

- Ladung „ Q “ kann nur ganzzahliges Vielfaches von e sein

$$\hookrightarrow e = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C} \quad / \quad \begin{array}{c} \vec{I} \\ \oplus \\ \ominus \end{array} \quad \& \quad \begin{array}{c} \vec{I} \\ \oplus \\ \ominus \end{array}$$

- Ladung ist eine Erhaltungsgröße

$$\bullet \quad I = \frac{dQ(t)}{dt} = \text{im Zeitintervall } dt \text{ durch Fläche } A \text{ geströmte Ladung } dQ = Q(t) - Q(t_0) = \int_{t_0}^t I dt'$$

$$\bullet \quad [I] = \frac{[Q]}{[t]} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{As}}{\text{s}} = 1 \text{ A}$$

$$\bullet \quad I(t) > 0 // < 0$$

- $I \hat{=}$ Bewegungsrichtung positiver Ladungsträger

- Kennzeichen d. Stromes:

- magn. Wirkung (Durchflutungsgesetz)
- therm. Wirkung (Erwärmung eines Leiters)
- chem. Wirkung (Stoffumwandlungen/Stofftransport)

$$\bullet \quad \text{Ströme in geschlossenes Volumen} = 0 // \sum I_k = 0$$

- Messung von Strömen:

- | | | |
|---|---|--|
| Strom
Spannung
Wärmewirkung/chem. Wirkung | { | • Amperemeter |
| | | • Kraftwirkungen (Drehsenkentrument/Drehspulentrument) |
| | | • Messung d. magn. Flussdichte |
| | | • $I = \frac{U}{R}$ |
| | | • Heizdrahtinstrument |

- Spannung: **Ohne Spannung kein Strom** (potenzielle Energie der Q)

$$\frac{W_{AB}}{Q} = U_{AB}$$

$\hookrightarrow$ Bei positivem Vorzeichen vom höheren zum niedrigeren Energieniveau

- Maschengleichung: Summe aller Spannungen im Umlauf $\Rightarrow 0$

- Messung der Spannung: zwischen zwei Punkten // parallel

$\hookrightarrow$ Auswertung d. Kraftwirkung

- elekt. Leistung: $P = U \cdot I = \frac{dW}{dt} \Rightarrow W = \text{Energie (Wattsekunde/Stunde)}$

- resistive Zweipole: **» Ein Zweipol ist ein abgeschlossenes elektrotechnisches System mit ZWEI Anschlussklemmen. «**

$\Rightarrow$ Kennlinie $U-I // I-U$ -Relation $\Rightarrow$ nur von „ t “ abhängig

$\Rightarrow$ nicht lineare Bauelemente: „Dioden“:



Diode



Zener-Diode



Tunnel-Diode

II

• Widerstand: Ohmsches Gesetz: $U = R \cdot I$; $I = \frac{U}{R}$

$$[R] = 1 \frac{V}{A} = 1 \Omega$$

$$[G] = 1 \frac{A}{V} = 1 S = 1 \Omega^{-1}$$

• Funktionen: $I = Y(U)$ $U = Z(I)$

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \approx I_s e^{\frac{U}{U_T}} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \hookrightarrow I_s = \text{Sättigungsstrom} \end{array} \right\} \text{Z-Diode}$$

$\Rightarrow$ Spannungstabilisierung, Spannungsbegrenzung

$\Rightarrow$ Tunnel diode $I = Y(U)$ ($U = Z(I)$)

$\Rightarrow$ Glühlampe $U = Z(I)$ ($I = Y(U)$)

• diff. Widerstand / Leitwert:

$$r = \frac{d(U)}{d(I)} = r(I) \quad // \quad g = \frac{dI}{dU} = g(U)$$

• prakt. Verhalten!

$$I = \frac{U_0}{R} : \quad I = \begin{cases} 0 & \text{für } R \rightarrow \infty \\ \rightarrow \infty & \text{für } R \rightarrow 0 \end{cases}$$

$$U = I_0 \cdot R : \quad U = \begin{cases} 0 & \text{für } R = 0 \\ \rightarrow \infty & \text{für } R \rightarrow \infty \end{cases}$$

• ZPS:

EZPS

$u \uparrow \downarrow i$

$$P = U \cdot I > 0 \quad (\text{Erzeuger})$$

$$P = U \cdot I < 0 \quad (\text{Verbraucher})$$

VZPS

$u \downarrow \uparrow i$

$$(\text{Verbraucher})$$

$$(\text{Erzeuger})$$

• Leistung im VZPS:

$$P = U \cdot I = \text{konstant} \Rightarrow I = \frac{P}{u} \quad (\text{Leistungsgesetz})$$

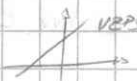
$$P > 0 \quad \text{Verbraucher}$$

$$P < 0 \quad \text{Erzeuger}$$

• aktive & passive Zweipole:

• aktiver Zweipol: Erzeuger oder Verbraucher (aktiv)

• passiver Zweipol: nur Verbraucher (Widerstand)
($U-I \parallel I-U$ wenn $U=0$)



• Bemessungsgleichung:

$$R = \frac{P}{\frac{I}{A}} \quad \text{spez. Widerstand}$$

$$G = \frac{K}{L} \quad \text{Leitfähigkeit}$$

$$[P] = \frac{[R]}{[A]} = \Omega \cdot m$$

$$[K] = \frac{[G]}{[L]} \cdot [R] = \frac{S}{m}$$

• Temperaturabhängigkeit von Widerstand & Leitwert:

$$R(T) = \rho(T) \cdot \frac{l}{A}$$

$$\Delta R = \Delta T \quad \text{in K}$$

$$R(T) = R(T_0) + \underbrace{\frac{dR}{dT}}_{\Delta R} \underbrace{(T-T_0)}_{\Delta T}$$

Widerstand bei T_0

$T_0 \triangleq$ Bezugs Temperatur

$$R(T) = R_0 + \Delta R \quad // \quad R = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

• Temperaturkoeffizient d. Widerstandes:

$$\alpha = \left. \frac{dR}{R \cdot dT} \right|_{T_0} \quad [\alpha] = \frac{1}{\text{K}} = \frac{1}{\text{K}}$$

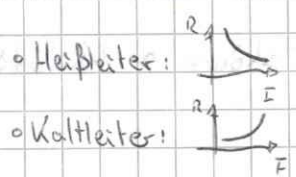
$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \left. \frac{dR}{dT} \right|_{T_0}$$

Bsp.: $\oplus$ Widerstands-
thermometer

$\ominus$ sehr kleine
Driftwert

$$G = G_0 \cdot (1 - \alpha \cdot \Delta T)$$

Bei Metallen: $0,004 / \text{K} \quad // \quad 4\% / \text{K}$



• Zusammenschaltung von Zweipolen:

- $\rightarrow$ STROM konstant SPANNUNG ADDIEREN
- $\rightarrow$ SPANNUNG konstant STROM ADDIEREN

linear + nichtlinear $\triangleq$ „Sicherung“ (Analog diff. Größen)

• Widerstände:

- $\rightarrow$ in Reihe: $R_1 + R_2$
- $\rightarrow$ parallel: $\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

• Zusammenschaltungen v. Strom & Spannungsquellen:

- Spannungsq. in Reihe: $I-U \Rightarrow$ nach rechts
- Strom parallel: $I-U \Rightarrow$ nach oben

IV

• PARALLEL:

• Spannungsquelle & Blackbox:

$$U = \text{gleich} = U_0$$

• von zwei Stromquellen:

$$\sum I_k$$

• REIHE:

• Stromquelle & Blackbox:

$$I = \text{gleich} = I_0$$

• von zwei Spannungsquellen:

$$\sum U_k$$

- SPANNUNG NIE PARALLEL & STROM NIE IN REIHE -

(nur wenn $U_1 = U_2 \parallel I_1 = I_2$)

• Spannungsteiler:

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Wheatstone: $R_x = R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2}$

• Stromteiler:

$$\frac{I_2}{I} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Teilstrome $\propto$ Leitwerten

Teilstrome $\propto$ Widerständen

• Superpositionsprinzip/Überlagerungssatz:

» Die Gesamtwirkung der Strom- & Spannungsquellen auf einen Strom oder eine Spannung setzt sich additiv aus den Wirkungen der einzelnen Quellen zusammen. Gesamtwirkung $\hat{=}$ Überlagerung der einz. Wirkungen.

$\Rightarrow$ Spannungsquelle $\hat{=}$ KURZSCHLUSS

$\Rightarrow$ Stromquelle $\hat{=}$ LEERLAUF

• Zweipoltheorie:

aktiver Zweipol:

kann Energie abgeben

+ bei idealer Spannungsquelle U unabhängig v. I

$\Rightarrow$ ideale Quellen u. ganz realisierbar $\Rightarrow$ also tedw. näherungsweise linear

» Jeder aktive Zweipol kann durch eine (im Klemmenverhalten) äquivalente Schaltung ersetzt werden

Spannungsq. in Reihe mit R_i

HELVOLZ THEOREM

WERTS HINTER

Stromquelle parallel mit R_i

$$U = U_0 - \frac{U_0}{I_0} \cdot I$$

$$R_i = \frac{U_0}{I_0}$$

$$I = I_0 - \frac{I_0}{U_0} \cdot U$$

$$G_i = \frac{I_0}{U_0} = \frac{1}{R_i}$$

• Bestimmung von Ersatzparametern:

- 1.) Leerlaufspannung (A.B. offen)
- 2.) Bestimmung I_k (A.B. Kurzg.)
- 3.) Deaktivierung aller unabhängigen Quellen

oder messtechnisch zwei U-I-Paare

• graphische Analyse:

- 1.) Aufteilung Netzwerk in 2 ZP
- 2.) Eintragen d. Kennlinien in U-I-Diagramm
- 3.) Schnittpunkte sind Lösungen.

mit ZPS!!

Wenn nur zu einem Zweig gehört

• stückweise lineare Approximation:

1.) Modellierung nichtlinearer Bauelemente mit linearen Teststücken

- 2.) Analyse d. entstehenden Netzwerke
- 3.) Definition d. Gültigkeitsbereiche

• Zusammenschaltung aktiver & passiver Zweipol:

$$U = U_L - R_i \cdot I \quad \& \quad U = R_a \cdot I \quad \left. \vphantom{U = U_L - R_i \cdot I} \right\} \text{ müssen GLEICHZEITIG erfüllt sein!}$$

$\Rightarrow$ Schnittpunkt der Kennlinien = Arbeitspunkt!!

• Leistungssatz:

Leistung der Quelle: $P_g = U_L \cdot I_k = I^2 \cdot (R_i + R_a)$

Im Verbraucher, Leistung: $P_a = \left(\frac{R_a}{R_i + R_a} \right)^2 \cdot U_L^2 = I^2 \cdot R_a$

Im innerw. u. g. Leistung: $P_i = \left(\frac{R_i}{R_i + R_a} \right)^2 \cdot U_L^2 = I^2 \cdot R_i$

$\eta = \frac{P_a}{P_g} = \text{Wirkungsgrad (40-50 \% \hat{=} \text{sehr hoch})}$

$\eta = \frac{I^2 \cdot R_a}{I^2 \cdot (R_i + R_a)} = \frac{R_a}{R_i + R_a}$

allein durch Widerstände bestimmt

$\Rightarrow$ hoher Wirkungsgrad: $R_i \ll R_a$

$\Rightarrow$ hohe Leistung im Verbraucher: $R_i = R_a$ Leistungsauspassung

$\nearrow \frac{U_L}{2}$
 $\searrow \frac{I_k}{2}$

$\Rightarrow$ absolute Abweichung (Fehler):

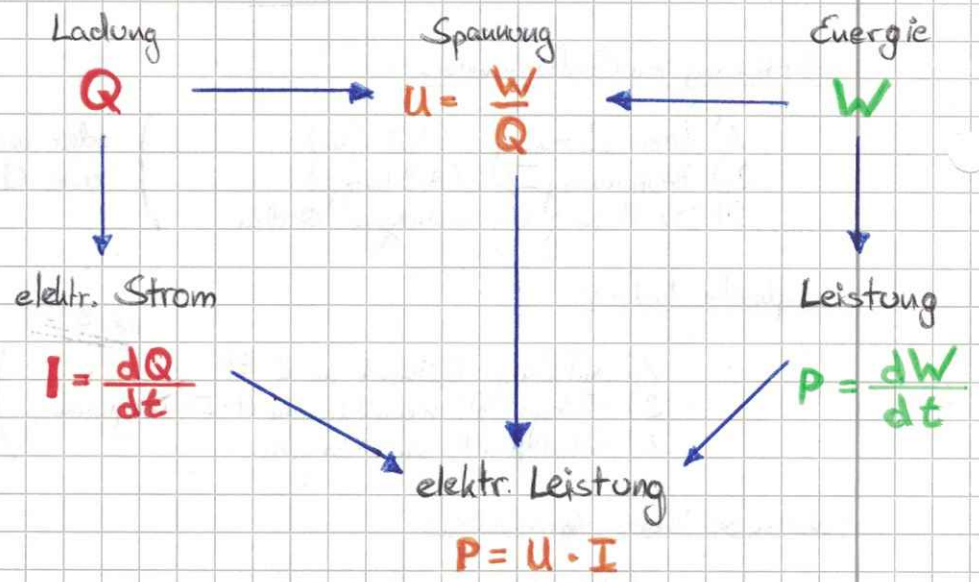
$\Delta I = I_k - I_m$

relative Abweichung:

$\frac{\Delta I_k}{I_k} = \frac{I_k - I_m}{I_k} = 1 - \frac{I_m}{I_k}$

$\Rightarrow 1 - \frac{R_i}{R_i + R_a}$

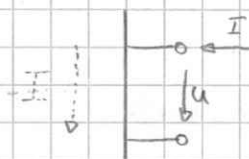
• Zusammenhänge:



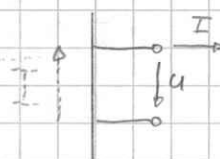
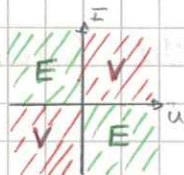
• Resistive Zweipole:

- $U-I$ Zusammenhang $f(U, I) \Rightarrow$ graphische Darstellung: „Kennlinie“

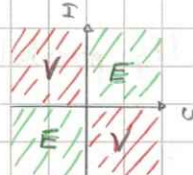
• ZPS:



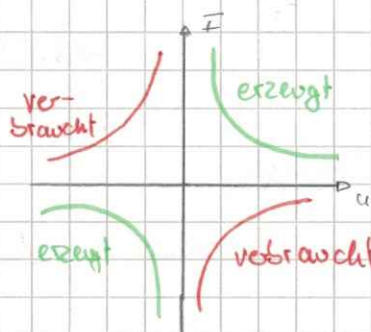
VZPS



EZPS



$\Rightarrow$ Leistungshyperbeln:



$$P = U \cdot I$$

$$I = \frac{P}{U}$$

$\Rightarrow$ EZPS (VZPS analog spiegel-symmetrisch)

$\Rightarrow$ aktives Zweipol: kann Energie erzeugen & verbrauchen
passives " " nur Energie verbrauchen

• reale Quellen:

$$U = U_k - R_i \cdot I$$

$$I = I_k - \frac{U}{R_i}$$

$$R_i = \frac{U_k}{I_k}$$

$$U(I) = U_k - R_i \cdot I$$

• spez. Widerstände:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

$\downarrow$
spez. Widerst.

$$G = \kappa \cdot \frac{A}{l}$$

$\downarrow$
Leitfähigkeit

$\Rightarrow$ allerdings $R(T) = \rho(T) \cdot \frac{l}{A}$

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$[\alpha] = \frac{1}{K}$$

$$G = G_0 \cdot (1 - \alpha \cdot \Delta T)$$

Zusammenschaltung ZP:

- in Reihe: „U“ addiert sich $\Rightarrow + + \rightarrow$
- parallel: „I“ addiert sich $\Rightarrow + + \rightarrow$

Parallel:

- U $\Rightarrow$ immer nur Spannungsquelle
- I $\Rightarrow$ addiert sich

Reihe:

- I $\Rightarrow$ immer nur Stromquelle
- U $\Rightarrow$ addiert sich

⚡ U_q parallel // I_q in Reihe (nur wenn $g_1 = g_2$)

Wheatstonesche Brücke:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_y$$

$\Rightarrow$ Verhältnisse sind gleich! „U“ im Messzweig = 0

Messbereichserweiterung:Spannung:

$$R_{\text{vor}} = \frac{U - U_m}{I_m}$$

zu mess. Sp. - Messbereich d. Instr.
Strom für Vollausschlag

$$R_{\text{vor}} = (x - 1) \cdot R_m$$

(Faktor Mb. erw - 1) $\cdot R_i$

Strom:

$$R = \frac{R_A}{x - 1}$$

Abweichungen:

abs.) $\Delta I/U = 1 - 2$

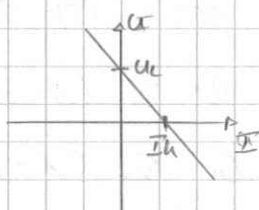
rel.) $\frac{\Delta I/U}{I_0/U_0} = \%$

Überlagerungssatz:

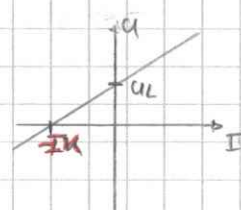
- 1.) immer nur eine Quelle an
- 2.) Einz. Ergebnisse voreichenrichtig addieren

Zweipoltheorie:

alt ZP:



EZPS



VZPS

$$U = U_k - R_i \cdot I$$

$$R_i = \frac{U_k}{I_k}$$

$$I = I_k - \frac{U}{R_i}$$

$$\rightarrow I=0, U=0$$

Kurzschluss
an den
Klemmen
 $U=0$

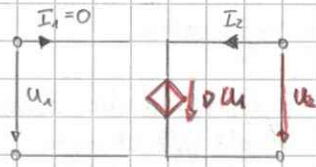
Leertag
an d. U-Klemmen
 $I=0$

• gesteuerte Quellen:

linear gest. Quellen: (eine Steuergröße):

• spannungsgesteuerte Spannungsquelle:

» Spannungsverstärker «

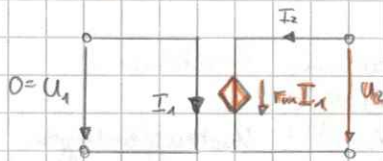


$$I_1 = 0$$

$$u_2 = v \cdot u_1 \quad (v = \text{Spannungsverst.})$$

• stromgesteuerte Spannungsquelle:

» Hallelement «

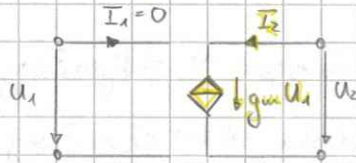


$$u_1 = 0$$

$$u_2 = r_m \cdot I_1 \quad (r_m = \text{Transferwiderstand})$$

• spannungsgesteuerte Stromquelle:

» Feldeffekttransistor «

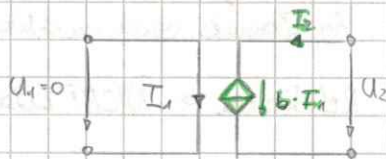


$$I_1 = 0$$

$$I_2 = g_m \cdot u_1 \quad (g_m = \text{Transferleitwert})$$

• stromgesteuerte Stromquelle:

» Bipolartransistor, Optokoppler «

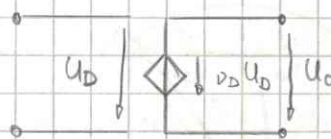
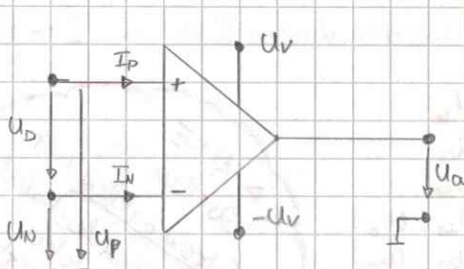


$$u_1 = 0$$

$$I_2 = b \cdot I_1 \quad (b = \text{Stromverstärkung})$$

• Operationsverstärker:

- Spannungsverstärker
- sehr hohe Verstärkung $v_D : -U_V \leq u_a \leq U_V$



$$u_a = v_D \cdot (u_p - u_D)$$

$$= v_D \cdot u_D$$

$$I_p = I_N = 0$$

⇒ invertierendes Verst: $v \approx -\frac{R_2}{R_1}$

$$v_D \gg \frac{R_2}{R_1}$$

⇒ nicht invert. : $v \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$

$$v_D \gg \frac{R_2}{R_1}$$

(X)

• Überlagerungssatz:

- 1.) geteilte Quellen durch „normale“ ersetzen
- 2.) wie gewohnt ausschalten, reduzierend vzt addieren
- 3.) Ersatzquellen durch „Originalauswahl“ ersetzen

• Netzwerkanalyse:

⇒ vollst. Kirchhoffsches Gleichungssystem:

$z =$ U-I Relationen der Zweige

$k-1 =$ Knotengleichungen

$z - (k-1) =$ Maschengleichungen

$2 \times z =$ Gleichungen für $2z$ Unbekannte

- I) **Zählrichtung** Zweigspannung & -ströme
- II) **U-I-Relationen** d. Zweige
- III) Auswahl von $k-1$ Knoten & **Knotengleichungen**
- IV) Auswahl von $z - (k-1)$ unabhängigen Maschen & **Maschengleichungen**
- V) **Lösen** des Gleichungen

⇒ vollständiges Baum: $k-1$ Zweigen ⇒ Äußere Zweige & Masche (Fundamentalsystem)

⇒ Aufklemmen: Vollständiges Graphenmodell ⇒ Einen Zweig aufklemmen & Masche

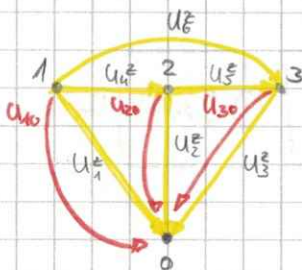
⇒ Fenstermaschen: (nur bei unbelasteten Netzwerken)

! **Ströme & Spannungen des Ko-Baumes sind unabhängig!**

⚡ **Nicht lineare I-U-Relationen ⇒ NICHT LÖSBAR** ⚡

• Knotenspannungsanalyse:

• Spannungen zwischen Knoten & einem Bezugspunkt



$$\begin{aligned} U_{21} &= U_{10} \\ U_{22} &= U_{20} \\ U_{23} &= U_{30} \\ U_{24} &= (U_{10} - U_{20}) \\ U_{25} &= (U_{20} - U_{30}) \\ U_{26} &= (U_{10} - U_{30}) \end{aligned}$$

▶ **ALLE** in
Strömungen mit
Parallelwiderstand
umwandeln
+ Leitzwerte!

- 1.) Bezugsknoten & Knotenspannungen
- 2.) Aufstellen von $k-1$ Knotengleichungen mittels U-I-Relationen
- 3.) Auflösen der Gleichungen nach Knotenspannungen
- 4.) Berechnung der gesuchten Größen aus den Knotenspannungen

⇒ Knotenadmittanzmatrix • Knotenspannungsvektor = Vektor d. Einskürungen

$$(G) \cdot (U) = (I)$$

Heruntergeladen von fsrwiwi.de/zusammenfassungen

ohne gest.
Quellen symm!!
 $\begin{pmatrix} G_1 & -G_2 & -G_3 \\ G_1 & Z_1 & -G_3 \\ G_1 & -G_2 & Z_1 \end{pmatrix}$

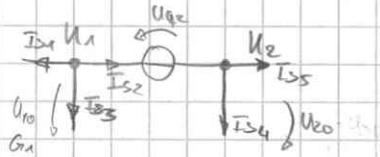
⇒ mit gesteuerten Quellen ⇒ „ $U^* // g_m U$... als Differenz d. Knoten-Spannungen aufschreiben & auflösen!

• Superknoten:

⇒ Spannungsquelle zwischen zwei Knoten

↳ nicht direkt durch U_{10} , U_{20} etc. auszudrücken

⇒ Schnittmengengleichung ⇒ dabei Quelle ignorieren!

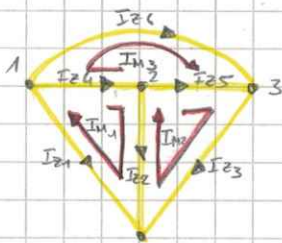


$$\Rightarrow \begin{aligned} I_{S1} + I_{S3} + I_{S5} + I_{S4} &= 0 \\ U_{10} \cdot G_1 + u & \quad \quad \quad u &= 0 \end{aligned}$$

$$U_{10} = x x$$

$$\Rightarrow U_{10} + U_{q2} = U_{20}$$

• Maschenstromanalyse:



• Ströme in den einzelnen Maschen

• Ein Gleichungssystem mit „m“ Gleichungen

$$\begin{aligned} I_{z1} &= -I_{M1} \\ I_{z2} &= I_{M1} - I_{M2} \\ I_{z3} &= I_{M2} \\ I_{z4} &= I_{M1} - I_{M3} \\ I_{z5} &= I_{M2} - I_{M3} \\ I_{z6} &= I_{M3} \end{aligned}$$

ALLE Quellen im Stromkreis + Widerstände!

- 1.) „m“ unabhängige Maschen wählen & Maschenströme
- 2.) Aufstellen der Maschengleichungen mittels Maschenströmen
- 3.) Auflösen d. Gleichungen nach den Maschenströmen
- 4.) Berechnen der gesuchten Größen aus den Maschenströmen

$$\Rightarrow \text{Maschenimpedanzmatrix} \cdot \text{Maschenstromvektor} = \text{Vektor d. (neg.) Quellspannungen}$$

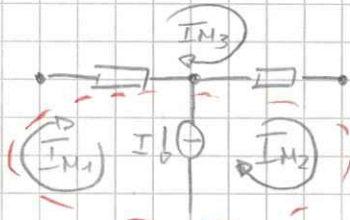
$$(R) \cdot (I) = (-U_q)$$

⇒ mit gesteuerten Quellen: einfach Quelle an offene Klemmen & mit gewonnenen Maschen berechnen

• Supermasche:

• wenn Stromquelle in Zweig (ideale) ohne Umm.

↳ nicht durch Maschenströme ausdrückbar



$$3.) \quad x x \cdot I_{M1} \dots$$

S.) Supermasche, Ströme „normal“ verwenden

$$I) \quad I_1 - I_2 = 0$$

↳ Beziehung der ersetzten Maschenströme als „Knotenfolger“

• Bei Transistoren:

- Fenstermaschen
- ein Maschenstrom durch gest. Quelle vorgegeben
↳ $I_B = I_{IX}$ → einsetzen & verwenden