2. Grundlagen:

2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:

2.3.5 Dynamisches Verhalten der Messgeräte

Das Ausgangssignal eines Messgeräts kann nicht beliebig schnell dem Eingangssignal folgen, da in dem Messgerät

- Reibungs- und Dämpfungswiderstände überwunden,
- Massen beschleunigt oder abgebremst,
- Ladungen zu- oder abgeführt,
- Energiespeicher gefüllt oder geleert

werden müssen. Ein sich zeitlich änderndes Eingangssignal $x_e(t)$ bedingt ein sich zeitlich änderndes Ausgangssignal $x_a(t)$. Dabei sind auch die Ableitungen der Zeitfunktionen von Bedeutung. So ist, um das dynamische Verhalten eines Messgeräts zu beschreiben, die Differenzialgleichung zwischen dem Eingangs- und dem Ausgangssignal aufzustellen. Die höchste Ableitung des Ausgangssignals bestimmt dann die Ordnung der Differenzialgleichung.

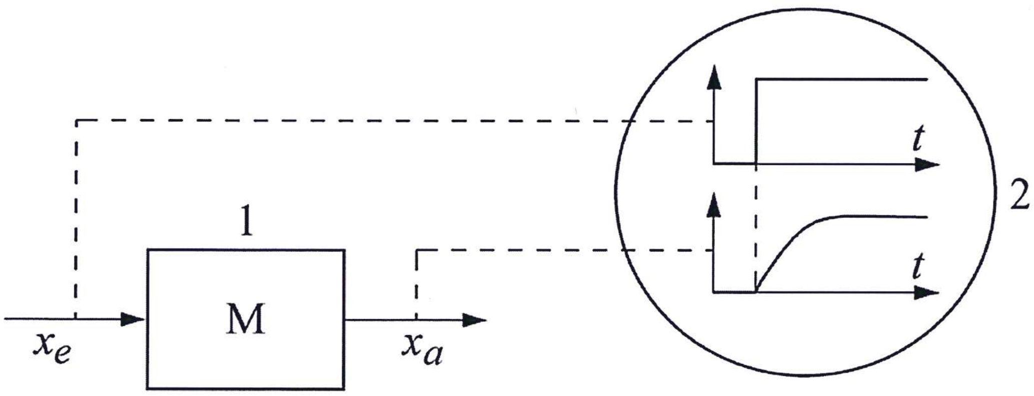
Quelle:Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl, Bernhard Zagar, **Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen, Verlag:** Carl Hanser Verlag GmbH, 2014, **ISBN-10:** 3446442081, **ISBN-13:** 978-3446442085

Kapitel 1.5, **Seite** 48

2. Grundlagen:

2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:

2.3.5 Dynamisches Verhalten der Messgeräte



anregende Funktion	Antwortfunktion
Sinusfunktion	Sinusantwort; Amplituden- u. Phasengang; Frequenzgang
Sprungfunktion	Sprungantwort; Übergangsfunktion
Impulsfunktion	Impulsantwort; Gewichtsfunktion

Quelle:Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl, Bernhard Zagar, **Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen, Verlag:** Carl Hanser Verlag GmbH, 2014, **ISBN-10:** 3446442081, **ISBN-13:** 978-3446442085

Kapitel 1.5, **Seite** 48

2. Grundlagen:
2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:
2.3.5 Dynamisches Verhalten der Messgeräte

$$X(s) = \mathrm{L}\{x(t)\} = \int_0^\infty x(t) \cdot e^{-st}\, \mathrm{d}t.$$

$$x(t) = \mathrm{L}^{-1}\{X(s)\} = \frac{1}{2\pi \mathrm{j}} \int_{\delta-\mathrm{j}\infty}^{\delta+\mathrm{j}\infty} X(s) \cdot e^{st}\, \mathrm{d}s.$$

Differentialgleichung → Laplace-Transformation → algebraische Gleichung

↓

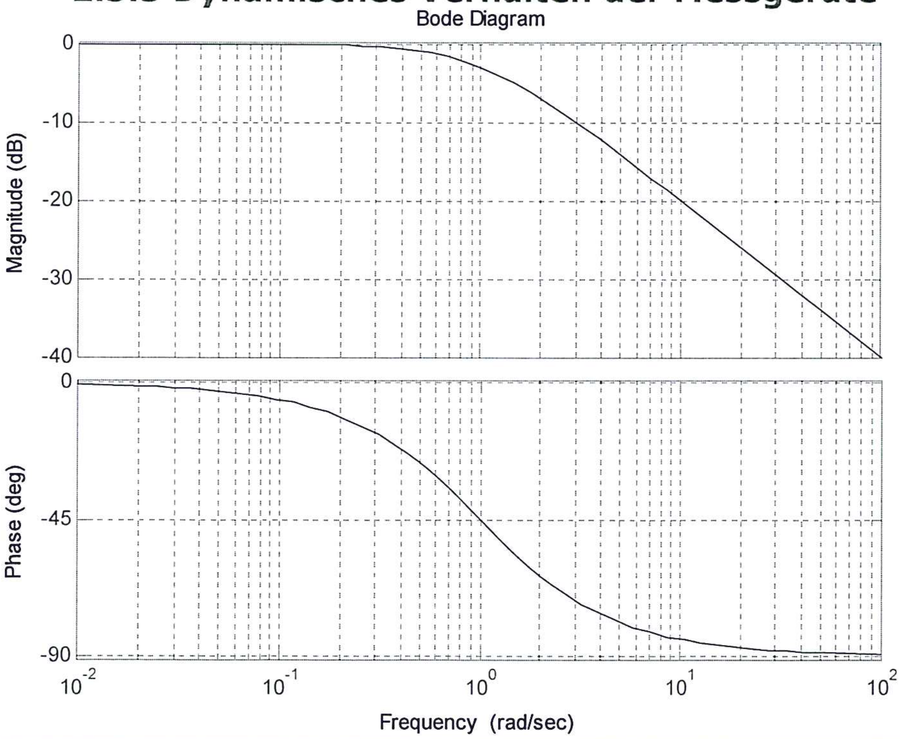
Lösung der Differentialgleichung ← inverse Laplace-Transformation ← Lösung der algebraischen Gleichung

Quelle: Thomas Mühl, **Einführung in die elektrische Messtechnik, Verlag:** Springer Vieweg; Auflage: 4., 2014, **ISBN-10:** 3834808997
ISBN-13: 978-3834808998

Kapitel 3.2.1, **Seite** 43

Tafelschrieb, Herleitung Verzögerungsglied 1. Ordnung

2. Grundlagen:
2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:
2.3.5 Dynamisches Verhalten der Messgeräte



Verzögerungsglied 1. Ordnung

ue - Eingangssignal
ua - Ausgangssignal

(1) $a_0 \cdot ua + a_1 \cdot \dot{u}a = e_0 \cdot ue \quad /:a_0$

$\dot{u}a(t) = \frac{dua(t)}{dt}$

(2) $ua + \frac{a_1}{a_0} \cdot \dot{u}a = \frac{e_0}{a_0} \cdot ue$

$\dot{u}e(t) = \frac{due(t)}{dt}$

$\frac{e_0}{a_0} = k = E$ k - Übertragungsfaktor oder als E Empfindlichkeit

$\frac{a_1}{a_0} = T$ Zeitkonstante [s]

einsetzen in (2) folgt (3):

(3) $ua + T \cdot \dot{u}a = E \cdot ue$

$\downarrow \mathcal{L}\{\}$ Laplace-Transformation

$X(s) = \int_0^\infty x(t) \cdot e^{-s \cdot t} dt \qquad \underline{s \in \mathbb{C}}$

s ist eine komplexe Zahl

$\underbrace{Ua + T \cdot s \cdot Ua = E \cdot Ue}$

$\Rightarrow$ algebraische Gleichung im Bildbereich!

$\mathcal{L}\{ua(t)\} = Ua(s)$

$\boxed{s = \sigma + j\omega}$

$\mathcal{L}\left\{\frac{d}{dt} x(t)\right\} = s \cdot \mathcal{L}\{x(t)\}$

$\rightarrow$ Lösung nach Ua:

$Ua(1 + s \cdot T) = E \cdot Ue$

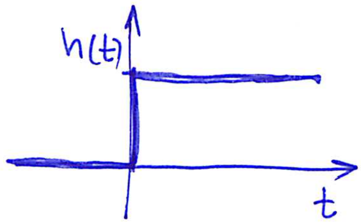
(4) $Ua(s) = \frac{E \cdot Ue}{1 + sT} = E \cdot \frac{1}{1 + sT} \cdot Ue(s)$

$ua(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{E \cdot \frac{1}{1+sT} \cdot Ue(s)\right\} = E \cdot \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{1+sT} \cdot Ue(s)\right\}$

im Allgemeinen nicht immer trivial, für einige häufig benutzte $ue(t)$ aber leicht lösbar.

Messtechnik / mit 1.5 (Schrüfer) / und Bild 1.15 anfangen Seite (2)

a) Einschaltfunktion / Sprungantwort



$$u_e = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

$$U_e(s) = \int_0^\infty u_e(t) \cdot e^{-sT} \cdot dt = -\frac{1}{s} \cdot e^{-st} \Big|_0^\infty = \frac{1}{s}$$

$$U_a(s) = E \cdot \frac{1}{1+s \cdot T} \cdot \frac{1}{s} = \frac{E}{T} \cdot \frac{1}{(s+\frac{1}{T}) \cdot s} \Rightarrow u_a(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{U_a(s)\right\}$$

Partialbruchzerlegung

$$\frac{1}{(1+s \cdot T) \cdot s} = \frac{A}{s} + \frac{B}{1+s \cdot T} = \frac{A \cdot (1+s \cdot T)}{(1+sT) \cdot s} + \frac{B \cdot s}{(1+s \cdot T) \cdot s}$$

$$A \cdot (1+sT) + B \cdot s = 1$$
$$A + A \cdot s \cdot T + B \cdot s = 1, \forall s$$
$$\Rightarrow A = 1$$
$$A \cdot T + B = 0$$
$$T + B = 0 \Rightarrow B = -T$$

$$\frac{1}{(1+sT) \cdot s} = \frac{1}{s} - \frac{T}{1+s \cdot T}$$

folgt also:

$$U_a(s) = E \cdot \left(\frac{1}{s} - \frac{T}{1+s \cdot T}\right)$$

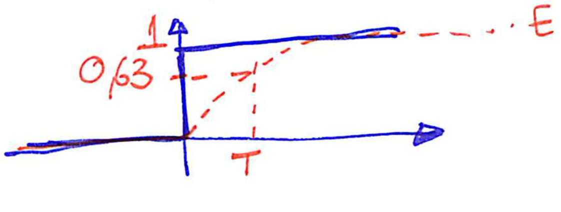
$$u_a(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{U_a(s)\right\} = E \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} - T \cdot E \cdot \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{1+s \cdot T}\right\} =$$

$$u_a(t) = E \cdot h(t) - \cancel{T} \cdot E \cdot \frac{1}{\cancel{T}} \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s+\frac{1}{T}}\right\} =$$

$$= E \cdot \left(h(t) - e^{-\frac{t}{T}} \cdot h(t)\right) = h(t) \cdot E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

Beispiel: Tiefpass

Schrüfer, Beispiel 1.6



b) Sinusfunktion, ~~Fortsetzung~~

(1) $$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s+\frac{1}{T}}\right\} = h(t)\cdot e^{-t/T}$$

(2) $$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{s}{s^2+\omega_e^2}\right\} = h(t)\cdot \cos(\omega_e\cdot t)$$

(3) $$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s^2+\omega_e^2}\right\} = \frac{1}{\omega_e}\cdot\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{\omega_e}{s^2+\omega_e^2}\right\} = h(t)\cdot\frac{1}{\omega_e}\cdot \sin(\omega_e\cdot t)$$

$$u_a(t) = \left(k_0\cdot k_1\cdot\frac{1}{T}\cdot e^{-t/T} + k_0\cdot k_2\cdot\cos(\omega_e\cdot t) + \frac{k_0\cdot k_3}{\omega_e}\cdot\sin(\omega_e t)\right)\cdot h(t)$$

$$u_a(t) = \Big(\underbrace{E\cdot\omega_e\cdot\frac{T^2}{T^2\omega_e^2+1}\cdot\frac{1}{T}e^{-t/T}}_{(1)} + E\cdot\omega_e\cdot\frac{-T}{T^2\cdot\omega_e^2+1}\cdot\underbrace{\cos(\omega_e\cdot t)}_{(2)} +$$

Komp 1
(1) verschwindet mit der Zeit

$$+ E\cdot\cancel{\omega_e}\cdot\frac{1}{\cancel{\omega_e}}\cdot\frac{1}{T^2\cdot\omega_e^2+1}\cdot\underbrace{\sin(\omega_e\cdot t)}_{(3)}\Big)\cdot h(t)$$

(2)+(3):

$$u_a(t) = \left((\ )\,e^{-t/T} + \frac{E}{T^2\omega_e^2+1}\left(\sin\omega_e t - T\cdot\omega_e\cdot\cos(\omega_e t)\right)\right)h(t)$$

$$= \left((\ )\,e^{-t/T} + \frac{E\cdot T\cdot\omega_e}{T^2\cdot\omega_e^2+1}\underbrace{\left(\frac{1}{T\cdot\omega_e}\cdot\sin(\omega_e t) - \cos(\omega_e t)\right)}\right)\cdot h(t)$$

$$= \cancel{\sin}\sqrt{1+\frac{1}{T^2\cdot\omega_e^2}}\cdot\sin(\omega_e t - \varphi)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}(\omega_e\cdot T)$$

Amplitude

$$T\cdot\omega_e = n$$

$$\tilde{u}_a = \frac{E\cdot T\cdot\omega_e}{T^2\cdot\omega_e^2+1}\cdot\sqrt{1+\frac{1}{T^2\cdot\omega_e^2}}$$

$$= E\cdot\frac{1}{T^2\cdot\omega_e^2+1}\cdot\sqrt{T^2\cdot\omega_e^2+1}$$

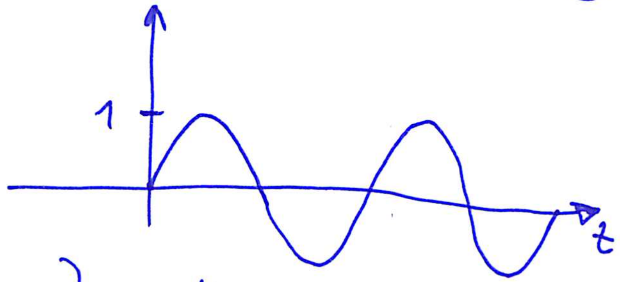
$$u_a(t) = E\cdot\frac{1}{\sqrt{T^2\cdot\omega_e^2+1}}$$

$\omega_e = \frac{1}{T}$

$\omega_e \ll \frac{1}{T} \rightarrow \omega_e\cdot T \ll 1$

$\omega_e \gg \frac{1}{T} \rightarrow \omega_e\cdot T \gg 1$

b) Sinusfunktion



$$u_e = \begin{cases} 0, & t \le 0 \\ \sin(\omega_e t), & t > 0 \end{cases}$$

$$u_e(t) \circ\!\!-\!\!\bullet\; U_e(s) \qquad U_e(s) = \mathcal{L}\{u_e(t)\} = \frac{\omega_e}{s^2+\omega_e^2}$$

$$U_a(s) = E \cdot \frac{1}{1+s\cdot T} \cdot \frac{\omega_e}{s^2+\omega_e^2}$$ $\Rightarrow$ hier wenden wir auch Partialbruchzerlegung an

$$= E \cdot \omega_e \cdot \left(\frac{1}{1+s\cdot T} \cdot \frac{1}{s^2+\omega_e^2}\right)$$

Partialbruchzerlegung

$s^2+\omega_e^2$ hat keine Reale Wurzel!

$$\frac{1}{1+s\cdot T} \cdot \frac{1}{s^2+\omega_e^2} = \frac{A}{1+sT} + \frac{B\cdot s + C}{s^2+\omega_e^2}$$

$$= \frac{A\cdot(s^2+\omega_e^2) + (B\cdot s + C)(1+s\cdot T)}{(1+sT)\cdot(s^2+\omega_e^2)}$$

folgt also:

$$A\cdot s^2 + A\cdot\omega_e^2 + B\cdot s + C + B\cdot s^2\cdot T + C\cdot sT = 1 + \emptyset\cdot s + \emptyset\cdot s^2$$

$$\left.\begin{aligned} 1&: \quad A\cdot\omega_e^2 + C = 1 \\ s&: \quad B + C\cdot T = 0 \\ s^2&: \quad A + B\cdot T = 0 \end{aligned}\right\} \quad A, B, C = ?$$

$$\to B = -C\cdot T$$

$$\to A = -B\cdot T = C\cdot T^2$$

$$C\cdot T^2\cdot\omega_e^2 + C = 1$$

$$C = \frac{1}{T^2\cdot\omega_e^2+1}$$

$$B = -\frac{T}{T^2\cdot\omega_e^2+1}$$

$$A = \frac{T^2}{T^2\cdot\omega_e^2+1}$$

$$U_a(s) = \overset{k_0}{E\cdot\omega_e} \cdot \left(\frac{\overset{k_1}{\dfrac{T^2}{T^2\omega_e^2+1}}}{1+s\cdot T} + \frac{\overset{k_2}{\left(\dfrac{-T}{T^2\cdot\omega_e^2+1}\right)} s + \underset{k_3}{\dfrac{1}{T^2\omega_e^2+1}}}{s^2+\omega_e^2} \right)$$

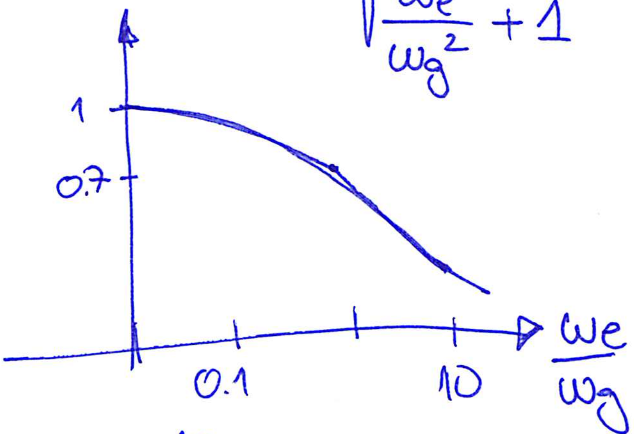
$$U_a(s) = k_0 \cdot \left(\frac{k_1}{1+s\cdot T} + \frac{k_2\cdot s + k_3}{s^2+\omega_e^2} \right) = k_0 \left(\frac{k_1}{1+s\cdot T} + \frac{k_2\cdot s}{s^2+\omega_e^2} + \frac{k_3}{s^2+\omega_e^2} \right)$$

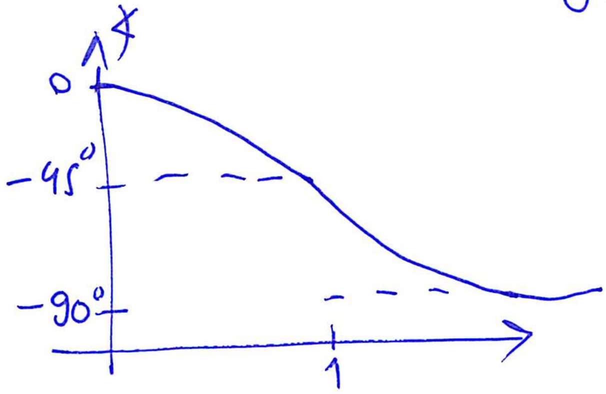
$$u_a(t) = \mathcal{L}^{-1}\{U_a(s)\} = k_0 \cdot \frac{k_1}{T} \cdot \underbrace{\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s+\frac{1}{T}}\right\}}_{①} + k_0 \cdot k_2 \cdot \underbrace{\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{s}{s^2+\omega_e^2}\right\}}_{②} + k_0 \cdot k_3 \cdot \underbrace{\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s^2+\omega_e^2}\right\}}_{③}$$

Messtechnik, Seite 5

Wenn wir nun $\omega_g = \frac{1}{T}$ definieren, ist die Amplitude

~~$U_a(t)$~~ $\tilde{U}_a = E \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{\omega_e^2}{\omega_g^2} + 1}}$ und die Phase: $\varphi = -\arctan\left(\frac{\omega_e}{\omega_g}\right)$





$f_g = \frac{\omega_g}{2\pi}$

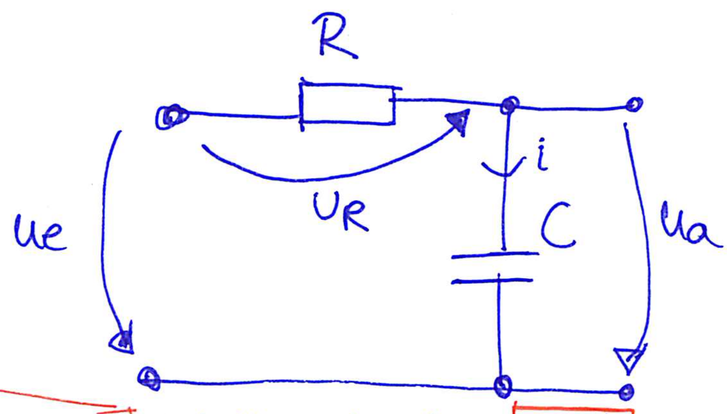
Übertragungsfunktionen $G(s)$

$\boxed{s = \sigma + j\omega}$

$\sigma = 0$ ermöglicht ~~Amplit~~ Frequenzgang

$$G(s) = \frac{U_a(s)}{U_e(s)} \longrightarrow U_a(s) = G(s) \cdot U_e(s)$$

Beispiel: RC-Tiefpassfilter



$\boxed{T = RC}$ Zeitkonstante $\boxed{E = 1}$

$U_a + U_R = U_e$

$i = C \cdot \frac{dU_c}{dt} = C \cdot \frac{dU_a}{dt}$

$U_R = R \cdot i$

$R \cdot C \frac{dU_a}{dt} + U_a = U_e$

$R \cdot C \cdot \dot{U}_a + U_a = U_e$

$R \cdot C \cdot s \cdot U_a + U_a = U_e$

$U_a (R \cdot C \cdot s + 1) = U_e$

$U_a = \frac{U_e}{R \cdot C \cdot s + 1}$

$G(s) = \frac{U_a(s)}{U_e(s)} = \frac{1}{R \cdot C \cdot s + 1}$ $\left[\begin{array}{l}\text{Amplitude} \\ \text{Phase}\end{array}\right]$

Messtechnik, Seite 6

Übertragungsfunktion $G(s)$, $s = \sigma + j\omega$

für $\sigma = 0$, bzw. $s = j\omega$

$$\left.\begin{aligned} |G(j\omega)| &= \sqrt{Re\{G(j\omega)\}^2 + Im\{G(j\omega)\}^2} \\ \measuredangle G(j\omega) &= arctg\left(\frac{Im\{G(j\omega)\}}{Re\{G(j\omega)\}}\right) \end{aligned}\right\}$$

→ Amplitudengang

→ Phasengang

Für unser Beispiel mit der RC-Tiefpassfilter

$$G(j\omega) = \frac{1}{R \cdot C \cdot j\omega + 1} = \frac{\cancel{R \cdot C \cdot j\omega + 1}\ 1 - RC \cdot j\omega}{1 + R^2C^2 \cdot \omega^2}$$

$$\left.\begin{aligned} Re\{G(j\omega)\} &= \frac{1}{R^2C^2\omega^2 + 1} \\ Im\{G(j\omega)\} &= \frac{-RC \cdot \omega}{1 + R^2C^2\omega^2} \end{aligned}\right\} |G(j\omega)| = \frac{\sqrt{1 + R^2C^2\omega^2}}{1 + R^2C^2\omega^2} = \frac{1}{\sqrt{1 + R^2C^2\omega^2}}$$

$$\measuredangle G(j\omega) = arctg\left(\frac{-RC \cdot \omega}{\cancel{1}}\right) =$$

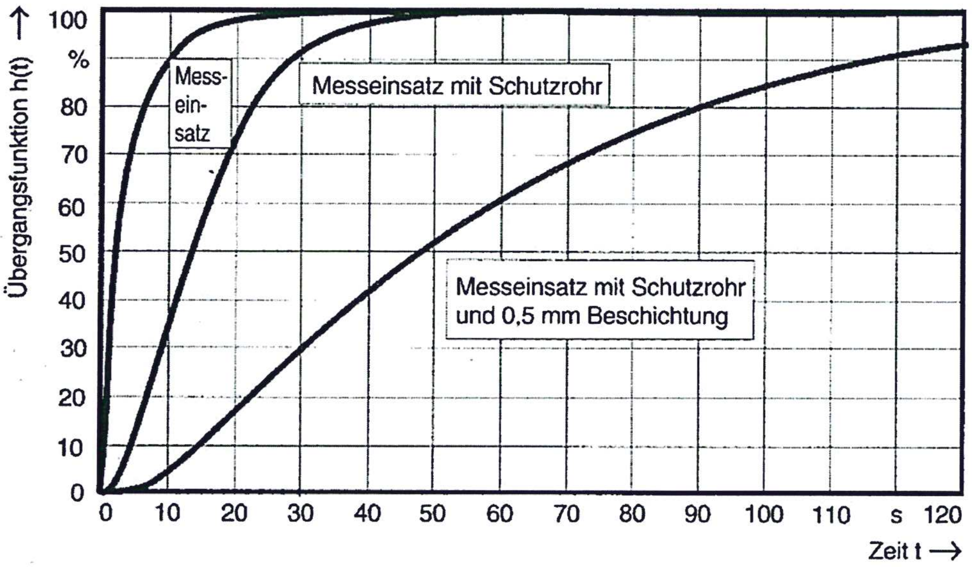
$$= arctg(-\underbrace{RC}_{T \approx \frac{1}{\omega_G}} \cdot \omega) = -arctg(RC \cdot \omega)$$

Durch die Benutzung von ÜF ist eine einfache Analyse der Dynamischen Eigenschaften von Messglieder möglich

2. Grundlagen:

2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:

2.3.5 Dynamische Kenngrößen (Zeitverhalten, Beispiel)

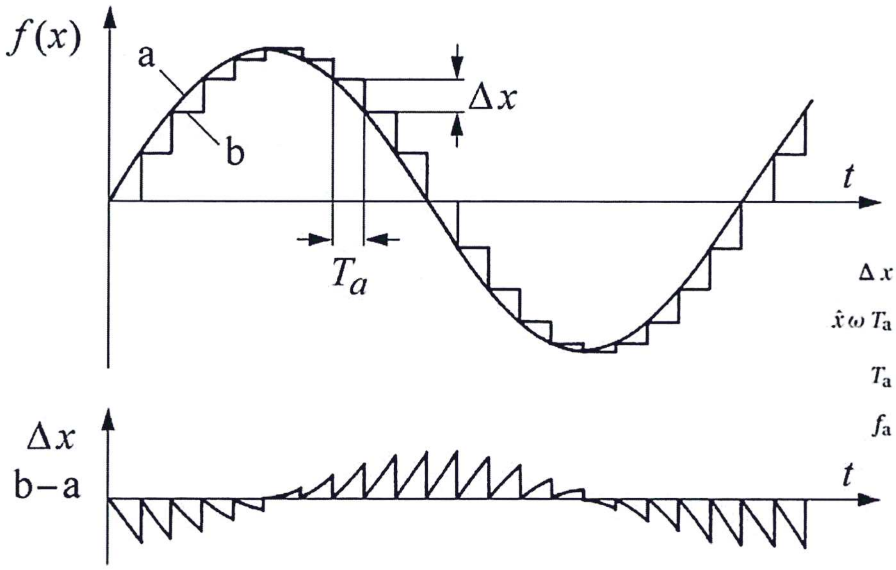


Zeitverhalten von Widerstandsthermometern
(Messbedingungen in Wasser: v_w = 0,4 m/s ± 0,05 m/s; ϑ_W=25 °C)
(aus ABB: Praxis der industriellen Temperaturmessung)

2. Grundlagen:

2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:

2.3.6 Dynamische Fehlermöglichkeiten



$$\Delta x = \hat{x}\,\omega\,T_a$$

$$\Delta q = \frac{\hat{x}}{2^n}$$

$$\Delta x \le \Delta q,$$

$$\hat{x}\,\omega\,T_a \le \frac{\hat{x}}{2^n},$$

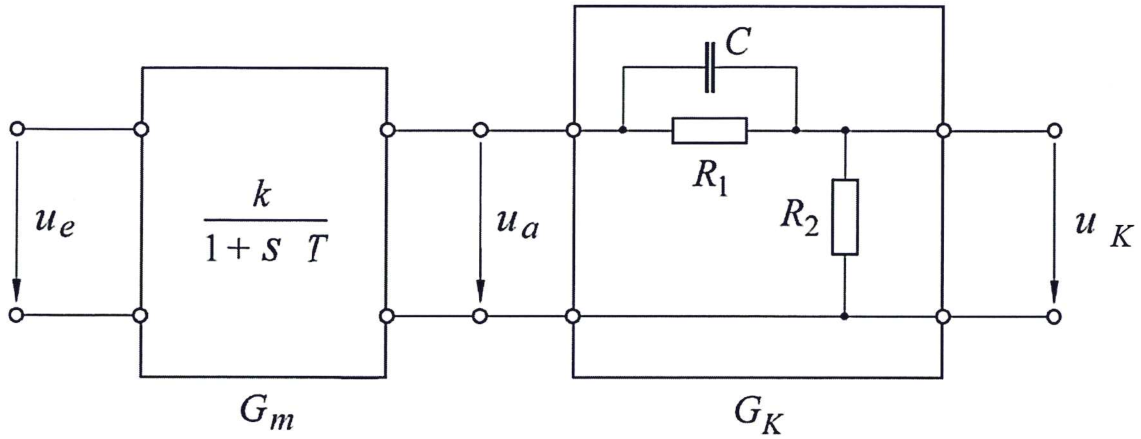
$$T_a \le \frac{1}{\omega 2^n} \quad \text{und}$$

$$f_a \ge \omega 2^n = 2\pi f\, 2^n = 2^{n+1}\pi f$$

Quelle:Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl, Bernhard Zagar, **Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen, Verlag:** Carl Hanser Verlag GmbH, 2014, **ISBN-10:** 3446442081, **ISBN-13:** 978-3446442085

Kapitel 1.6.1, **Seite** 66

2. Grundlagen:
2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:
2.3.6 Korrektur des dynamischen Fehlers

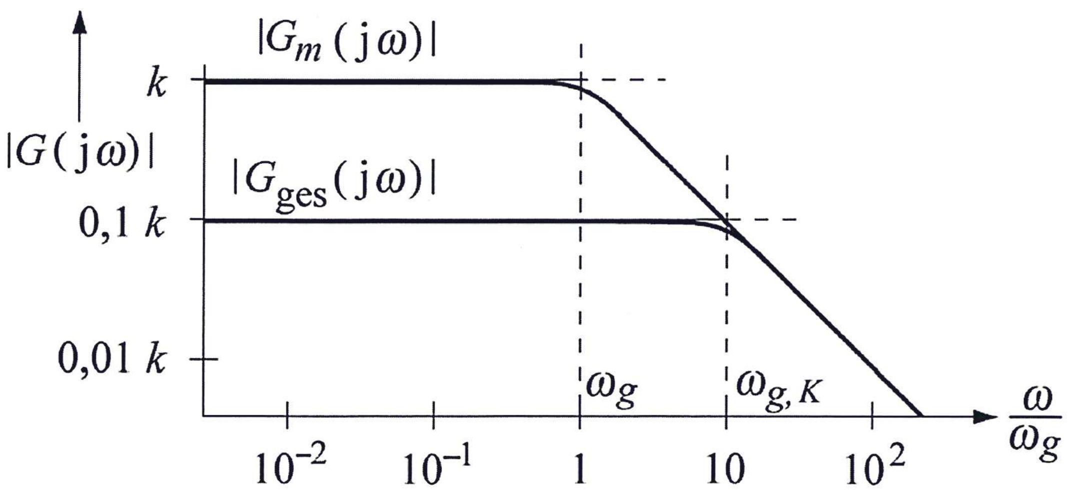


Quelle:Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl, Bernhard Zagar, **Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen, Verlag:** Carl Hanser Verlag GmbH, 2014, **ISBN-10:** 3446442081, **ISBN-13:** 978-3446442085

Kapitel 1.6.2, **Seite** 67

Tafelschrieb, Herleitung Kompensation

2. Grundlagen:
2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:
2.3.6 Korrektur des dynamischen Fehlers



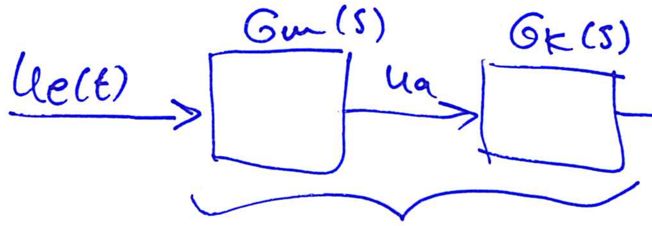
Quelle:Elmar Schrüfer, Leonhard M. Reindl, Bernhard Zagar, **Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen, Verlag:** Carl Hanser Verlag GmbH, 2014, **ISBN-10:** 3446442081, **ISBN-13:** 978-3446442085

Kapitel 1.6.2, **Seite** 67

Tafelschrieb, Herleitung Kompensation

Messtechnik, Seite 7

Korrektur dynam. Fehlers (Schrüfer, : 1.6.2, Mühl, : ~~Beispiel 3.8~~ Seite 55)



$$G_E(s) = G_m(s)\cdot G_K(s)$$

$$G_m(s) = \frac{K}{1+s\cdot T}$$

$$\boxed{R_1 \parallel \frac{1}{s\cdot C} = \frac{R_1\cdot\frac{1}{s\cdot C}}{R_1+\frac{1}{s\cdot C}}}$$

$$G_K(s) = \frac{R_2}{R_2+\left(R_1\parallel\frac{1}{s\cdot C}\right)} = \frac{R_2}{R_2+\frac{R_1}{s\cdot R_1\cdot C+1}} \qquad \frac{R_1}{s\cdot R_1\cdot C+1}$$

$$G_K(s) = \frac{R_2\cdot(s\cdot R_1\cdot C+1)}{s\cdot R_2\cdot R_1\cdot C+R_1} = \frac{s\cdot R_2R_1C+1}{s\cdot R_2R_1\cdot C+R_1}$$

$$R_1\cdot C = T_K$$

$$G_K(s) = \frac{s\cdot R_2\cdot T_K+1}{s\cdot R_2\cdot T_K+R_1} = \frac{1}{R_1}\cdot\frac{s\cdot R_2\cdot T_K+1}{s\cdot\frac{R_2}{R_1}\cdot T_K+1} =$$

$$= \frac{R_2}{R_1}\cdot\frac{s\cdot T_K+1}{s\cdot\frac{R_2}{R_1}\cdot T_K+1} \qquad \boxed{\frac{R_2}{R_1}=a}$$

$$G_K(s) = a\cdot\frac{1+s\cdot T_K}{1+a\cdot s\cdot T_K}$$

$$G_E(s) = G_m(s)\cdot G_K(s) = \frac{K}{1+s\cdot T}\cdot a\cdot\frac{1+s\cdot T_K}{1+a\cdot s\cdot T_K} \qquad \boxed{0<a<1}$$

für ~~T=Tk~~ $T_K=T$

$$G_E(s) = \frac{K}{\cancel{1+s\cdot T}}\cdot a\cdot\frac{\cancel{1+s\cdot T}}{1+a\cdot s\cdot T} = \frac{a\cdot K}{1+s\cdot T\cdot a}$$

Messtechnik, Seite 8

$$\omega_{gu} = \frac{1}{T}$$

$$\omega_{gE} = \frac{1}{T \cdot a}$$

$a = 0.1$ Beispielbild

$$\omega_{gE} = 10 \cdot \omega_{gu}$$

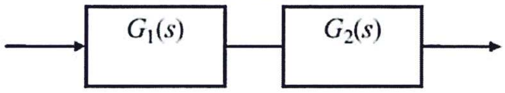
$$k_e = \frac{1}{10} k$$

2. Grundlagen:

2.3 Genauigkeitskriterien einer Messung:

2.3.6 Strukturen von Messeinrichtungen

Kettenstruktur

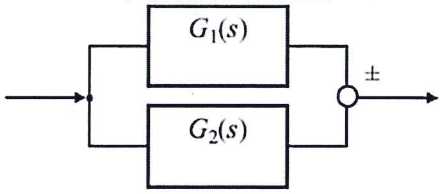


$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s)$$

$$E = E_1 \cdot E_2$$

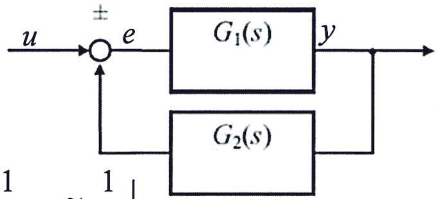
$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta E_1}{E_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E_2}{E_2}\right)^2}$$

Parallelstruktur



$$G(s) = G_1(s) + G_2(s)$$

Kreisstruktur



$$y = G_1(s) \cdot e$$

$$e = u - G_2(s) \cdot y \quad \text{<-- Beispiel negative Rückführung}$$

$$y = G_1(s) \cdot (u - G_2(s) \cdot y) = G_1(s) \cdot u - G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot y$$

$$y \cdot (1 + G_1(s) \cdot G_2(s)) = G_1(s) \cdot u$$

$$G(s) = \frac{y}{u} = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s) \cdot G_2(s)}$$

$$E = \frac{E_1}{1 + E_1 \cdot E_2} = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + E_2} \approx \frac{1}{E_2}\bigg|_{E_1 >> E_2}$$

Empfohlene Literatur für Kap. 2.3-2.4

Autor	Titel	Verlag
R. Lerch	Elektrische Messtechnik **Kapitel 5**	Springer Verlag
E. Schrüfer L. Reindl B. Zagar	Elektrische Messtechnik **Kapitel 1.3-1.7**	Hanser Verlag
T. Mühl	Einführung in die elektrische Messtechnik **Kapitel 3.2**	Hanser Verlag
R. Felderhoff, U. Freyer	Elektrische und elektronische Messtechnik **Kapitel 1.6-1.9 inkl. Übungen**	Springer Verlag