

8 Messung von Strom und Spannung

Teil 2: Wechselspannung und -strom

Überblick

- Gleichstrom- und Gleichspannungsmessung
 - Grundsaltungen
 - Schaltungen zum Management des Messbereichs
 - Überlastschutz
 - Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung
 - Beschreibung der Wechselgrößen
 - Messschaltungen
 - Messwandler
 - Multimeter
- } Teil 1

Wechselgrößen Grundlagen

Zeitlich periodische Spannung (Strom) mit der Periodendauer T: $u(t)$

Gleichanteil:
$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

Scheitelwert:
$$\hat{U} = |u(t)|_{max}$$

Scheitelfaktor:
$$S = \frac{\hat{U}}{U_{eff}}$$

Gleichrichtwert:
$$|\bar{u}| = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

Formfaktor:
$$F = \frac{U_{eff}}{|\bar{u}|}$$

Effektivwert:
$$U_{eff} = U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u(t))^2 dt}$$

Effektivwert einer Mischspannung
$$U_{eff,ges} = \sqrt{U_-^2 + U_{eff,\sim}^2}$$

Grundlagen

Sinusförmige Spannung: $u(t) = \hat{U} \sin(\omega t)$ (ohne offset)

Gleichanteil: $\overline{u(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{U} \sin(\omega t) dt = 0$

Scheitelfaktor:

$$S = \frac{\hat{U}}{U_{\text{eff}}} = \sqrt{2} = 1,414$$

Scheitelwert: $\hat{U} = |u(t)|_{\text{max}}$

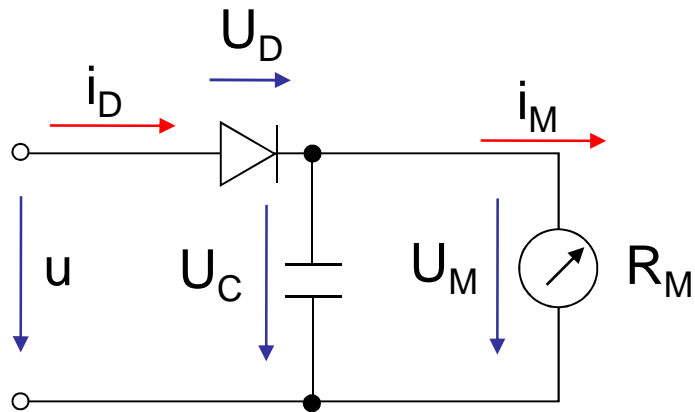
Formfaktor:

Gleichrichtwert: $|\overline{u(t)}| = \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{U} \sin(\omega t)| dt = \frac{2}{\pi} \hat{U}$

$$F = \frac{U_{\text{eff}}}{|\overline{u}|} = \frac{1/\sqrt{2}}{2/\pi} = 1,111$$

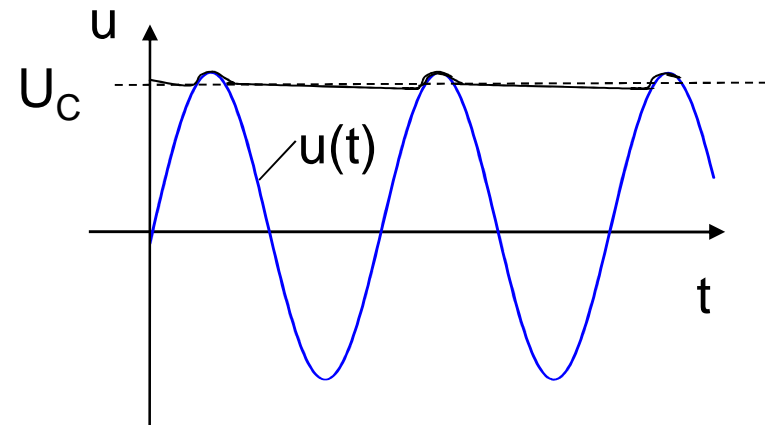
Effektivwert: $U_{\text{eff}} = U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\hat{U} \sin(\omega t))^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{U}$

Spitzenwertmessung



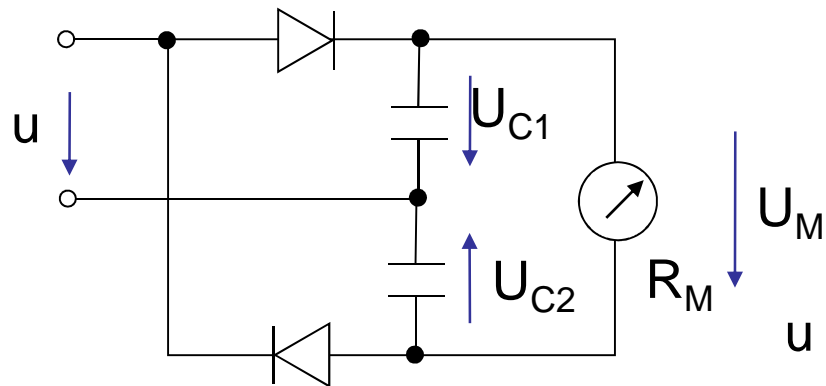
$$\hat{U} = U_C + U_D$$

$$\hat{U} \approx U_C$$

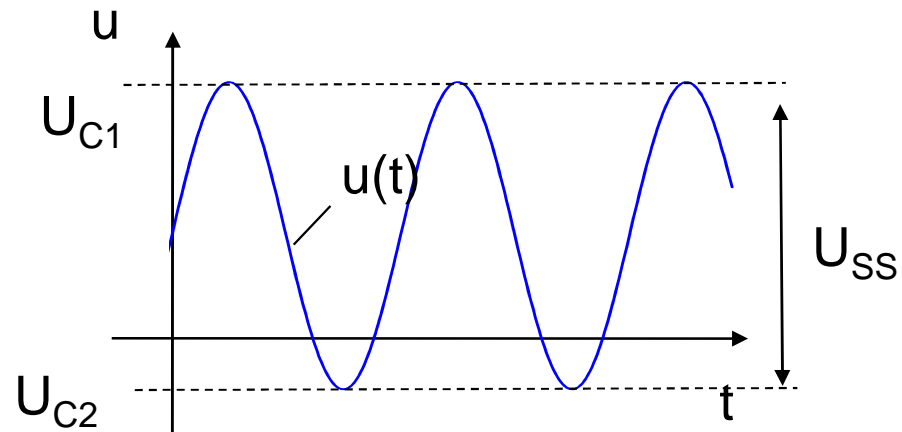


Messergebnis: positiver Scheitelwert
Negativer Scheitelwert: Diode umpolen

Messung des Spitze-Spitze-Wertes



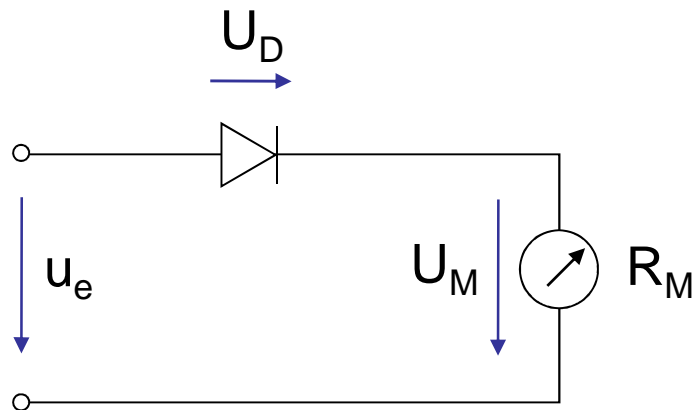
$$U_{SS} = U_{C1} + U_{C2} = U_M$$



unter Vernachlässigung der Diodenspannungen

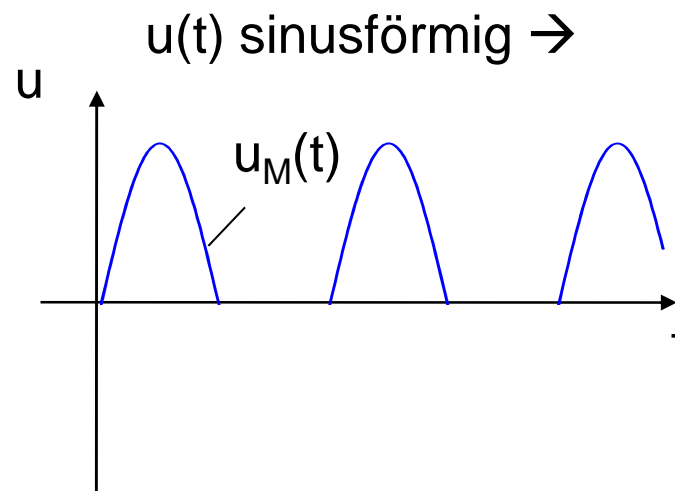
Messung des Gleichrichtwertes

Einweggleichrichtung



$u(t)$ sinusförmig \rightarrow

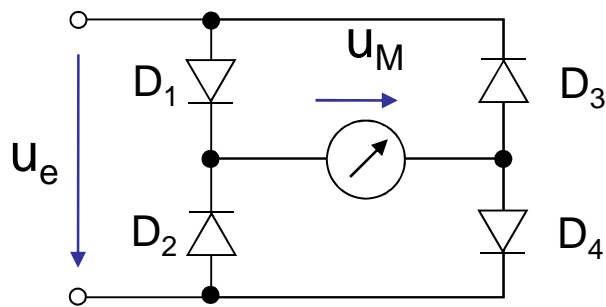
$$\overline{u_M} = \frac{1}{2} \overline{|u_e|}$$



Vernachlässigung der Diodenspannung & Nichtlinearität
($R_M \gg R_D$)

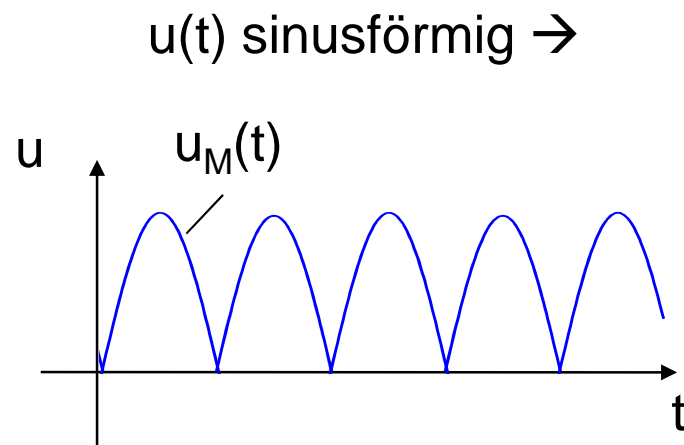
Messung des Gleichrichtwertes

Vollweggleichrichtung Beispiel: Graetz-Brücke



$$u_e > 0 \rightarrow u_M = u_e$$

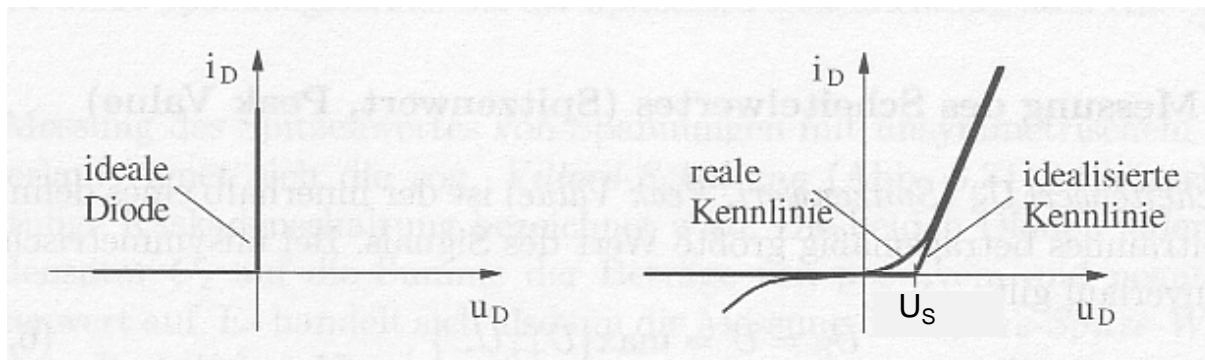
$$u_e < 0 \rightarrow u_M = -u_e$$



Vernachlässigung der Dioden-Nichtlinearität !

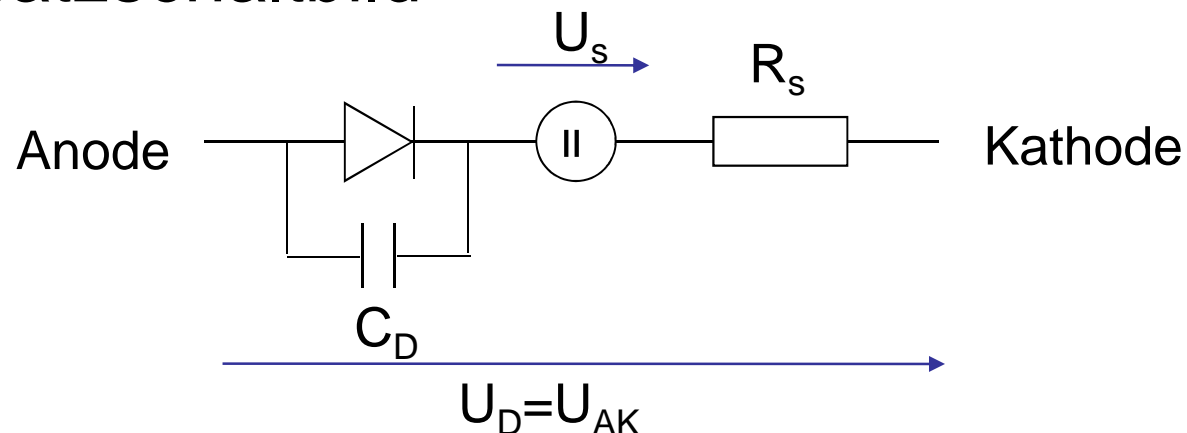
Einfluss der nichtlinearen Diodenkennlinie

- ideale vs. reale Kennlinie



Silizium: $U_S=0,7V$
Germanium: $U_S=0,3V$

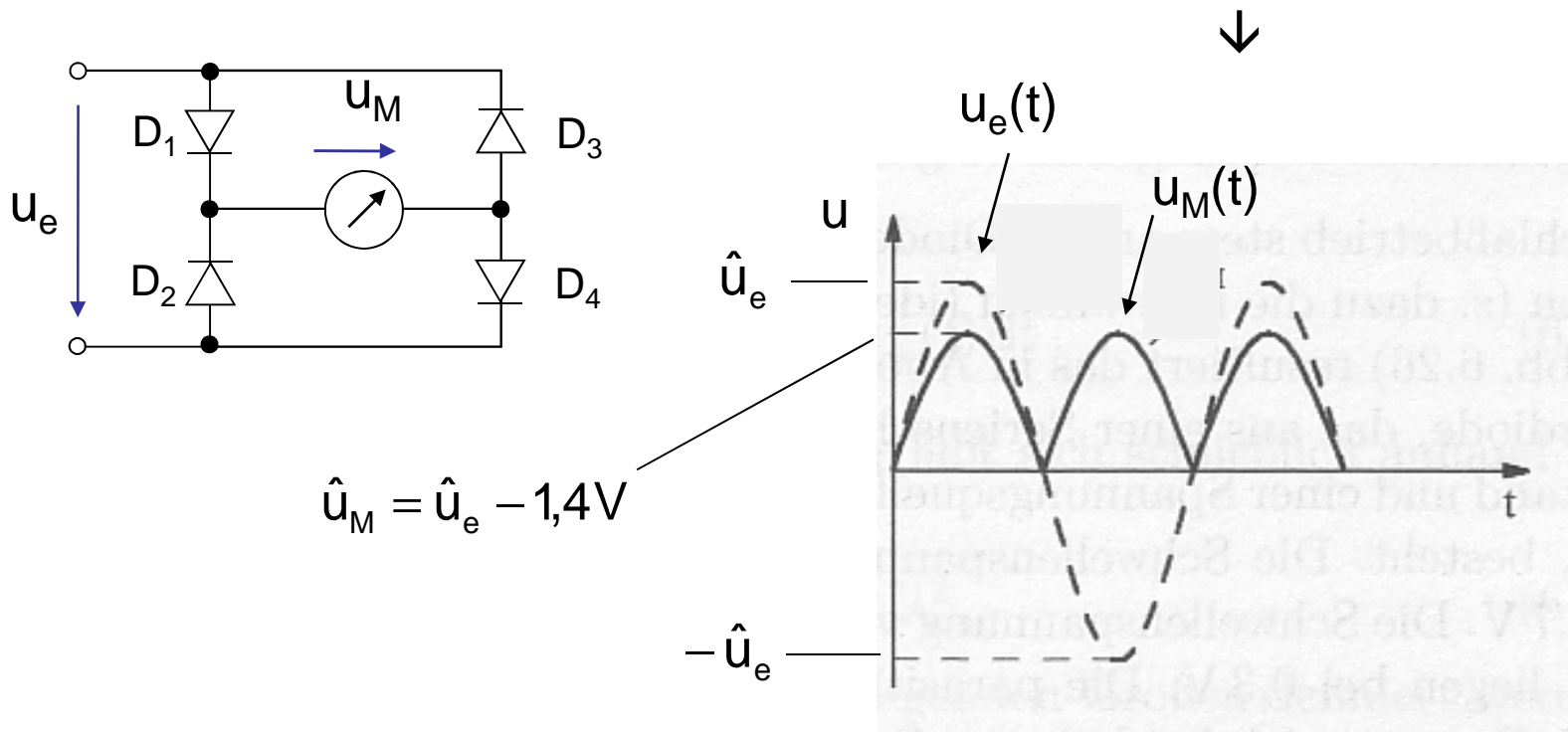
- Ersatzschaltbild



Messung des Gleichrichtwertes

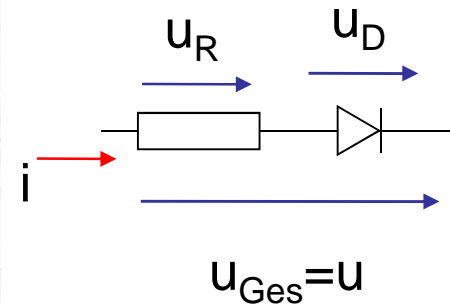
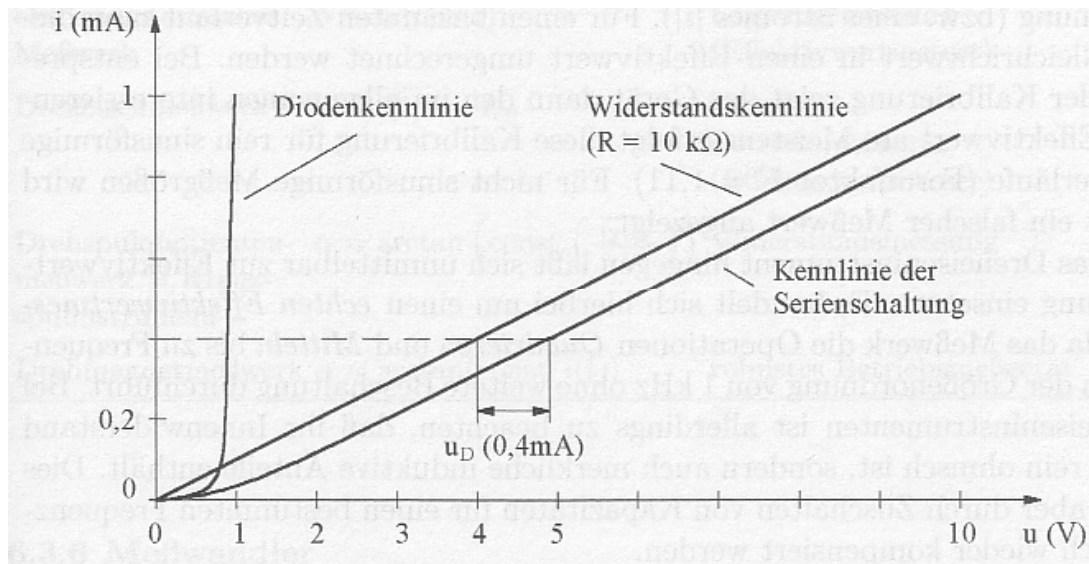
Vollweggleichrichtung Beispiel: Graetz-Brücke

unter Berücksichtigung der nichtlinearen Diodenkennlinie

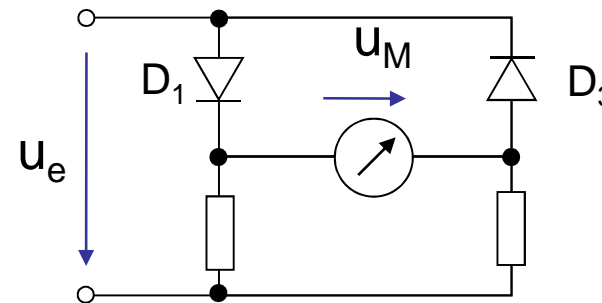


Linearisierung der Diodenkennlinie

■ Linearisierung durch Vorwiderstand



Beispielschaltung:

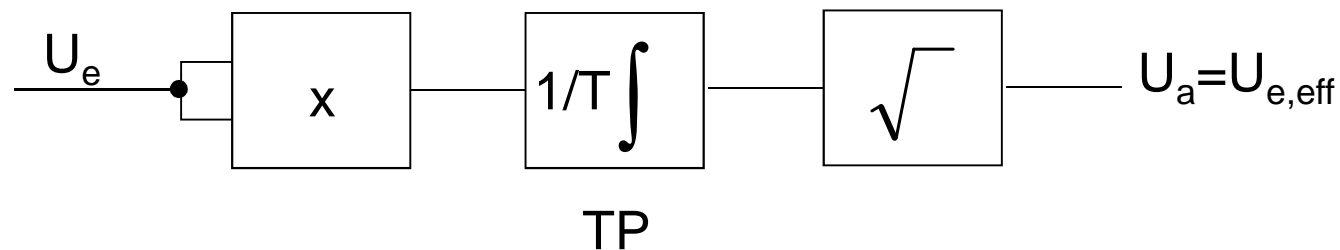


- -Empfindlichkeit sinkt
-Innenwiderstand sinkt

Messung des Effektivwertes

- a) Digitale Messung und Berechnung
 - Eingangsgröße digitalisieren (AD-Wandler)
 - Effektivwert nach Aufnahme einer oder mehrerer Signalperioden nach Definition berechnen
 - hoher Aufwand in der Abtastung nötig

- b) Elektronische Effektivwertbestimmung
 - Rechenschritte mit Hilfe analoger elektronischer Schaltungen aus diskreten Operationsverstärkern
 - Integrierte RMS* ICs



* „root mean square“

Messung des Effektivwertes

- c) Indirekte Effektivwertbestimmung
- Bestimmung aus Gleichrichtwert und Formfaktor
 - findet Anwendung in vielen einfachen Standard-Messinstrumenten
 - richtig für sinusförmige Größen
 - systematischer Messfehler für Nicht-Sinusgrößen

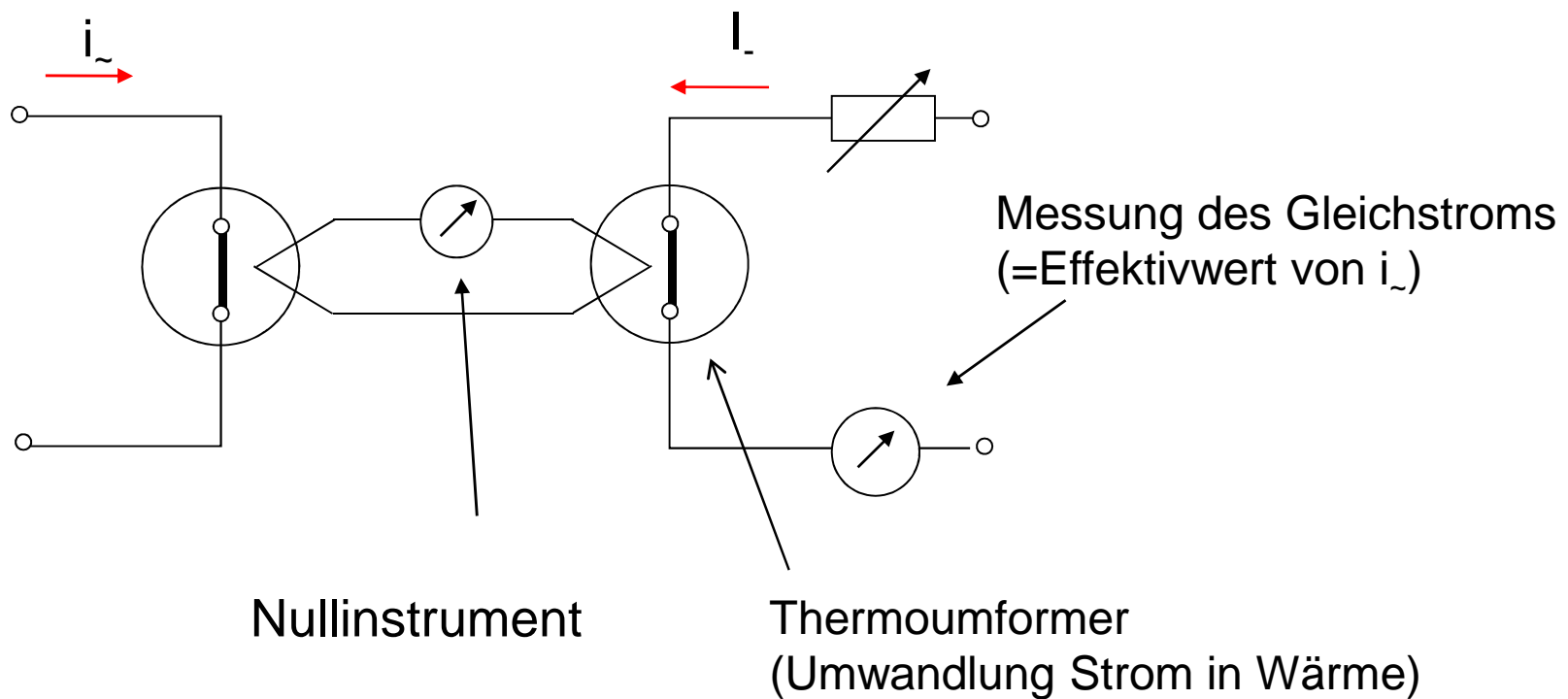
$$F = \frac{U_{\text{eff}}}{|u|} = 1,111$$

$$U_{\text{eff}} = 1,111|u|$$

- d) Messung mit Dreheiseninstrument
- Klassische Methode
 - Genaueste Methode
 - Wegen Eigeninduktivität des Messwerks bis 1kHz geeignet
 - Zeigerausschlag: $\bar{\alpha} = kI^2$

Messung des Effektivwertes

- e) Messung durch thermischen Umformer
(Wechselstrom-Gleichstrom-Komperator)
- Messprinzip beruht direkt auf Definition des Effektivwertes
 - großer Frequenzbereich (...40 GHz)



Messwandler

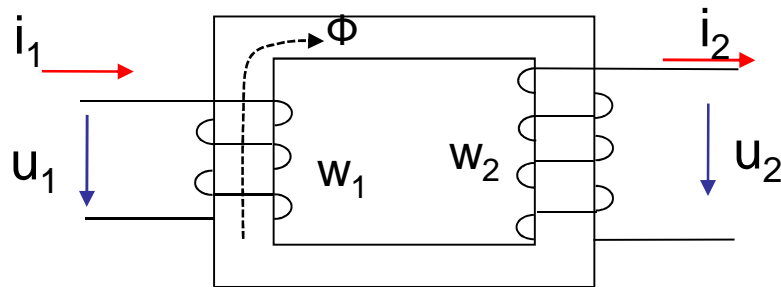
Ziel: Messbereichsanpassung /- erweiterung

Vorteile:

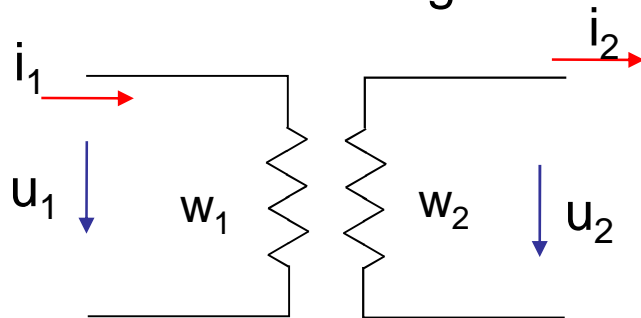
- keine thermischen Verluste durch Widerstandsnetzwerke
- Potentialtrennung zwischen Messobjekt und Messgerät
- Hoch- und Höchstspannungs- bzw. Strommessung
- für Wechselstrom:
 - Stromwandler
 - Spannungswandler
- für Gleichstrom, basierend auf Hall-Elemente

Messwandler → Übertrager bzw. Transformatoren

Allgemeiner Übertrager:



Idealer Übertrager:



Verluste:

- „Kupferverluste“
- Streufelder
- „Eisenverluste“
- Magnetisierungsstrom

Verlustfrei:

- keine Kupfer und Wirbelstromverluste
- keine Streufeldverluste
- vernachlässigbarer Magnetisierungsstrom

Messwandler Kenngrößen

Idealer Umformer / Transformator

Scheinleistungen (idealer Umformer)

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{U_1}{U_2}$$

$$P_{s,\text{primär}} = P_{s,\text{sekundär}}$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Übersetzungsverhältnis

$$\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2}$$

Spannungswandler
(Sekundärseite: hochohmig)

$$K_U = \frac{U_1}{U_2} = \ddot{u}$$

Stromwandler
(Sekundärseite: niederohmig)

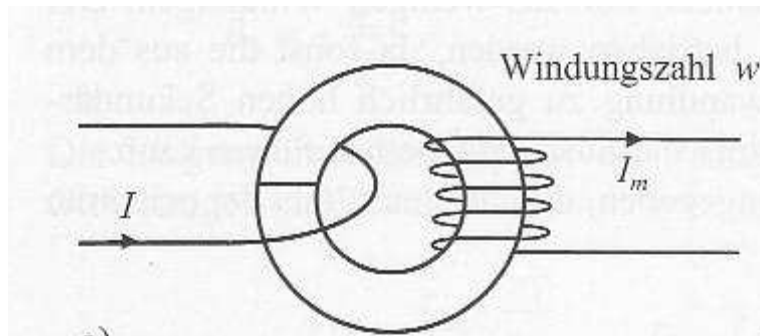
$$K_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{\ddot{u}}$$

Stromzange, für Wechselströme

Messtrom
(Sekundärseite) $I_m = I \frac{1}{w}$

Vorteile:

- geringer Messstrom
- galvanische Trennung
- kein Auftrennen des Stromkreises



Primärwindung: 1
Sekundärwindung: w



Beispiel: Fa. Fluke, $I_{\max} \leq 400 \text{ A}$

Eigenschaften von Messwandlern

- reale Messwandler, Messabweichung in
 - Betrag der Spannungen / Ströme
 - Phasenverschiebung
- für Beträge
 - relative Messabweichungen

$$e_{\text{rel,I}} = \frac{I_{1,\text{soll}} - I_{1,\text{ist}}}{I_{1,\text{ist}}} = \frac{K_I I_2 - I_1}{I_1} \quad \text{mit} \quad K_I = \frac{1}{\ddot{u}}$$

$$e_{\text{rel,U}} = \frac{U_{1,\text{soll}} - U_{1,\text{ist}}}{U_{1,\text{ist}}} = \frac{K_U U_2 - U_1}{U_1} \quad \text{mit} \quad K_U = \ddot{u}$$

Eigenschaften von Messwandlern

- Phasenverschiebung zwischen Leiterstrom und Messstrom
 - spezifiziert als max. zulässiger Fehlwinkel ,
(typ. $0,1^\circ \dots 3^\circ$)
- Spezifizierung durch
 - Genauigkeitsklassen bzw.
 - Messabweichung proportional zum Anzeigewert und konstanter Anteil (siehe Datenblätter, bei digitalen Messgeräten)
 - Beispiel (Fluke 365):
 - 2 % \pm 5 Ziffern (45 – 65 Hz)
 - 2,5 % \pm 5 Ziffern (65 – 400 Hz)

Gleichstromzangen

■ Hall-Element

$$\mathbf{F}_m = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}; \quad F_m = qvB$$

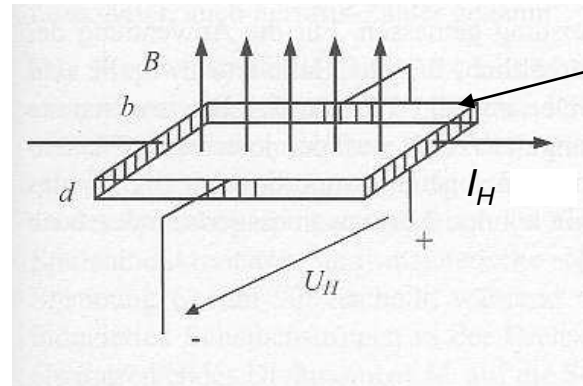
$$\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}; \quad F_e = qE = q \frac{U_H}{b}$$

$$F_e = F_m \Rightarrow U_H = bvB$$

$$\text{mit } \frac{I_H}{bd} = nvq \Rightarrow U_H = k_{HH} I_H B$$

↑
Sensorspannung = „Hallspannung“

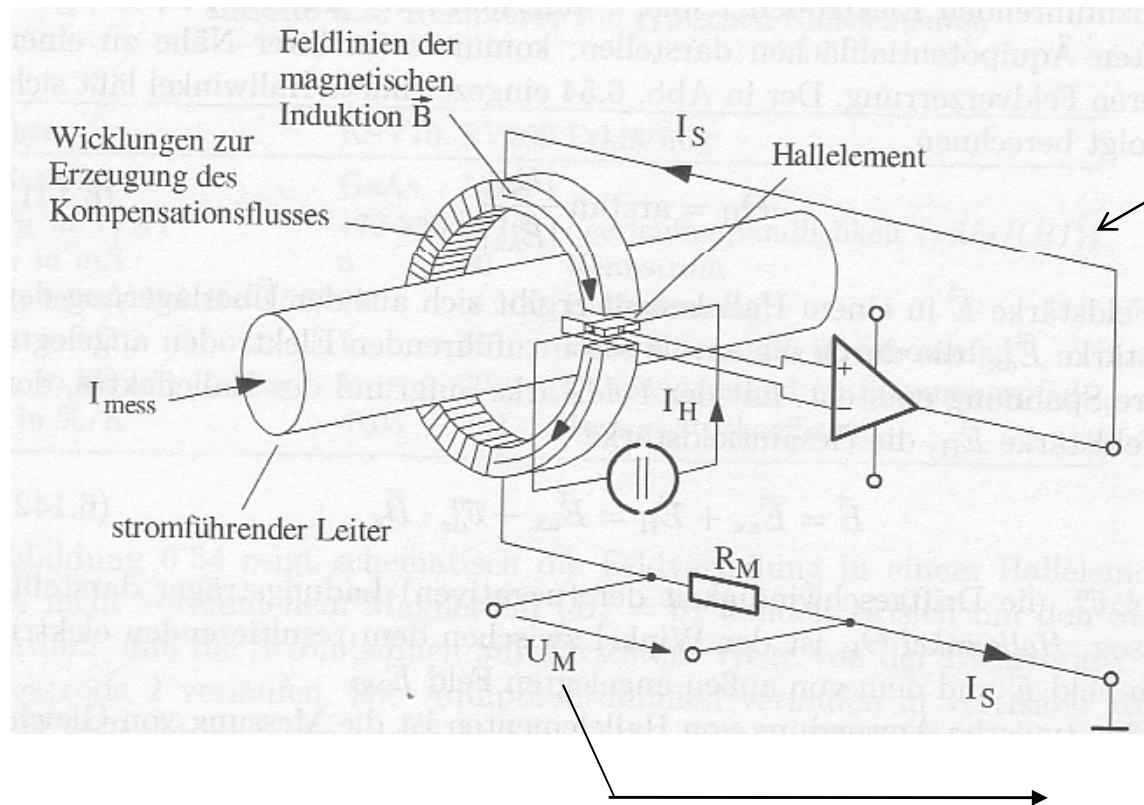
$$q = -e_0$$



InAs od.
InSb

Gleichstromzangen

■ Kompensationsprinzip



Kompensationskreis

(zur Unterdrückung von Stör-Magnetfeldern, z.B. Erdmagnetfeld → Genauigkeitserhöhung)

$$\underline{B}_m = \mu_0 \mu_r H_m = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi r_m} I_{\text{mess}}$$

$$U_H = k_{H/H} B_m = k_{H/H} \frac{\mu_0}{2\pi r_m} I_{\text{mess}}$$

$$\rightarrow U_M \sim I_{\text{mess}}$$

Vielfachmessinstrumente „Multimeter“

- Gleichspannungs- und Gleichstrommessung
- Wechselspannungs- und Wechselstrommessung
- Effektivwertmessung (wenn explizit spezifiziert auch für nicht sin-förmige Wechselgrößen)
- Begrenzerschaltungen
- Widerstandsmessung
- Durchgangsprüfung („Klingelmessung“)
- Betriebsartenwahlschalter (DC, AC, AC_{RMS} , DC/AC_{RMS})

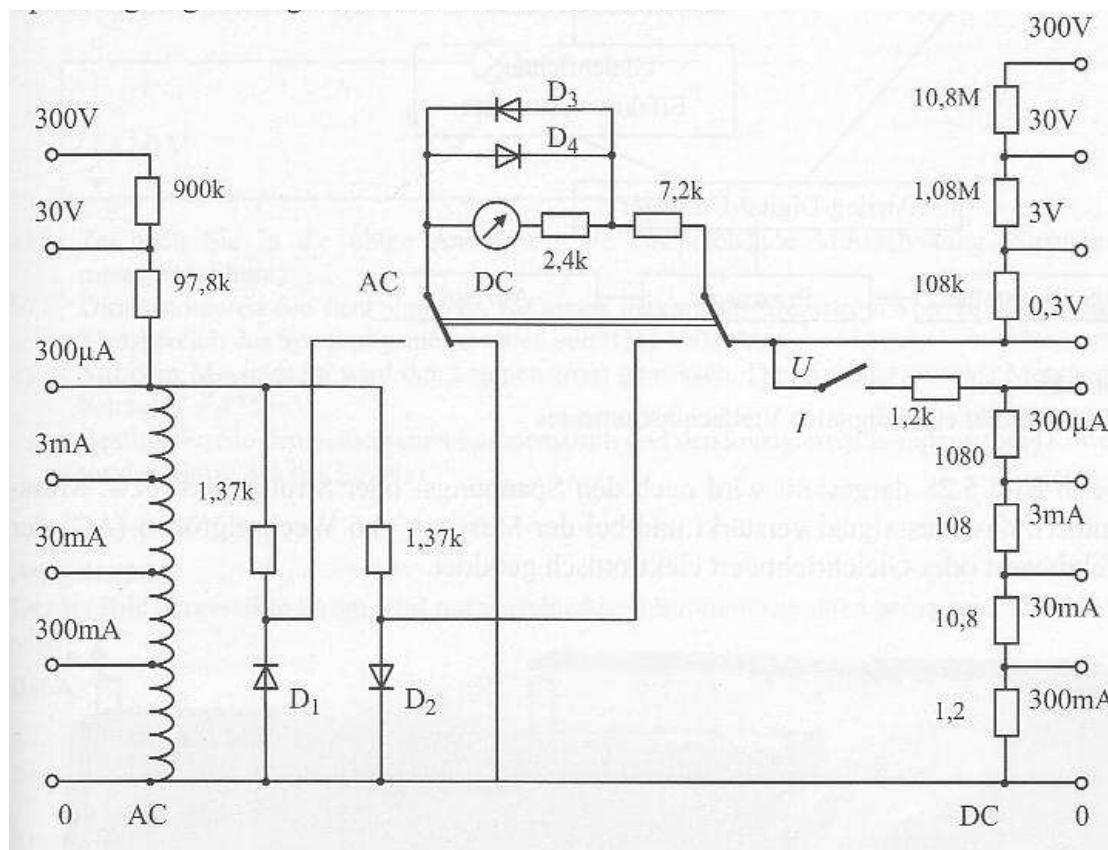
Betriebsarten

Strom und Spannungsmessung

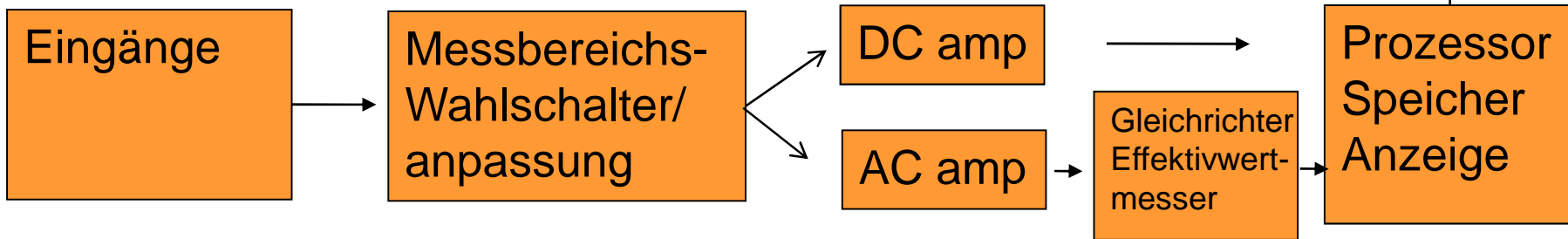
- DC
 - GleichanteilmessungMessung des Mittelwerts,
Gleichanteil der Eingangsgröße
- AC
 - ~ WechselanteilmessungAnzeige des Effektivwertes des
Wechselanteils
(indirekte Effektivwertbestimmung !
→ nur für sinusförmige Signale)
- AC_{RMS}
 - Wechselanteilmessungdirekte Messung / Bestimmung
des wahren Effektivwertes
der Eingangsgröße
- $(AC+DC)_{RMS}$
 - ≈ Gleich- und Wechsel-
anteilmessungdirekte Messung / Bestimmung
des wahren Effektivwertes
der Mischgröße

Analoge Vielfachmessinstrumente

Beispiel: $R_m = 2,4k\Omega$, Messwerkvollausschlag bei $25\mu A$,
Eingangswiderstand für die Spannungsmessung: $40k\Omega/V$



Digitale Vielfachmessinstrumente



Lernziele Kapitel 8

- Gleichstrom- und Gleichspannungsmessung
 - Grundsaltungen
 - Schaltungen zum Management des Messbereichs
 - Überlastschutz
- Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung
 - Beschreibung der Wechselgrößen
 - Messschaltungen
 - Messwandler
- Multimeter