

# Formelsammlung elektrische Messtechnik

## 1. Allgemein

Bauelementgleichungen	$u_R(t) = R \cdot i_R(t)$	$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$	$i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt}$
Lautheit	$N = c \cdot p^{0,6}$		

## 2. Logarithmierte Größenverhältnisse

Allgemein	$a = \beta \cdot \lg \left  \frac{U_1}{U_0} \right $ mit $\beta = 10$ (Energie) oder $\beta = 20$ (Feld)
Verstärkung und Dämpfung	$a_{UV} = 20 \cdot \lg \frac{U_A}{U_E} = -20 \cdot \lg \frac{U_E}{U_A} = -a_{UD}$
Bekannt Paarungen	$A_U = \sqrt{2} \rightarrow a_U \approx 3\text{dB}; 2 \rightarrow 6\text{dB}; 10 \rightarrow 20\text{dB}; 20 \rightarrow 26\text{dB}$
Pegel	Bezogen auf feste Größe z.B.: $\text{dB}_m(1\text{mW}); \text{dB}_V(1\text{V}); \text{dB}_A(\text{A-Filter})$

## 3. Strukturen von Messeinrichtungen

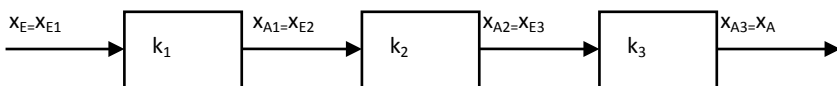
### a. Statische und Dynamische Eigenschaften von Messgliedern

$x_a = f(x_e)$  = statische Übertragungskennlinie;  $x_a$  = Ausgangsgröße;  $x_e$  = Eingangsgröße;

Empfindlichkeit  $k$  eines Messgliedes:  $k = \frac{dx_A \text{ linear}}{dx_E} \xrightarrow{\text{prop. } X_A} \frac{\Delta X_A}{\Delta X_E} \cdot \frac{X_A}{X_E}$

$\hat{x}_A(f = f_g) = \frac{\hat{x}_A(f \rightarrow 0)}{\sqrt{2}}$ bzw. $a_{Xa}(f = f_g) = a_{Xa}(f \rightarrow 0) - 3 \text{ dB}$	
Verzögerungszeit $t_v$	Zeit nach Sprung Eingang bis Ausgang bei 10% vom Endwert
Anstiegszeit $t_A$	Zeit um von 10% auf 90% des Endwertes anzusteigen
Einstellzeit $t_E$	Zeit nach Sprung Eingang bis Ausgang innerhalb Toleranzband (z.B. 1%)

### b. Kettenstruktur

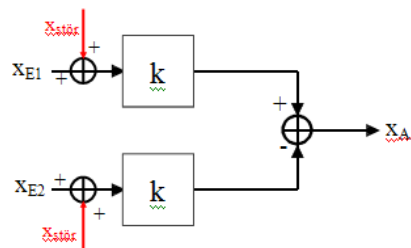


$$k_{\text{ges}} = \frac{dx_A}{dx_E} = \frac{dx_{A3}}{dx_{E3}} \cdot \frac{dx_{A2}}{dx_{E2}} \cdot \frac{dx_{A1}}{dx_{E1}} = k_3 \cdot k_2 \cdot k_1 \rightarrow \text{wenn rückwirkungsfrei}$$

Dynamische Näherung für Nicht-Gauß-Tiefpässe:

$$\frac{1}{f_{g,\text{ges}}^2} = \frac{1}{f_{g1}^2} + \frac{1}{f_{g2}^2} + \dots + \frac{1}{f_{gn}^2}; t_A = RC \cdot \ln 9; f_g \cdot t_A = \frac{\ln 9}{2\pi}; t_{A,\text{ges}}^2 = t_{A1}^2 + \dots + t_{An}^2$$

### c. Parallel- oder Differenzstruktur



Proportional:  $x_{A1} - x_{A2} = k(x_{E1} - x_{E2})$

Nichtlinear:  $dx_A = k(dx_{E1} - dx_{E2})$

Es können störende Nullpunkte und Gleichtaktstörungen unterdrückt werden!

#### d. Kreisstruktur

	$k_V \rightarrow \infty$ ist ideal da: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>K_{ges}</math> nicht mehr von <math>k_V</math> abhängt und damit störende Eigenschaften unterdrückt werden können</li> <li>- Ausgangsgröße <math>x_A</math> eingeprägt ist und nachfolgender Eingang nicht belastet wird.</li> </ul>
$k_{ges} = \frac{dx_A}{dx_E} = \frac{1}{k_R + \frac{1}{k_V}} \xrightarrow{\text{Idealfall}} k_{ges,ideal} = \frac{1}{k_R} \text{ für } k_V \rightarrow \infty$	

### 4. Temperatursensoren

#### a. Metall-Thermistoren

<b>Widerstand</b>	$R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + \alpha\vartheta)$ mit $\alpha = \frac{R(\vartheta) - R_0}{R_0 \cdot \vartheta} = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta\vartheta}$
<b>Allgemein:</b>	$y(x) = y_0 \cdot (1 + \alpha_{allg}x)$ mit $\alpha_{allg} = \frac{y(x) - y(0)}{y \cdot x} = \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\Delta x} = \frac{\text{rel. Änderung d. beeinflussten Größe}}{\text{abs. Änderung d. beeinflussenden Größe}}$
<b>Eigenschaften:</b>	Linear (Pt100), großer Temperaturmessbereich, Langzeitstabilität

#### b. Heißeleiter

<b>Widerstand</b>	$R(T) = R_0 \cdot e^{b(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$
<b>Eigenschaften:</b>	Low Cost, höchste Empfindlichkeit, vielfältige Bauformen und Widerstandsgrundwerte, höchste Nichtlinearität, Exemplarstreuung

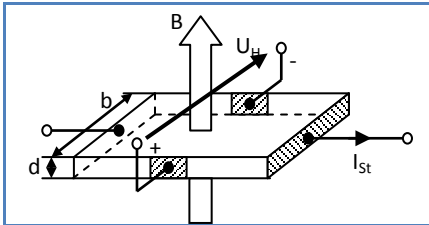
#### c. Thermoelement

<b>Gleichung</b>	$U_{th} = k_{AB} \cdot (T_X - T_V)$	
<b>Empfindlichkeit:</b>	$K_{AB} = k_{APt} - k_{BPt}$	
<b>Eigenschaften:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Empfindlichkeit wird aus der thermoelektrischen Spannungsreihe ermittelt</li> <li>- Geringe Empfindlichkeit</li> <li>- Mit Schutzrohr träge, ohne schnell</li> <li>- Nur Temperaturdifferenzen</li> <li>- Großer Temperaturmessbereich</li> </ul>	

#### d. Sonstige

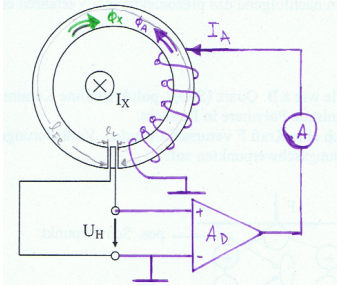
<b>Kaltleiter:</b>	Einfache Überwachungsaufgaben, Widerstand steigt in kleinem Bereich stark an
<b>Silizium-Widerstand:</b>	Hoher Temperaturkoeffizient, kleine Bauformen → kurze Ansprechzeit gute Reproduzierbarkeit der Kennlinien → Sensoren gut austauschbar
<b>Sperrschicht:</b>	$U_{D1} - U_{D2} = m \cdot \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}}\right) \rightarrow \text{Temp. Abhg. } I_S(T) \text{ fällt raus;}$ gute Linearität, integrierter Sensor mit Verstärker

## 5. Hallsensor



$$U_H = \frac{1}{n \cdot q \cdot d} \cdot I_{st} \cdot B = c_H \cdot \frac{I_{st} \cdot B}{d}$$

mit  $c_H = \frac{1}{ne} = \text{Hallkonstante}$



### Stromzange

Durch farbige Ergänzung Kompensation der Nichtlinearitäten des Eisens.

$$I_x = n \cdot I_A$$

Unterscheide: Bei einer Gleichstromzange (DC-Kopplung) können Gleich- und Wechselströme gemessen werden. Bei einer Wechselstromzange (AC) nur Wechselströme.

## 6. Kraftaufnehmer

### a. Piezoelektrischer Effekt

Wird ein polarisiertes, piezoelektrisches Material durch eine Kraft  $F$  belastet (Dipole sind überall ausgerichtet), so entsteht im Dielektrikum eine elektrische Feldstärke. Die Spannung der Platten wird kurzgeschlossen und der Leerlaufstrom gemessen.

### Fließende Ladung:

$$Q = k_F \cdot F$$

$k_F$  Materialkonstante wird vom Hersteller angegeben

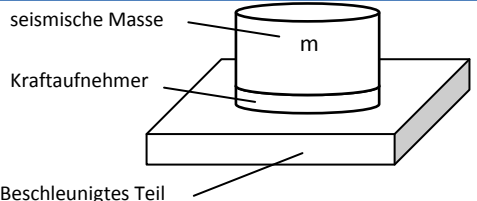
### b. Beschleunigungsaufnehmer

Masse Kraftaufnehmer vernachlässigbar gegenüber seismischer Masse:

$$Q = k_F \cdot m \cdot a$$

Hersteller gibt Empfindlichkeit  $k_a$  an:

$$k_a = \frac{dU}{da}$$



## 7. Weg- und Winkelaufnehmer

### a. Ohmsche Weg- und Winkelaufnehmer

Der Schleifer eines linearen Potentiometers ist mit dem bewegten Objekt verbunden.

**Wegaufnehmer** → Schiebepotentiometer;

**Winkelaufnehmer** → Drehpotentiometer

**Eigenschaften:** einfach, verschleißanfällig, Stellkräfte durch Reibung

### b. Kapazitive Wegaufnehmer

**Zylinderkondensator**  
( $-\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2}$ )

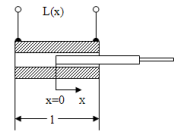
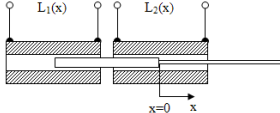
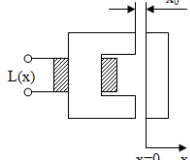
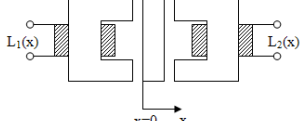
$C(x) = C_0 + mx = C_0 \left(1 + \frac{x}{l/2}\right)$  → führt zu nichtlinearem Verhalten

**Differential-Zylinderkondensator**  
( $-\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2}$ ) $r$

$C_1(x) = C_0 \left(1 + \frac{x}{l/2}\right); C_2(x) = C_0 \left(1 - \frac{x}{l/2}\right);$

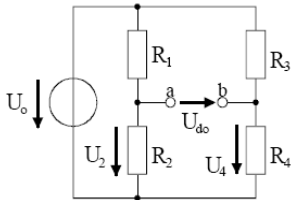
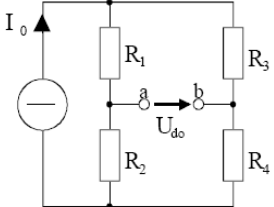
Führt in Brückenschaltung zu streng linearem Verhalten.

### c. Induktive Wegaufnehmer

<b>Tauchanker- Aufnehmer</b>		$L(x) \approx \frac{L(x=0)}{1 + \frac{2x}{l}}$
<b>Differential- Tauchanker- Aufnehmer</b>		$L_1(x) \approx \frac{L(x=0)}{1 + \frac{2x}{l}} \quad \text{und} \quad L_2(x) \approx \frac{L(x=0)}{1 - \frac{2x}{l}}$
<b>Queranker- Aufnehmer</b>		$L(x) \approx \frac{L(x=0)}{1 + \frac{x}{x_0}}$
<b>Differential- Queranker- Aufnehmer</b>		$L_1(x) \approx \frac{L(x=0)}{1 + \frac{x}{x_0}} \quad \text{und} \quad L_2(x) \approx \frac{L(x=0)}{1 - \frac{x}{x_0}}$

## 8. Messbrücken

### a. Spannungs- und stromgesteuerte Brücke

	$U_{d0} = U_2 - U_4 = U_0 \cdot \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$ $R_i = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$ <p><b>Abgleich:</b> <math>\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}</math></p>
	$U_{d0} = I_0 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$ $R_i = I_0 \cdot \frac{(R_2 + R_3) \cdot (R_1 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$ <p><b>Abgleich:</b> <math>\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}</math></p>

### b. Empfindlichkeit von Messbrücken

$\Delta R_x$  oder  $x \rightarrow$  Messbrücke  $\rightarrow U_{d0}$  mit Empfindlichkeit  $k_{R_x} = \frac{\partial U_{d0}}{\partial R_x}$  bzw.  $k_x = \frac{\partial U_{d0}}{\partial x}$

### c. Phasenselektive Gleichrichtung

Mit Instrumentenverstärker und Inverter der jede negative Halbwellen der Trägerspannung bei der Ausgangsspannung invertiert. Dadurch kann aus einer gemessenen Wechselspannung  $\underline{U}_{d0}$  eine vorzeichenrichtige Größe gemacht werden.

## 9. Zeitfunktionen

Effektivwert oder RMS-Wert	$U = \sqrt{\langle u^2(t) \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) \cdot dt}$
Gleichricht- oder Gleichrichtmittelwert	$\langle  u(t)  \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T  u(t)  dt$
Kurvenformfaktor	$k_F = \frac{U}{\langle  u(t)  \rangle}$
Spitzenfaktor oder crest factor	$k_C = \frac{ u(t) _{\max}}{U}$
Gleichanteil einer Mischspannung	$U_0 = \langle u(t) \rangle = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) dt$
Mischspannung	$u(t) = U_0 + u_W(t)$
Zusammenhang zwischen den einzelnen Effektivwerten	$U = \sqrt{U_0^2 + U_W^2}$

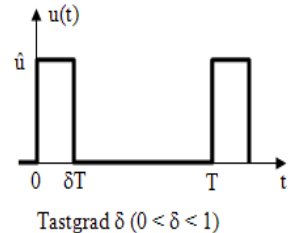
Zeitfunktion	U	$\langle  u(t)  \rangle$	$k_F$	$k_C$
Sinus	$\frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\pi} \hat{u}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,111$	$\sqrt{2}$
Rechteck	$\hat{u}$	$\hat{u}$	1	1
Dreieck /Sägezahn (verallgemeinert)	$\frac{\hat{u}}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{2} \hat{u}$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,155$	$\sqrt{3}$

Für gesamte Mischspannung  $u(t)$  gilt:

U	$U_0$	$k_F$	$k_C$
$\hat{u} \cdot \sqrt{\delta}$	$\hat{u} \cdot \delta$	$\frac{1}{\sqrt{\delta}}$	$\frac{1}{\sqrt{\delta}}$

Für Wechselanteil  $u_W(t)$  gilt:

$U_W$	$\langle  u_W(t)  \rangle$	$k_F$	$k_C$
$\hat{u} \cdot \sqrt{\delta \cdot (1-\delta)}$	$2\hat{u} \cdot \delta \cdot (1-\delta)$	$\frac{1}{2 \cdot \sqrt{\delta \cdot (1-\delta)}}$	$\text{Max}\left(\sqrt{\frac{1-\delta}{\delta}}; \sqrt{\frac{\delta}{1-\delta}}\right)$



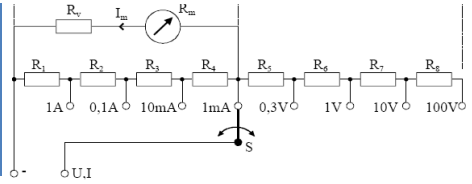
## 10. Multimeter

### a. Allgemein

	Echte Effektivwertmessung	Sinuskalibrierte Effektivwertmessung
AC Messbereich (AC-Kopplung)	$U_{Anz} = U_W$	$U_{Anz} = k_{F,Sinus} \cdot \langle  u_W(t)  \rangle = 1,11 \cdot \langle  u_W(t)  \rangle$
AC+DC Messbereich (DC-Kopplung)	$U_{Anz} = U$	$U_{Anz} = k_{F,Sinus} \cdot \langle  u(t)  \rangle = 1,11 \cdot \langle  u(t)  \rangle$
Gleichspannungs-Messbereich	$U_{Anz} = \langle u(t) \rangle = U_0$	

## b. Messbereichserweiterung nach Ayrton

<b>Konsequenzen für Strommessung</b>	$R_A = \frac{U_{A,max}}{I_{A,max}}$ $U_{A,max} \text{ typ. bei } \approx 0,2V$
<b>Konsequenzen für Spannungsmessung</b>	$r_m = \frac{R_V}{U_{max}} \text{ typ. } 20 \frac{k\Omega}{V}$ bei DMM $R_V = \text{const}$



## 11. Impedanz- und LCR-Messgeräte

<b>Komplexe Spannungen</b>	Mittels zweier Referenzspannungen $\underline{U}_0$ und $\underline{U}_{90}$ wird Real und Imaginärteil der Spannung ermittelt.
<b>Komplexe Widerstände</b>	Spannung und Strom (über bekannten Widerstand R) werden komplex gemessen, durch OPV wird Rückwirkungsfehler bei Messung eliminiert.

## 12. Einfache Ersatzschaltungen technischer Verbraucher

$Q = \frac{R_p}{\omega L_p}; D = \frac{\omega L_p}{R_p}$	$Q = \frac{\omega L_s}{R_s}; D = \frac{R_s}{\omega L_s}$	$Q = \omega R_p C_p; D = \frac{1}{\omega R_p C_p}$	$Q = \frac{1}{\omega R_s C_s}; D = \omega R_s C_s$
<b>Umrechnung induktive Verbraucher</b>		<b>Umrechnung kapazitive Verbraucher</b>	
$R_p = R_s \cdot (1 + Q^2); L_p = L_s \cdot (1 + \frac{1}{Q^2})$		$R_p = R_s \cdot (1 + Q^2); C_p = C_s \cdot \frac{1}{(1 + \frac{1}{Q^2})}$	
<b>Resonanzfrequenz</b> Wenn Imaginärteil von Admittanz oder Impedanz gleich Null		<b>Grenzfrequenz</b> Wenn Winkel von Admittanz oder Impedanz gleich 45° und Q=D=1	

## 13. Leistungsmessgeräte

<b>Definitionen</b>	$p = \langle u(t) \cdot i(t) \rangle; S = U \cdot I; Q = \sqrt{S^2 - P^2}$		
<b>Realisierung</b>			
<b>Beschaltung</b>	verbraucherstromrichtig	Verbraucherspannungsrichtig	
	$P_V = P_{Anz} - P_I$	$P_Q = P_{Anz} + P_U$	$P_V = P_{Anz} - P_U$ $P_Q = P_{Anz} + P_I$

## 14. Einkopplung von dynamischen Störungen auf Messleitungen

<b>Galvanische Einkopplung</b>		Spannung $U_{Gal}$ verfälscht $U_E$ aufgrund hoher Ausgleichsströme über die Massenverbindung. <b>Abhilfe:</b> Differenzielle Messanordnung mit Differenzverstärker
<b>Kapazitive Einkopplung</b>	zwei beliebige, getrennten metallischen Körper $\rightarrow$ Streukapazität Spannungsänderung: $\rightarrow$ kapazitiver Strom $I_{Cstreu} = C_{streu} \frac{dU_{Cstreu}}{dt}$ <b>Abhilfe:</b> Gleiche Widerstände auf beiden Messleitungen, geschirmte Leitungen, HV Leitungen weit entfernt von Messleitung	

<b>Induktive Einkopplung</b>	zeitlich veränderliche Magnetfelder der Flussdichte B durchdringen den Messkreis mit der Fläche $\rightarrow$ Störspannung $U_{md} = n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$ <b>Abhilfe:</b> Fläche A kleiner (verdrillen), Abstand der Messleitung von Störung, magn. Schirmung (teuer), DUT als Stromquellen wählen
------------------------------	---

## 15. Oszilloskope

<b>X-Y-Betrieb</b>	<b>Wichtig:</b> Außenleiter beider Kanäle an gleichen Punkt anschließen und nicht-referenzierte (erdfreie) Spannungsquelle verwenden
<b>Tastköpfe</b>	<b>Vorteile:</b> geringerer Rückwirkungsfehler, Messung höherer Spannungen <b>Nachteile:</b> Zusatzfehler, Empfindlichkeitsverlust, ev. eingeschränkte Bandbreite
<b>Dynamische Kenngrößen</b>	<div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Spannungsquelle (<math>t_{EA}</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Tastkopf (<math>t_{TKA}</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Oszilloskop (<math>t_{EA}</math>)</div> <div style="margin-left: 20px;"><math>\rightarrow</math></div> </div> $t_{MA} = \sqrt{t_{UA}^2 + t_{KA}^2 + t_{EA}^2}$ <p>Korrektur wenn <math>t_{EA,ges} \approx \sqrt{t_{TKA}^2 + t_{EA}^2} &gt; \frac{t_{MA}}{5}</math></p>
<b>ET-Sampling</b>	<b>Sequentiell:</b> $k \cdot \Delta t$ ab Trigger, ein Abtastwert pro Triggerpuls, Signal wird zusammengesetzt, kein Pretrigger möglich <b>Random:</b> Abtastung mit fester Frequenz, Zeit ab Trigger wird gemessen, Signal dann zusammengesetzt

## 16. Spektrumanalysatoren

<b>Abstaththeorem nach Shannon</b>	$f_{abt} > 2f_{s,max}$ bzw. $f_{s,max} < \frac{f_{abt}}{2} = f_{Ny}$ mit $f_{Ny} =$ Nyquistfrequenz
<b>Swept Analyzer</b>	Filter mit Bandbreite RBW wird durch das Spektrum geschoben $\rightarrow$ großer Frequenzbereich, lange Messzeiten, hohe Amplitudendynamik, Empfindlichkeit
<b>FFT/DFT Analyzer</b>	$Auflösung \Delta f = \frac{1}{T_{Aufz}} = \frac{1}{N \cdot T_{Abt}} = \frac{f_{Abt}}{N}$ Bandbreite = $f_{Ny}$ , Messzeit = $T_{Aufz}$
<b>Windows</b>	z.B. Hanning, Verringerung des Leakage-Effekts durch Überlagerung einer Fkt.

## 17. Messfehler

### a. Definitionen

<b>Tatsächlicher Fehler:</b>	$e = x_i - x_r$	<b>Relativer Fehler:</b>	$\delta = \frac{e}{x_B} = \frac{x_i - x_r}{x_B}$
<b>Systematische Fehler:</b>	Sind nach Betrag und Vorzeichen reproduzierbar		
<b>Zufällige Fehler:</b>	Sind nicht vorhersagbar und nicht reproduzierbar		
<b>Linearer Mittelwert:</b>	$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$ und $\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \langle x \rangle = x_r$		
<b>Standardabweichung:</b>	$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}$ und $\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n (x_i^2) - n \cdot \langle x \rangle^2 \right]}$		

### b. Garantiefehlergrenzen

<b>Analoge Messgeräte:</b>	$\delta_g = \frac{e_g}{x_i} = K\% \cdot \frac{Mb}{x_i} \geq K\%$	$e_g = \frac{K \cdot Mb}{100} = K\% \cdot Mb$
<b>Digitale Messgeräte:</b>	z.B.: $e_g = 0,2\% \text{ v.A.} + 0,1\% \text{ v.E.} + 1 \text{ Digit} \rightarrow$ in Aufgaben immer besten Messbereich annehmen (Stufung, 0,2;2;20;200)	

### c. Fehlerfortpflanzung

<b>Totales Differential</b>	$e_{gy} \approx \sum_{i=1}^n \left( \left  \frac{\partial y}{\partial x_i} \right _{x_i} \cdot e_{gi} \right)$
-----------------------------	--

<b>Max/Min-Methode</b>	Toleranzwerte so einsetzen, dass Funktionswert max. bzw. min bei symmetrischen Fehlerintervallen gilt: $e_{gy} \approx Y_{\max} - Y_i$ bzw. $e_{gy} \approx Y_i - Y_{\min}$ <b>Beachten:</b> Es kann jeweils nur Min ODER Max Wert einer Größe vorkommen, evt durch ausprobieren oder umformen entscheiden.
<b>Verallgemeinerte Summe</b>	$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_i \cdot x_i + \dots + a_n \cdot x_n = \sum_{i=1}^n (a_i \cdot x_i) \Rightarrow e_{gy} = \sum_{i=1}^n ( a_i  \cdot e_{gi})$
<b>Verallgemeinertes Produkt:</b>	$y = a \cdot x_1^{p_1} \cdot x_2^{p_2} \cdot \dots \cdot x_i^{p_i} \cdot \dots \cdot x_n^{p_n} = a \cdot \prod_{i=1}^n x_i^{p_i} \Rightarrow \delta_{gy} \approx \sum_{i=1}^n  p_i  \cdot \delta_{gi}$

**!!Keine Methode darf auf berechnete Zwischengrößen angewendet werden!!**

#### d. Systematische Fehler linearer Messglieder

<b>Nullpunktfehler <math>e_n</math></b>	Differenz zwischen Ist- und Sollwert am unteren Messbereichsende
<b>Steigungsfehler <math>e_s</math></b>	Unterschied der Steigung zwischen Ist und Soll an bel. Punkt
<b>Linearitätsfehler</b>	Vorzeichenrichtige Abweichung der Istgerade von Bezugsgerade

### 18. Digitale Messtechnik

#### a. Allgemeines

<b>Quantisierungsgs-</b>	<b>-fehler:</b> $e_{gq} = \frac{\Delta U}{2} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2 \cdot 2^n}$ <b>-rauschen(<math>\Delta</math>):</b> $U_{QR} = \frac{e_{gq}}{\sqrt{3}} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot 2^n}$
<b>Effektive Auflösung von ADC</b>	$SNR_{\max} = 20 \cdot \lg \frac{U_S}{U_{QR}} = 10 \cdot \lg \frac{P_S}{P_{QR}}$ Sinus full scale: $SNR_{\max} = 1,76\text{dB} + n \cdot 6,02\text{dB}$ $SNR_{\text{mess}} = 1,76\text{dB} + n_{\text{eff}} \cdot 6,02\text{dB} \rightarrow$ Effektivwert der Auflösung des ADC
<b>Digitale Zeitmessung</b>	$t_x = N_x T_T = \frac{N_x}{f_T}$ ; $e_{gN_x} = 1$ bzw. $\delta_{gN_x} = \frac{1}{N_x} \rightarrow \delta_{gT_x} = \frac{1}{N_x} + \delta_{gf_T}$

#### b. Digital-Analog-Converter (DAC)

<b>R/2R-Netzwerk</b>	Dualzahl wird mittels Addition von Strömen dargestellt.
<b>Fehler von DAC</b>	<b>Differentielle Linearitätsfehler:</b> Wenn alle Bits kippen (1000 $\rightarrow$ 0111) wirken sich Toleranzen der Widerstände am stärksten aus.

#### c. Analog-Digital-Converter (ADC)

<b>Abtast-Halteglied</b>	Spannung wird über Kondensator gehalten und als Gleichspannung ohne $du/dt$ abgetastet. FET schaltet Kondensator mit $f_{\text{Abt}}$ .
<b>Parallelumsetzer</b>	Höchster Schaltungsaufwand $\rightarrow$ höchste Umsetzraten (bis 500MS/s), geringste Auflösung (8 Bit)
<b>Sukzessive Approximation</b>	Umsetzraten bis 1 MS/s bei 16Bit und mehrere MS/s bei 12Bit $\rightarrow$ Einsatz bei mittleren dynamischen Anforderungen (DAQ Karten)
<b>Dual-Slope</b>	Langsame Umsetzung dafür sehr hohe Auflösung, Einsatz in DMM zur Gleichspannungsmessung, Wechselstörungen werden durch Mittelwertbildung unterdrückt, es können günstige Bauteile verwendet werden
<b>Delta-Sigma</b>	Auflösungen typ 16 bis 24 Bit, Umsetzrate $f_{\text{Abt}}$ bei 16 Bit ca. 1Mhz Low Cost, Low Bandwidth, High Resolution, wird vorrangig in Audiotechnik eingesetzt

### 19. Messverfahren für regenerative Energien

<b>Schalenkreuzanemometer</b>	$v_w = v_u \cdot \frac{1 + \sqrt{\frac{c_{w1}}{c_{w2}}}}{1 - \sqrt{\frac{c_{w1}}{c_{w2}}}} = v_u \cdot \text{const}$
<b>Solarstrahlung</b>	Pyranometer und Pyrheliometer messen Bestrahlungsstärke in $\text{W/m}^2$ zur Standortwahl und zur Beurteilung der Effizienz von Solaranlagen