gleichstrommotoren und Elektronikmotoren.

Beim fremderregten Gleichstrommotor liegt ein permanentes Ständermagnetfeld vor. Dem Läufer wird über Kohlebürsten ein Strom zugeführt, welcher in der Läuferwicklung das Ankerquerfeld erzeugt (**Bild 1**). Das Ankerquerfeld richtet sich bei der Motordrehung nach dem Ständerfeld aus. Nach einer Drehung von z.B.  $30^\circ$  wird über den Stromwender der Weg des Stromes durch die Läuferwicklung so verändert, dass das Ankerquerfeld wieder in seine Ausgangslage zurückversetzt wird. Man nennt diesen Vorgang Kommutierung.

Beim *Elektronikmotor* findet dieser Kommutierungsvorgang im Ständer statt. Der Läufer ist ein Dauermagnet, dessen Lage durch Sensoren (Feldplatten oder Resolver) im Ständer erfasst wird (**Bild 2**). Schalttransistoren führen den Strom den Ständerspulen so zu, dass sich das Ständermagnetfeld immer  $90^\circ$  vor das Läuferfeld setzt. Geschieht dies in Schritten von z.B.  $60^\circ$ , so liegt Blockkommutierung vor, geschieht dies aber kontinuierlich, so liegt Sinuskommutierung vor.

### Beispiel 1: Berechnung Gleichstrommotor

Ein Gleichstrommotor mit Dauermagneterregung soll bei einer Bemessungsdrehzahl von 1800/min und einer Ankerspannung von 24 V eine mechanische Leistung von 10 W abgeben. Dabei beträgt sein Wirkungsgrad 0,7. Wie groß sind a) aufgenommene elektrische Leistung, b) Bemessungsstrom  $I_n$ ?

*Lösung:*

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad \eta &= P_A/P \Rightarrow P = P_A/\eta = 10 \text{ W}/0,7 = 14,3 \text{ W} \\ \text{b)} \quad I_n &= I_A = P/U_A = 14,3 \text{ W}/24 \text{ V} = 0,60 \text{ A} \end{aligned}$$

### Aufgaben zu 14.1

- Ein Gleichstrom-Servomotor mit Dauermagneterregung hat eine Bemessungsdrehzahl von 2000/min und ein Bemessungsmoment von 2 Nm. Er wird an 230 V betrieben, sein Wirkungsgrad ist 0,8. Wie groß sind a) Aufnahmeleistung, b) Bemessungsstrom?
- Ein Gleichstrommotor mit Dauermagneterregung hat eine Bemessungsdrehzahl von 1400/min und einen Wirkungsgrad von 0,85. Er wird an 230 V betrieben und nimmt bei Be-

Beim Gleichstrommotor, dauermagneterregt:

$$\eta = \frac{P_A}{P}$$

$$P = U_A \cdot I_A$$

$$P_A = M \cdot \omega$$

$\eta$  Wirkungsgrad

$P_A$  mechanische Ankerleistung

$P$  Leistungsaufnahme

$I_A$  Ankerstrom

$U_A$  Ankerspannung

$M$  Moment

$$\omega = \text{Winkelgeschwindigkeit } \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad [\omega] = \frac{1}{\text{s}}$$

$n$  Drehzahl, Umdrehungsfrequenz

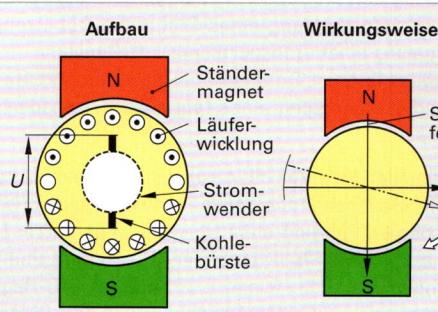


Bild 1: Fremderregter Gleichstrommotor

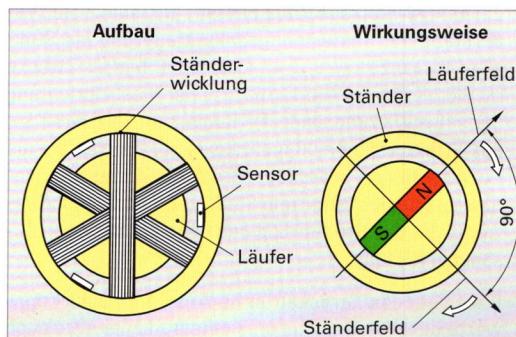


Bild 2: Elektronikmotor

messungslast einen Bemessungsstrom von 33A auf. Wie groß sind a) Abgabeleistung, b) Bemessungsmoment?

- Ein Gleichstrommotor mit Dauermagneterregung nimmt bei Bemessungslast an 230 V einen Bemessungsstrom von 42 A auf. Sein Wirkungsgrad beträgt dabei 0,83, die Drehzahl ist dabei 2200/min. Wie groß sind a) Abgabeleistung, b) Bemessungsmoment?
- Ein fremderregter Motor mit Dauermagneterregung nimmt an 440 V bei Bemessungslast einen Ankerstrom von 22 A auf, die mechanische Ankerleistung ist dabei 8kW, und die Drehzahl beträgt 1800/min. Berechnen Sie a) Wirkungsgrad, b) Bemessungsmoment.



## 14.2 Ein-Quadranten-Steller (1Q-Steller)

Ankerspannung und Drehzahl eines Gleichstrommotors können mit einem Gleichstromsteller (**Bild 1**) verlustarm gesteuert werden. Falls nur eine Drehrichtung erforderlich ist, genügt ein einzelner elektronischer Schalter, meist IGBT oder ein bipolarer Transistor.

Ein pulsweitenmoduliertes Signal (PWM) steuert die Schaltung an. Während der Impulszeit  $t_i$  beschleunigt der Motor, in der Pausenzeit  $t_p$  bremst er ab. Die Taktfrequenz  $f$  wird so hoch gewählt, dass der Motor mit gleichbleibender Geschwindigkeit dreht. Mit dem Tastgrad  $g$  des PWM-Signals wird die Drehzahl gestellt.

### Beispiel 1: Tastgrad berechnen

Die Betriebsspannung des Spannungsstellers beträgt  $U_b = 36$  V. Am IGBT fällt  $U_{CE} = 2$  V ab. Die Taktfrequenz beträgt  $f = 4$  kHz. Die Spannung soll  $U_1 = 17$  V betragen. Bestimmen Sie den Tastgrad  $g$  der Steuerspannung.

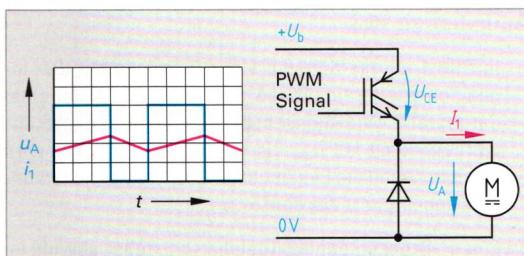
**Lösung:**

$$g = \frac{U_A}{U_b - U_{CE}} = \frac{17 \text{ V}}{36 \text{ V} - 2 \text{ V}} = 0,5$$

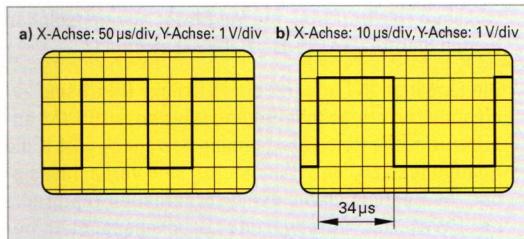
### Aufgaben zu 14.2

- Bestimmen Sie a) Periodendauer  $T$  bei Taktfrequenz  $f = 1$  kHz ( $12,8$  kHz;  $160$  kHz); b) Taktfrequenz  $f$  bei Periodendauer  $T = 20$  ms ( $31,25$   $\mu$ s;  $16$  ns).
- Bestimmen Sie Periodendauer  $T$ , Tastgrad  $g$  sowie Taktfrequenz  $f$ . Impuls- und Pausenzeit betragen:  
a)  $t_i = 10$  ns;  $t_p = 40$  ns; b)  $t_i = 1,6$   $\mu$ s;  $t_p = 800$  ns; c)  $t_i = 200$   $\mu$ s;  $t_p = 3,8$  ms.
- Bestimmen Sie Impulszeit  $t_i$  und Pausenzeit  $t_p$ . Taktfrequenz  $f$  und Tastgrad  $g$  sind wie folgt gegeben: a)  $f = 4$  kHz;  $g = 0,7$ ; b)  $f = 16$  kHz;  $g = 0,625$ ; c)  $f = 80$  kHz;  $g = 0,1875$ .
- Begründen Sie, warum ein Tastgrad  $g = 1,2$  nicht möglich ist.
- Die Betriebsspannung eines 1Q-Stellers beträgt  $U_b = 48$  V. Der Spannungsfall im Transistor wird vernachlässigt. a) Bestimmen Sie den arithmetischen Mittelwert der Ankerspannung  $U_A$ , wenn der Tastgrad wie folgt eingestellt wurde:  $g = 0,02; 5/8; 62\%; 7/16; 0,84$ . b) Bestimmen Sie den Tastgrad, wenn der folgende arithmetische Mittelwert der Ankerspannung gewünscht ist:  $U_A = 24$  V;  $45$  V;  $6$  V;  $7,2$  V.

$T = t_i + t_p$	$g = \frac{t_i}{T}$	$T = \frac{1}{f}$
$k_E = \frac{n}{U_A}$	$U_A = g \cdot (U_b - U_{CE})$	
$k_E$ Spannungskonstante $n$ Drehzahl des Motors $U_A$ Ankerspannung $U_b$ Betriebsspannung $U_{CE}$ Kollektor-Emitter-Spannung	$T$ Periodendauer $f$ Frequenz $t_i$ Impulszeit $t_p$ Pausenzeit $g$ Tastgrad	



**Bild 1:** Schematische Darstellung Gleichstromsteller für Ein-Quadranten-Betrieb, Spannungsverlauf, Stromverlauf



**Bild 2:** Oszilloskopbilder des Steuersignals eines 1Q-Stellers

- Die Betriebsspannung des Spannungsstellers (**Bild 1**) beträgt  $U_b = 24$  V. Am Transistor fällt  $U_{CE} = 0,3$  V ab. Die Taktfrequenz beträgt  $f = 4$  kHz. a) Die Ankerspannung soll  $U_A = 10$  V betragen. Ermitteln Sie den Tastgrad  $g$  sowie  $T$ ,  $t_i$  und  $t_p$ . b) Der Tastgrad beträgt  $g = 0,7$ . Bestimmen Sie  $t_i$ ,  $t_p$  und  $U_A$ . c) Die Impulszeit beträgt  $t_i = 20$   $\mu$ s. Berechnen Sie  $g$ ,  $t_p$  und  $U_A$ .
- Die Spannungskonstante eines DC-Motors beträgt  $k_E = 25 \text{ min}^{-1}/V$ . Die Betriebsspannung des Spannungsstellers beträgt 50 V. Der Spannungsfall im Transistor wird vernachlässigt. a) Bestimmen Sie Tastgrad  $g$  und Ankerspannung  $U_A$ , wenn die Drehzahl im Leerlauf  $n = 16 \text{ s}^{-1}$  betragen soll. b) Am Oszilloskop wird der Spannungsverlauf des PWM-Steuersignals dargestellt (**Bild 2**). Bestimmen Sie jeweils Periodendauer  $T$  sowie  $t_i$ ,  $t_p$  und  $g$ . Welche Motordrehzahl ergibt sich im Leerlauf?



## 14.3 H-Brücke

Eine H-Brücke ermöglicht es, einen Gleichstrommotor im Vierquadrantenbetrieb (4Q-Betrieb) in beiden Drehrichtungen sowohl motorisch anzu treiben als auch generatorisch zu bremsen. Eine Pulsweitenmodulation (PWM) schaltet die Steuereingänge so, dass abwechselnd positive und negative Spannung am Motor anliegt. Durch die Induktivität der Wicklungen ergibt sich ein ge glätteter, je nach arithmetischem Mittelwert der Spannung  $U_{AB}$  positiver oder negativer Motorstrom.

$$k_E = \frac{n}{U_{AB}}$$

$$U_{AB} = (2g - 1) \cdot (U_b - 2 U_{CE})$$

$k_E$  Spannungskonstante

$n$  Drehzahl des Motors

$U_{CE}$  Kollektor-Emitter-Spannung

$U_{AB}$  arithmetischer Mittelwert der Brückenspannung

$U_b$  Betriebsspannung

$g$  Tastgrad

### Aufgaben zu 14.3

- In Bild 1 ist das Schema einer H-Brücke mit den logischen Steuereingängen IN1, IN2 und EN (enable) dargestellt. Wie müssen die Eingänge angesteuert werden, damit a)  $U_{AB} > 0$ , b)  $U_{AB} < 0$ ? c) Was wird erreicht, wenn die Eingänge IN1 und IN2 zueinander invers angesteuert werden?
- Eine H-Brücke kann als Gleichstromsteller sowohl im 1Q-Betrieb als auch im 4Q-Betrieb benutzt werden. Zur Wahl stehen die Signale „High“ und „Low“ sowie ein PWM-Signal. Wie sind diese Signale anzuschließen, um a) den Motor im Rechtslauf (1Q-Betrieb), b) im Linkslauf (1Q-Betrieb), c) den Motor abwechselnd in beiden Richtungen (4Q-Betrieb) zu betreiben?
- Die Eingänge IN1 und IN2 der H-Brücke Bild 1 sind zueinander invers geschaltet und werden mit PWM angesteuert. Die Betriebsspannung beträgt  $U_b = 24$  V, die Spannungen  $U_{CE}$  der Transistoren sind vernachlässigbar. a) Bestimmen Sie den erforderlichen Tastgrad  $g$  der PWM. Der Mittelwert der Brückenspannung beträgt  $U_{AB} = 0$  V; 12 V; -8 V; -2 V; 6 V. b) Im Bild 2 ist ein Oszilloskopgramm des PWM-Signals dargestellt. Das Signal ist an IN1 direkt und an IN2 invertiert angeschlossen. Bestimmen Sie Periodendauer  $T$ , Frequenz  $f$ , Tastgrad  $g$  und Mittelwert  $U_{AB}$ .
- Ein Gleichstrommotor soll im 4Q-Betrieb arbeiten. Die Spannungskonstante des Motors beträgt  $k_E = 30 \text{ min}^{-1}/V$ . Die Spannung  $U_{AB}$  nimmt je nach Schaltzustand der PWM entweder +28 V oder -28 V an. a) Welche Drehzahl ist maximal erreichbar? b) Ermitteln Sie den erforderlichen Mittelwert  $U_{AB}$  sowie Tastgrad  $g$  bei Drehzahl  $600 \text{ min}^{-1}$ ;  $210 \text{ min}^{-1}$ ;  $0 \text{ min}^{-1}$ ;  $-350 \text{ min}^{-1}$ ;  $-770 \text{ min}^{-1}$ .

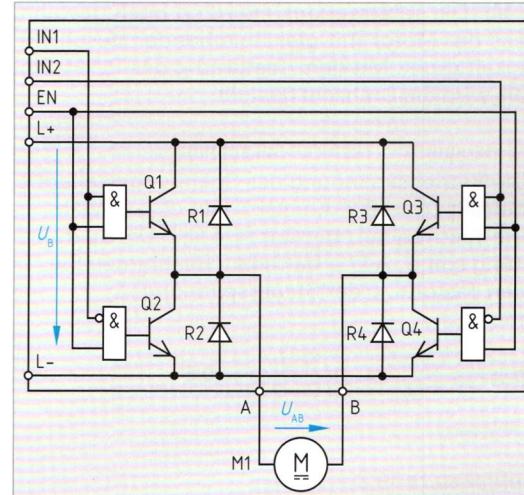


Bild 1: Schema H-Brücke mit Steuersignalen

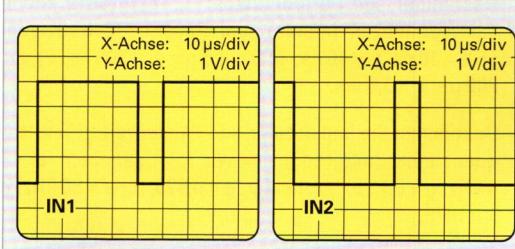


Bild 2: Oszilloskopgramme der Steuersignale IN1 und IN2 einer H-Brücke

soll zeigen, wie die Drehzahl des Motors vom Tastgrad  $g$  abhängt. c) Der Motor dreht mit  $+600 \text{ min}^{-1}$ . Die Betriebsspannung fällt von 40 V auf 36 V. Um welchen Wert  $\Delta g$  muss der Tastgrad erhöht werden, um die Drehzahl beizubehalten?



## 14.4 Drehstromasynchronmotor (DASM)

### Aufgaben zu 14.4

1. Ein DASM der Baugröße 100L kann in verschiedenen Polzahlen gewickelt werden. Berechnen Sie Schlupf und Läuferfrequenz für die zweipolige und vierpolige Ausführung aus dem Datenblatt Asynchronmotoren Seite 236.

2. Ein sechspoliger DASM wird an 60 Hz betrieben. Er treibt ein Gebläse mit  $n = 1176 \text{ min}^{-1}$ . Berechnen Sie Schlupf und Läuferfrequenz.

3. Ermitteln Sie für einen vierpoligen DASM der Baugröße 132M, der im Bemessungsbetrieb arbeitet, aus dem Datenblatt Seite 236 a) den Schlupf, b) das Bemessungsmoment, c) den Anzugsstrom  $I_A$ , d) das Anzugsmoment  $M_A$ .

4. Ein vierpoliger DASM wird an 60 Hz betrieben. Der Schlupf beträgt 3 %. Ermitteln Sie die Läuferfrequenz und die Drehzahl in a)  $\text{min}^{-1}$ , b)  $\text{s}^{-1}$ .

5. Ein zweipoliger DASM der Baugröße 112M treibt eine Schleifmaschine an. Ermitteln Sie aus dem Datenblatt Seite 236 a) die Stromaufnahme bei Bemessungsbetrieb, b) die Stromaufnahme bei Teillast  $\frac{1}{4} \cdot P_N$ , c) die

$$\text{Stromaufnahme bei } P = \frac{5}{4} \cdot P_N.$$

6. Ein vierpoliger DASM der Baugröße 160L treibt eine Säge an. Es wird eine Stromaufnahme von 15,6 A gemessen. Welche Leistung gibt der Motor ungefähr ab?

7. An einem zweipoligen DASM der Baugröße 160M werden  $U = 360 \text{ V}$  und  $n = 2955 \text{ min}^{-1}$  gemessen. Ermitteln Sie mithilfe des Datenblatts Seite 236 a) das Kraftmoment des Motors, b) die abgegebene Leistung des Motors, c) das Anzugsmoment des Motors.

8. Nach TAB (Technische Anschlussbedingungen) darf ein DASM nur dann direkt angelassen werden, wenn der Anzugsstrom 60 A nicht überschreitet. Überprüfen Sie mithilfe des Datenblatts Seite 236, welche der vierpoligen Motoren direkt angelassen werden dürfen.

9. Der zweipolige DASM mit Baugröße 160L soll mit einem Stern-Dreieck-Schalter angelassen werden. Ermitteln Sie Anlaufstrom und Anlaufmoment.

10. Ein vierpoliger DASM soll auf der Zugspitze in 3000 m Höhe bei  $30^\circ\text{C}$  arbeiten. Eine Leistung von 7,0 kW wird benötigt. Wählen Sie den Motor mithilfe des Datenblatts Seite 236 aus.

$$P_{\text{kW}} = \frac{M \cdot n}{9549}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \eta \cdot \cos \varphi$$

$$n_s = \frac{f}{p}$$

$$M \sim U_{\text{Str}}^2$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \%$$

$$f_L = f \cdot \left(1 - \frac{n}{n_s}\right)$$

$f$	Netzfrequenz	$p$	Polpaarzahl (halbe Polzahl)
$f_L$	Frequenz im Läufer	$P$	Leistungsabgabe mechanisch
$I$	Stromstärke (Leiterstrom)	$P_{\text{kW}}$	Leistungsabgabe in kW
$M$	Kraftmoment, Drehmoment	$s$	Schlupf
$M_K$	Kippmoment	$U$	Netzspannung
$n$	Drehzahl, Umdrehungsfrequenz	$U_{\text{Str}}$	Strangspannung
$n_s$	Drehfelddrehzahl, synchrone Drehzahl	$\eta$	Wirkungsgrad
		$\cos \varphi$	Leistungsfaktor

### Beispiel 1: DASM-Betriebswerte bestimmen

Ein zweipoliger Drehstromasynchronmotor (DASM) der Baugröße 132S wird mit Bemessungswerten betrieben. Ermitteln Sie mithilfe des Datenblatts Asynchronmotoren Seite 236 a) den Schlupf, b) die Schlupffrequenz, c) das Bemessungsmoment, d) das Anzugsmoment, e) den Motorstrom bei halber Last.

Lösung:

$$\begin{aligned} \text{a)} s &= \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \% \\ &= \frac{3000 \text{ min}^{-1} - 2950 \text{ min}^{-1}}{3000 \text{ min}^{-1}} \cdot 100 \% = 1,67 \% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b)} f_L &= f \cdot \left(1 - \frac{n}{n_s}\right) = 50 \text{ Hz} \cdot \left(1 - \frac{2950 \text{ min}^{-1}}{3000 \text{ min}^{-1}}\right) \\ &= 0,833 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$\text{c)} M = \frac{P_{\text{kW}} \cdot 9549}{n} = \frac{7,5 \text{ kW} \cdot 9549}{2950 \text{ min}^{-1}} = 24,3 \text{ Nm}$$

$$\text{d)} \text{Abgelesen aus Datenblatt: } M_A/M_N = 2,2 \\ M_A = 24,3 \text{ Nm} \cdot 2,2 = 53,5 \text{ Nm}$$

e) Abgelesen aus Datenblatt:

$$\eta = 0,9, \cos \varphi = 0,87$$

bei halber Last:  $\eta = 0,89 \Rightarrow \cos \varphi = 0,765$ .

Bei halber Last:

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \\ &= \frac{3,75 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,89 \cdot 0,765} = 7,95 \text{ A} \end{aligned}$$



## 14.5 Kennwerte von Asynchronmotoren

### Hinweise zu den Tabellen:

Die üblichen Asynchronmotoren sind für den Betrieb an 460 V/60 Hz zugelassen. Dabei steigt die Bemessungsleistung um den Faktor 1,15, der Bemessungsstrom vermindert sich um den Faktor 0,95, die Bemessungsdrehzahl steigt entsprechend an.

Die Drehmomentklasse KL gibt an, gegen welches Lastmoment der Motor auch bei 5 % Unterspannung anlaufen kann. Dabei bedeutet z. B. KL 16, dass der Motor gegen  $1,6 \cdot M_N$  anlaufen kann.

Bei Teillast erhöht sich die Drehzahl, dabei ist die Schlupffrequenz dem Kraftmoment des Motors annähernd proportional.

Bei Änderung der Strangspannung ändert sich der Motorstrom proportional, das Drehmoment und die Leistung ändern sich quadratisch.

**Tabelle 2: Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  bei Teillast**

$\cos \varphi_N$	1/4 $P_N$	1/2 $P_N$	3/4 $P_N$	5/4 $P_N$
0,88	0,57	0,78	0,85	0,88
0,86	0,51	0,75	0,83	0,86
0,84	0,47	0,71	0,80	0,85
0,82	0,43	0,67	0,78	0,83
0,80	0,40	0,64	0,75	0,81
0,78	0,36	0,61	0,72	0,80

**Tabelle 3: Reduktionsfaktor  $k_{HT}$  bei abweichender Kühlmitteltemperatur oder Aufstellungshöhe**

Aufstellungshöhe über NN	30 °C	40 °C	45 °C	50 °C
1000	1,07	1,00	0,96	0,92
1500	1,04	0,97	0,93	0,89
2000	1,00	0,94	0,90	0,86
2500	0,96	0,90	0,86	0,83
3000	0,92	0,86	0,82	0,79
3500	0,88	0,82	0,79	0,75

**Tabelle 1: Wirkungsgrad  $\eta$  bei Teillast**

$\eta_N$	1/4 $P_N$	1/2 $P_N$	3/4 $P_N$	5/4 $P_N$
0,94	0,89	0,925	0,94	0,935
0,92	0,87	0,91	0,92	0,915
0,90	0,84	0,89	0,90	0,89
0,88	0,81	0,87	0,88	0,87
0,86	0,78	0,85	0,86	0,85
0,84	0,74	0,83	0,84	0,84

**Tabelle 4: Auswahlliste Asynchronmotoren**

Baugröße	$P_N$	$n_N$	$\eta_N$	$\cos \varphi_N$	$I_N$	$M_A/M_N$	$I_A/I_N$	$M_K/M_N$	KL
$U_N = 400 \text{ V}; n_S = 3000 \text{ min}^{-1}; f = 50 \text{ Hz}$									
100 L	3	2905	0,86	0,84	5,9	2,3	7,0	3,3	16
112 M	4	2950	0,88	0,86	7,6	2,4	7,4	3,3	16
132 S	7,5	2950	0,90	0,87	13,8	2,2	7,5	3,1	16
160 M	15	2955	0,91	0,88	27,0	2,4	7,6	3,6	16
160 L	18,5	2955	0,92	0,88	33,0	2,9	7,9	3,9	16
$U_N = 400 \text{ V}; n_S = 1500 \text{ min}^{-1}; f = 50 \text{ Hz}$									
100 L	3	1455	0,88	0,82	6,0	2,0	6,9	3,1	16
112 M	4	1460	0,88	0,81	8,1	2,5	7,1	3,2	16
132 S	5,5	1465	0,89	0,80	11,2	2,3	6,9	2,9	16
132 M	7,5	1465	0,90	0,83	14,4	2,3	6,9	2,9	16
160 M	11	1470	0,91	0,85	20,5	2,2	6,7	2,8	16
160 L	15	1475	0,92	0,85	27,5	2,5	7,3	3,0	16

$P_N$  Bemessungsleistung in kW

$n_N$  Bemessungsdrehzahl in  $\text{min}^{-1}$

$n_S$  synchrone Drehzahl

$M_N$  Bemessungsdrehmoment in Nm

$\eta_N$  Wirkungsgrad bei Bemessungslast

$\cos \varphi_N$  Leistungsfaktor bei Bemessungslast

$I_N$  Bemessungsstrom in A

$U_N$  Bemessungswert der Spannung

$M_A/M_N$  Anzugsmoment bei direktem Einschalten

$I_A/I_N$  Anzugsstrom bei direktem Einschalten

$M_K/M_N$  Kippmoment bei direktem Einschalten

KL Drehmomentklasse



## 14.6 Schrittmotoren

### 14.6.1 Schrittwinkel und Drehzahl

Schrittmotoren haben je nach Bauart bis zu fünf Stränge. Verbreitet sind Zweistrang-Schrittmotoren (**Bild 1**). Die Taktfolge wird mit elektronischen Steuerschaltungen und Leistungstransistoren erzeugt (**Tabelle 1**). Die *Schrittwinkel* sind von der Strangzahl, der Polzahl und der Betriebsart abhängig. Die Drehzahl hängt vom Schrittwinkel und der *Schrittfrequenz* ab. Dabei ist die Schrittfrequenz die Frequenz, mit der sich die Ansteuerung ändert, nicht die Frequenz der einzelnen Impulse im Wicklungsstrang.

Bei Vollschriftbetrieb: Bei Halbschriftbetrieb:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{m \cdot 2 p}$$

$$\alpha = \frac{180^\circ}{m \cdot 2 p}$$

$$z_U = m \cdot 2 p$$

$$z_U = 2 \cdot m \cdot 2 p$$

$$n = \frac{f_{sch}}{m \cdot 2 p}$$

$$n = \frac{f_{sch}}{2 \cdot m \cdot 2 p}$$

$\alpha$  Schrittwinkel  
 $f_{sch}$  Schrittfrequenz  
 $n$  Drehzahl

$p$  Polpaarzahl, 2 p Polzahl  
 $m$  Strangzahl  
 $z_U$  Schrittzahl/Umdrehung

#### Beispiel 1: Polzahl und Schrittfrequenz berechnen

Ein Zweistrang-Schrittmotor hat bei Halbschriftbetrieb einen Schrittwinkel von  $1,8^\circ$  und soll eine Drehzahl von 1000/min erreichen. Wie groß sind a) Polzahl, b) Schrittfrequenz?

Lösung:

$$a) \alpha = \frac{180^\circ}{m \cdot 2 p} \Rightarrow 2 p = \frac{180^\circ}{m \cdot \alpha} = \frac{180^\circ}{2 \cdot 1,8^\circ} = 50$$

$$b) n = \frac{f_{sch}}{2 \cdot m \cdot 2 p} \Rightarrow f_{sch} = n \cdot 2 \cdot m \cdot 2 p \\ = 1000/\text{min} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 50 \\ = 200000/\text{min} = 3333 \text{ Hz}$$

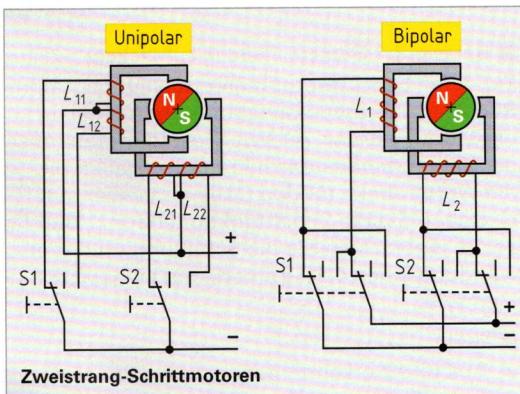


Bild 1: Unipolarer Zweistrang-Schrittmotor

#### Aufgaben zu 14.6.1

- Wie groß ist der Schrittwinkel, wenn der Schrittmotor Bild 1 a) im Vollschriftbetrieb, b) im Halbschriftbetrieb (**Tabelle 1**) angesteuert wird?
- Ein Schrittmotor mit fünf Strängen hat 12 Pole und soll im Halbschriftbetrieb eine Drehzahl von 1200/min erreichen. a) Wie viele Schritte/Umdrehung sind erforderlich? b) Mit welcher Schrittfrequenz ist er anzusteuern?
- Ein Zweistrang-Schrittmotor hat 36 Pole und soll im Vollschriftbetrieb eine Drehzahl von 2400/min erreichen. Wie groß sind a) Anzahl der Schritte je Umdrehung, b) Schrittfrequenz?
- Die Drehzahl/min eines Schrittmotors soll bei Halbschriftbetrieb aus dem Schrittwinkel und der Schrittfrequenz berechnet werden. Wie groß ist  $n$ , wenn  $\alpha = 60^\circ$  und  $f_{sch} = 720/\text{min}$  ist?
- Die Drehzahl eines Schrittmotors soll bei Vollschriftbetrieb aus dem Schrittwinkel und der Schrittfrequenz berechnet werden. Wie groß ist  $n$ , wenn  $\alpha = 30^\circ$  und  $f_{sch} = 1440/\text{min}$  ist?

Tabelle 1: Taktfolgen eines Zweistrang-Schrittmotors

Takt-Nummer		Vollschriftbetrieb schwarz Halbschriftbetrieb magenta	
Linkslauf	Rechtslauf	Schalter Q1	Schalter Q2
4 $\triangleq$ 0	0 $\triangleq$ 4	$\leftarrow$	$\leftarrow$
3 $\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\leftarrow$	Mitte
3	1	$\leftarrow$	$\rightarrow$
2 $\frac{1}{2}$	$1 \frac{1}{2}$	Mitte	$\rightarrow$
2	2	$\rightarrow$	$\rightarrow$
1 $\frac{1}{2}$	$2 \frac{1}{2}$	$\rightarrow$	Mitte
1	3	$\rightarrow$	$\leftarrow$
$\frac{1}{2}$	$3 \frac{1}{2}$	Mitte	$\leftarrow$

Schalterstellung:  $\leftarrow$  links, rechts  $\rightarrow$



## 14.6.2 Schrittmotoren ansteuern

Die Steuerschaltung für Schrittmotoren enthält einen Zähler, der die erforderlichen Schrittimpulse liefert.

Bei der **Einstrang-Ansteuerung** wird in jedem Zeitpunkt immer nur ein Wicklungsstrang erregt (**Bild 1**). Bei der **Zweistrang-Ansteuerung** werden immer zwei Wicklungsstränge erregt (**Bild 2**). Bei der **Halbschritt-Ansteuerung** wechseln Einstrang-Ansteuerung und Zweistrang-Ansteuerung einander ab (**Bild 1**, folgende Seite).

Bei der Berechnung des Zählers geht man vom Zeitablaufdiagramm aus und ermittelt daraus die Schaltfunktion. Für die Schrittmotoransteuerung können besondere Zähler aus beschalteten Kippstufen, handelsübliche Zähler mit Codeumsetzern oder Mikroprozessoren verwendet werden.

### ■ Beispiel 1: Steuerschaltung entwickeln

Für einen Schrittmotor mit Zeitablaufdiagramm **Bild 2** soll die Steuerschaltung für Rechtslauf entwickelt werden. a) Wie viele Bitstufen muss der Zähler mindestens haben? b) Stellen Sie die Wertetabelle für den Code-Umsetzer auf. c) Geben Sie die Schaltfunktionen für  $I_{11}$  und  $I_{21}$  an. d) Entwickeln Sie die Schaltung unter Verwendung eines 4-Bit-Zählers und eines XOR-Elements.

*Lösung:*

a) Aus **Bild 2** erkennt man, dass  $4 = 2^2$  verschiedene Zustände auftreten und jeweils zwei Stränge entgegengesetzte Pegel haben. Es genügen also **2 Bitstufen**.

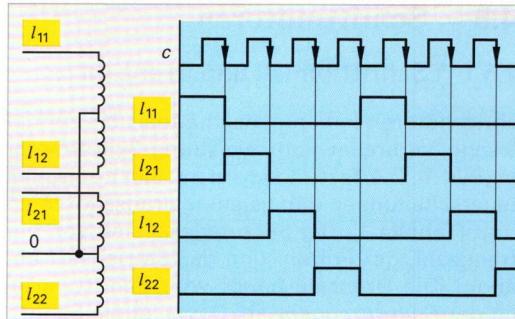
### b) Bild 3

$$\begin{aligned} I_{11} &= (\bar{q}_1 \wedge q_2) \vee (q_1 \wedge \bar{q}_2) = q_2 \\ I_{21} &= (q_1 \wedge \bar{q}_2) \vee (\bar{q}_1 \wedge q_2) = q_1 \leftrightarrow q_2 \end{aligned}$$

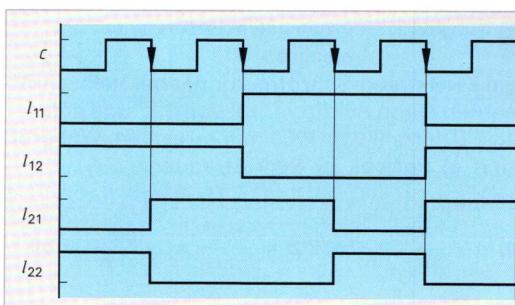
### c) Bild 4

## Aufgaben zu 14.7

- Für die Steuerschaltung eines Schrittmotors mit dem Zeitablaufdiagramm **Bild 1** soll ein Zähler mit Codeumsetzer verwendet werden. a) Bis zu welcher Zahl muss der Zähler mindestens zählen können? b) Wie lauten die Schaltfunktionen? c) Geben Sie die Schaltung des Codeumsetzers aus NOR-Elementen an.
- Für die Steuerschaltung eines Schrittmotors mit dem Zeitablaufdiagramm **Bild 1** soll ein Zähler aus vier JK-Kippgliedern mit entsprechender Beschaltung verwendet werden. a) Wie lauten die Schaltfunktionen? b) Wie lauten die Problemfunktionen?



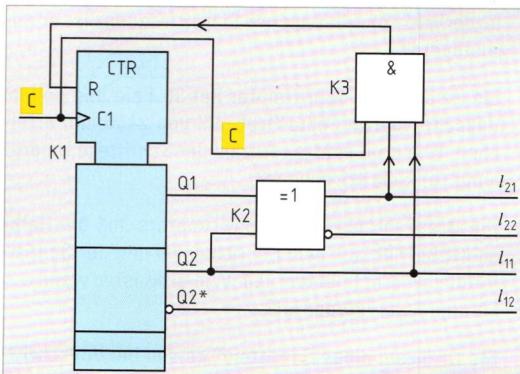
**Bild 1:** Einstrang-Ansteuerung mit Zeitablaufdiagramm für Linkslauf



**Bild 2:** Zeitablaufdiagramm einer Zweistrang-Ansteuerung für Rechtslauf

Q2	Q1	$I_{21}$	$I_{11}$
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	1
1	1	0	1

**Bild 3:** Wertetabelle zu Bild 2



**Bild 4:** Zähler mit Codeumsetzer für Zweistrang-Ansteuerung für Rechtslauf nach Bild 2