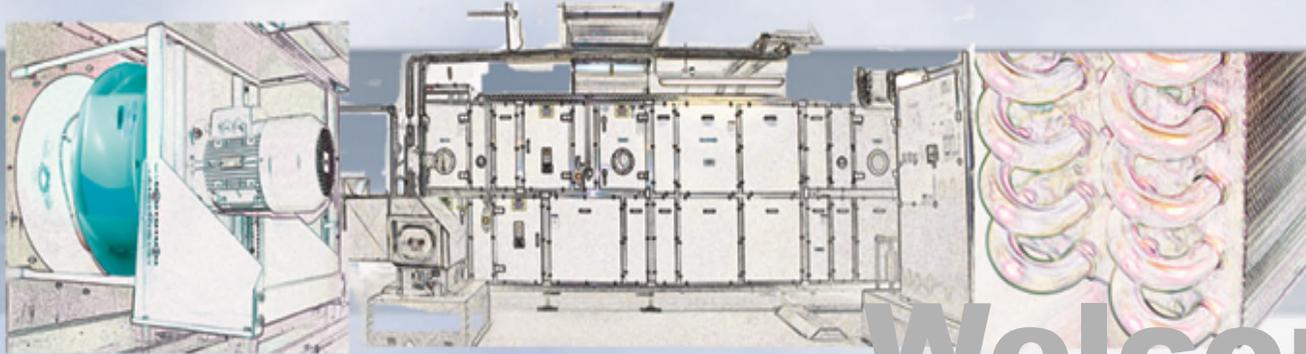


Willkommen



Welcome

Bienvenue

Raumlufttechnik Messtechnik

Energierückgewinnung und Energieeffizienz-
technologien in der Lüftungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup

c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus
Birkenfeld

H O C H
S C H U L E
T R I E R

Messtechnik

Ein **Messgerät** liefert Messwerte, auch die Verknüpfung mehrerer voneinander unabhängiger Messwerte, wie beispielsweise das Verhältnis von Messwerten.

Eine **Messeinrichtung** besteht aus einem **Messgerät** oder mehreren zusammenhängenden Messgeräten mit **zusätzlichen Einrichtungen**, die ein **Ganzes bilden**.

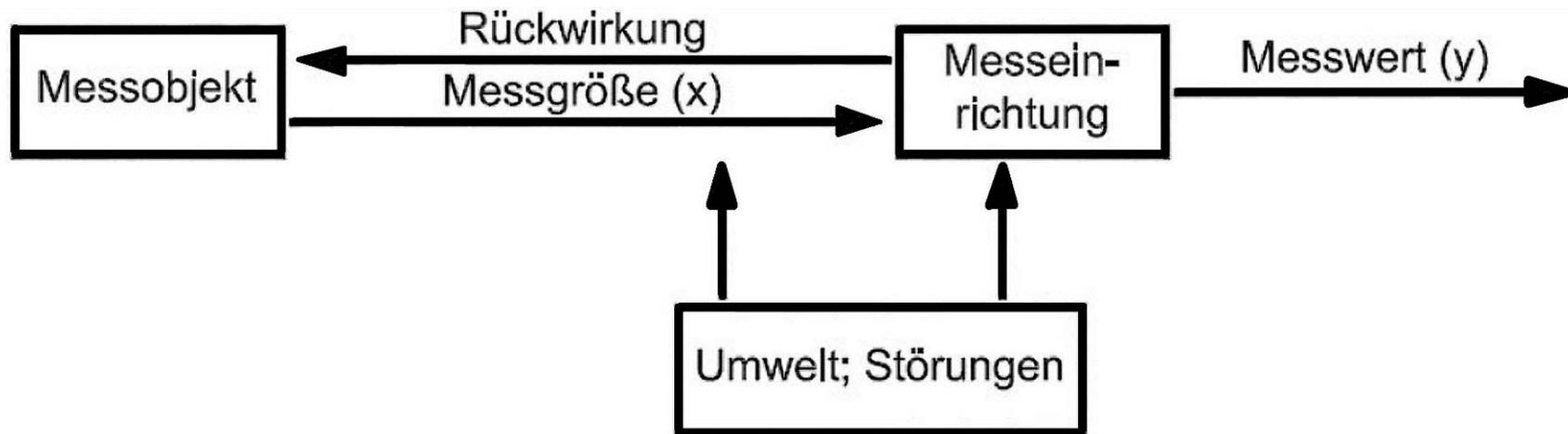
Zusätzliche Einrichtungen sind vor allem **Hilfsgeräte**, die nicht unmittelbar zur Aufnahme, Umformung oder Ausgabe dienen (z. B. Hilfsenergie, Thermostat,...), sowie **Signal- und Messleitungen**. Die wesentliche **Aufgabe** einer **Messeinrichtung** ist die **Aufnahme des Messwertes** einer physikalischen Größe (**Messgröße**) oder eines **Messsignals**, das den gesuchten **Messwert** repräsentiert, die Weiterleitung und Umformung des Messsignals und die Ausgabe des Messwertes.

Messtechnik

Das erste Glied in einer Messeinrichtung, also das der Messgröße am nächsten ist, wird häufig **Aufnehmer** genannt. Andere gängige Bezeichnungen sind **Sensor** oder **Fühler**. Es nimmt den Messwert der Messgröße auf und gibt ein diesem entsprechendes Messsignal ab.

Das letzte Glied einer Messeinrichtung heißt **Ausgeber (Ausgabegerät)** und kann ein direkter Ausgeber (Sichtausgeber, z. B. ein Anzeigegerät oder ein Schreiber) oder ein indirekter Ausgeber (Datenträger) sein.

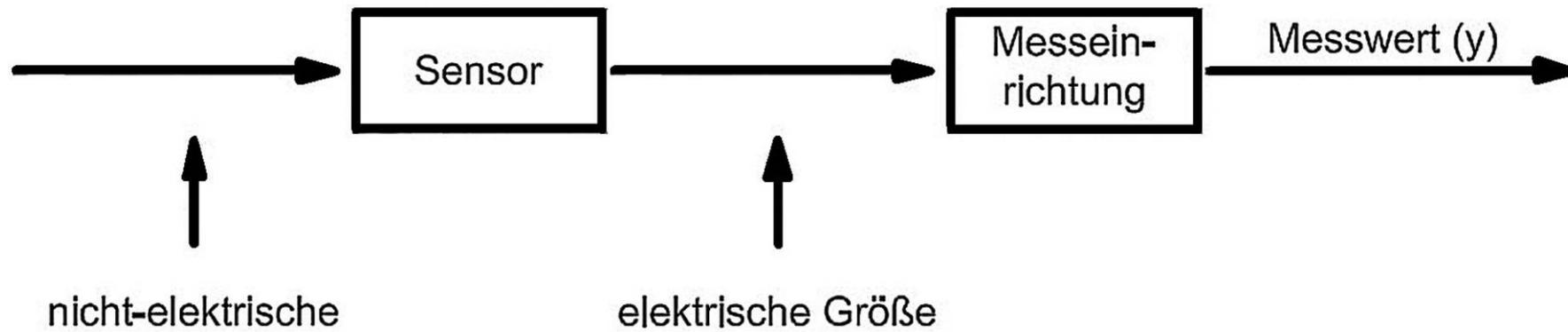
Die **Übertragungsglieder** jeder Art zwischen Aufnehmer und Ausgeber bilden die **Übertragungsstrecke**. Dazu gehören **Messverstärker, Messumformer** und **Messumsetzer**. Oft ist eine scharfe Trennung der Begriffe nicht möglich, jedoch fallen alle Glieder der Kette unter den Begriff Messgerät.



Messtechnik

Eine **Messeinrichtung** wird als ein System (**Messsystem**), das vor allem aus Aufnehmer, in 'Kette' geschalteten Übertragungsgliedern (Messumformern) und Ausgeber zusammengesetzt ist, auch **Messkette** genannt.

Eine **Messanlage** umfasst **mehrere voneinander unabhängige Messeinrichtungen**, die in räumlichen oder funktionellem Zusammenhang stehen.



SI-Basisgröße		SI-Basiseinheit	
Name	Zeichen	Name	Zeichen
Länge	l (kleines L)	das Meter	m
Masse	m	das Kilogramm	kg
Zeit	t	die Sekunde	s
el. Stromstärke	I (großes i)	das Ampere	A
thermodyn. Temperatur	T	das Kelvin	K
Stoffmenge	n	das Mol	mol
Lichtstärke	I_v	die Candela	cd

SI-Einheiten

Abgeleitete Einheiten im SI	SI-Einheit		Beziehung zu	
	Name	Zeichen	SI-Basiseinheit	andere SI-Einheiten
Ebener Winkel	Radian	rad	= m ¹ m ⁻¹	
Raumwinkel	Steradian	sr	= m ² m ⁻²	
Frequenz	Hertz	Hz	= s ⁻¹	
Aktivität	Becquerel	Bq	= s ⁻¹	
Kraft	Newton	N	= m kg s ⁻²	
Druck/mech.Spannung	Pascal	Pa	= m ⁻¹ kg s ⁻²	= N/m ²
Energie, Arbeit, Wärmemenge	Joule	J	= m ² kg s ⁻²	= Nm
Leistung, Wärmestrom	Watt	W	= m ² kg s ⁻³	= J/s
Energiedosis	Gray	Gy	= m ² s ⁻²	= J/kg
Äquivalentdosis	Sievert	Sv	= m ² s ⁻²	= J/kg
Elektrische Ladung	Coulomb	C	= s A	
Elektrische Spannung	Volt	V	= m ² kg s ⁻³ A ⁻¹	= W/A
Elektrische Kapazität	Farad	F	= m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²	= C/V
Elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	= m ² kg s ⁻³ A ⁻²	= V/A
Elektrischer Leitwert	Siemens	S	= m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²	= A/V
Magnetischer Fluß	Weber	Wb	= m ² kg s ⁻² A ⁻¹	= Vs
Magnetische Flußdichte	Tesla	T	= kg s ⁻² A ⁻¹	= Wb/m ²
Induktivität	Henry	H	= m ² kg s ⁻² A ⁻²	= Wb/A
Celsius-Temperatur	Grad Celsius	°C	= 1K	
Lichtstrom	Lumen	lm	= m ² m ⁻² cd	= cd sr
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	= m ² m ⁻⁴ cd	= lm/m ²

Messfehler

Eine Messung ist stets mit einem Energie- oder Informationsfluss vom Messobjekt zum Messgerät verbunden. Dabei ist streng darauf zu achten, dass umgekehrt durch den Anschluss oder den Einbau des Messgerätes die zu messende Größe nicht verändert wird.

Ist das Messobjekt einmal **durch das Messgerät gestört**, so kann nicht mehr der richtige, ohne das Messgerät vorhandene Wert ermittelt werden.

Eine solche Belastung der Messgröße durch das Messen selbst wird **Rückwirkung** genannt.

Diese ist, wenn sie bekannt ist, in einer Korrektur zu berücksichtigen. Aber selbst wenn rückwirkungsfrei gemessen wird, also ohne die Messgröße durch den Messvorgang zu beeinflussen, ist der Messwert, das Ergebnis / die Anzeige, nicht völlig richtig.

Messfehler

Der Unterschied zwischen dem gemessenen, angezeigten Wert x und dem wahren Wert x_w der Messgröße wird als Fehler Δx bezeichnet:

$$\Delta x = x - x_w$$

Dieser Fehler, auch Messfehler genannt, kann in verschiedene Arten klassifiziert werden.

Grobe Fehler sind stets zu vermeiden, und gelten auch als vermeidbar. Sie treten bei korrekter Arbeitsweise und intakten Messgeräten nicht auf. Von größerer Bedeutung sind die **systematischen Fehler** und die **zufälligen Fehler**.

Messfehler

Bei Messgeräten wird eine **Garantiefehlergrenze** als technisches Merkmal angegeben. Sowohl **systematische Fehler** als auch **zufällige Fehler** sind in dieser Grenze enthalten. Die systematischen und zufälligen Fehler werden nur in Sonderfällen im einzelnen analysiert. Bei Routinemessungen wird häufig die **Fehlerbetrachtung** anhand der **Garantiefehlergrenzen** oder Klassengenauigkeit durchgeführt. Die **Garantiefehlergrenze G** gibt die **mögliche äußerste Abweichung vom wahren Wert** an. Sie bezeichnet die **maximal mögliche Unsicherheit** und wird oft auf den **Messbereichsendwert X** bezogen:

$$G = \text{Unsicherheit } \Delta x / \text{Messbereichsendwert } X$$

Messfehler

Beim Messbereichsendwert ist zu berücksichtigen, dass sich dieser bei manchen Messgeräten ändern kann, wenn beispielsweise der Messbereich umgeschaltet wird.

Die Garantiefehlergrenze kann einseitig (Vorzeichen entweder + oder -) oder zweiseitig (\pm) angegeben werden. Im letzten Fall weicht der wahre Wert x_w höchstens um $\pm \Delta x$ vom gemessenen Wert x ab.

Aus der Gleichung folgt:

$$\Delta x = X \cdot G \text{ bezogen auf den angezeigten Wert } x$$

Hieraus ist ersichtlich, dass die relative Unsicherheit des Messwertes mit dem **Verhältnis X / x** zunimmt.

Deshalb empfiehlt es sich, den Messbereich jeweils möglichst gut auszunutzen.

Statisches Verhalten von Messgeräten

Der **stationäre Zustand** eines Messgerätes ist bei zeitlicher Konstanz aller Eingangsgrößen nach Ablauf aller **Ausgleichsvorgänge** erreicht. Für diesen Zustand beschreibt die Kennlinie, wie das Ausgangssignal x_a eines Messgerätes von dem Eingangssignal x_e abhängt:

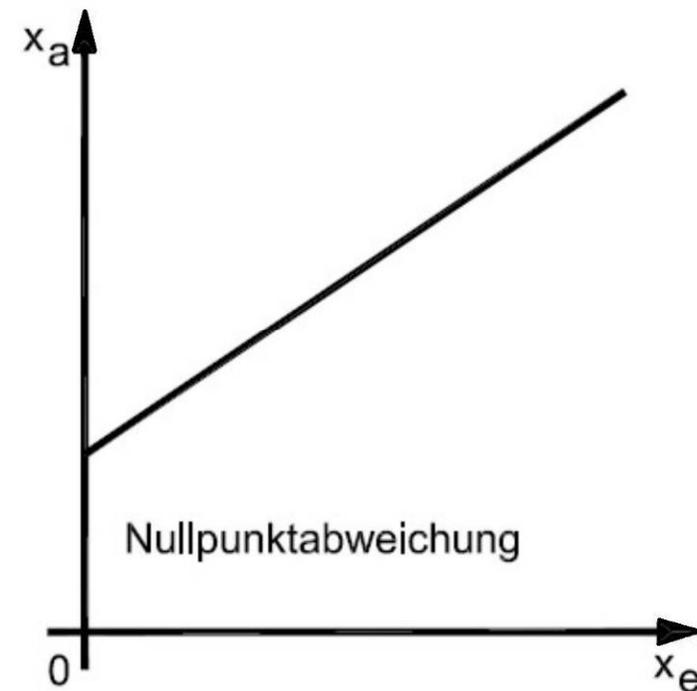
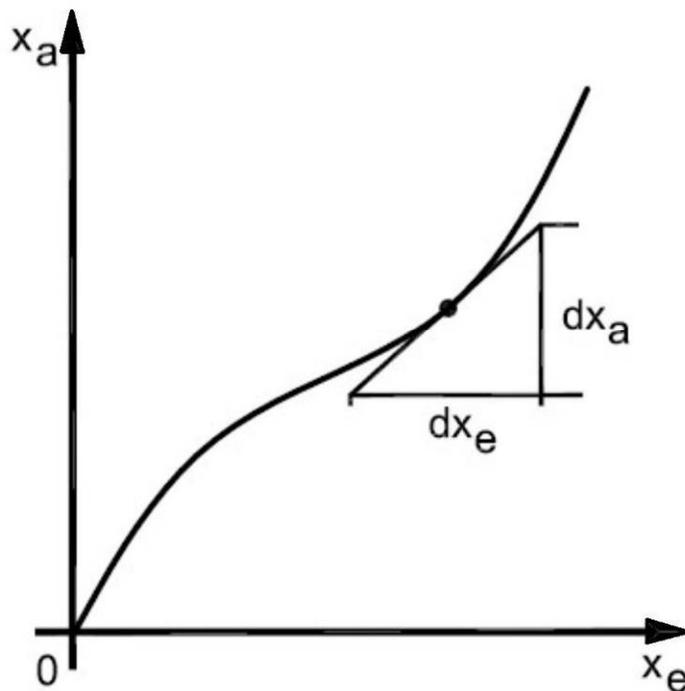
$$x_a = f(x_e)$$

Der Zusammenhang zwischen beiden Größen wird meistens in Form eines geschlossenen mathematischen Ausdrucks, oder seltener in Form einer Wertetabelle angegeben.

Im Allgemeinen wird ein linearer Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße, also zwischen Mess- und Anzeigegröße gewünscht.

Statisches Verhalten von Messgeräten

Wird der **Zusammenhang** zwischen **Ein- und Ausgangsgröße** graphisch dargestellt, dann erhält man die sog. **Kennlinie des Messgerätes**.



Statisches Verhalten von Messgeräten

Die Kennlinie links ist nicht linear, d. h. die mathematische Linearitätsbeziehung zwischen der Messgröße und dem Anzeigewert ist nicht anwendbar.

Die **Steigung bei linearen Kennlinien** entsprechen der **Empfindlichkeit** des Messgerätes.

Wird der Empfindlichkeitsbegriff verallgemeinert, dann lässt sich die Empfindlichkeit als Änderung des Anzeigewertes bezogen auf die Änderung der **Messgröße (Tangente)** angeben:

$$E = dx_a / dx_e$$

Bei nichtlinearen Kennlinien hängt die Empfindlichkeit vom Arbeitspunkt ab.

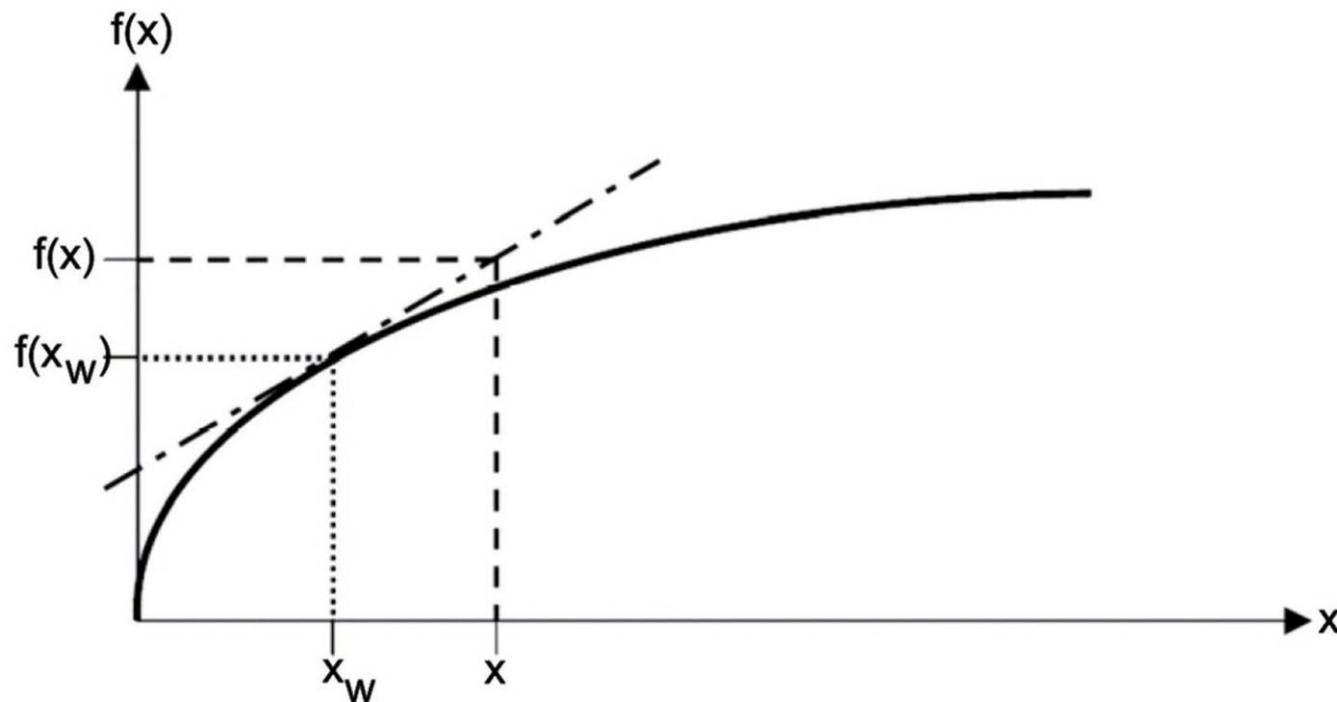
Statisches Verhalten von Messgeräten

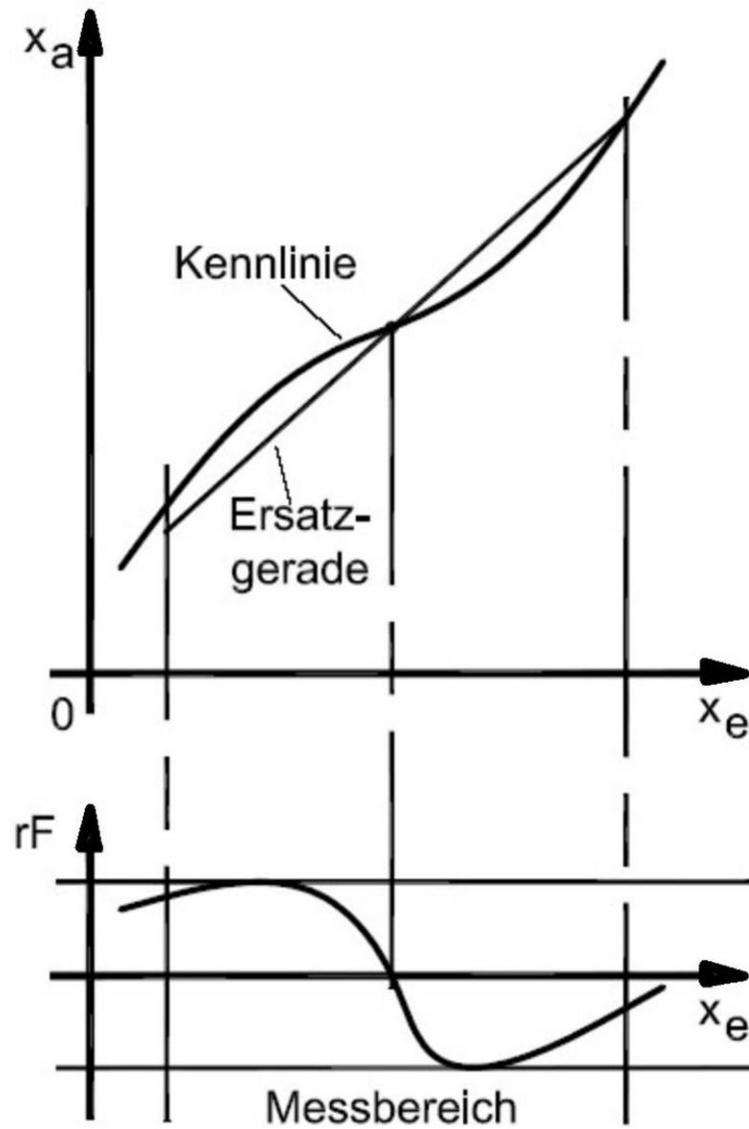
Da Kennlinien reproduzierbar sind, kann durch nachgeschaltete Korrekturglieder oder rechnerisch der Linearitätsfehler in Grenzen ausgeglichen werden. Wird in einem **Arbeitspunkt** die Tangente an die Kennlinie gelegt und dabei dem Messgerät eine Empfindlichkeit zugeordnet, dann wird dies die **Linearisierung** um den **Arbeitspunkt** genannt (Anmerkung: mathematisch entspricht die **Linearisierung einer Taylorreihenentwicklung 1. Ordnung** der Kennlinie im Arbeitspunkt). Verschiebt sich der Arbeitspunkt, dann kann sich eine völlig andere Kennlinie ergeben.

Bei vielen Messgeräten werden **kompensierende Verfahren** eingesetzt, wo der Arbeitspunkt durch einen Regelkreis eingestellt wird.

Taylorreihe 1. Ordnung

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0) \cdot (x - x_0)$$





Linearisierung

Die **Linearisierung** kann auch über den gesamten Messbereich erfolgen. Die **Steigung der Ersatzgeraden**, welche die **Empfindlichkeit** des Messgerätes repräsentiert.

Bei der **linearisierten Kennlinie** kann zwischen **realer Kennlinie** und der **Ersatzgeraden**, mit der Empfindlichkeit als Steigung, eine **Fehlerkurve** ermittelt werden. Es ergibt sich dann ein Fehler f zwischen dem angezeigten Messwert x_a und dem theoretischen, aus der Geraden ermittelten Meßwert x'_a :

$$f = x_a - x'_a$$

$$f = x_a - (a \cdot x_e + b)$$

Derartige Abweichungen sind stets reproduzierbar und werden mitunter als Korrekturkennlinie angegeben.

Linearisierung

Die Angaben erfolgen meist in Prozent bezogen auf den Messbereich oder Messbereichsendwert als **relative Fehler** r_F . Die Breite der Fehlerkurve (maximaler Wert - minimaler Wert) wird als **Linearitätsfehler** bezeichnet. Die Wahl der Ersatzgeraden kann auf unterschiedliche Art erfolgen. Die erste, mehr experimentelle Art, zielt auf eine Minimierung des Linearitätsfehlers, d. h. der Maximal- und Minimalwerte. Die zweite, mathematisch fundiertere Art ist die **Methode der kleinsten Fehlerquadrate**. Hierbei wird die Fehlerkurve, ggf. nur in Stützpunkten, quadriert und danach werden die Geradenparameter a und b so bestimmt, dass die Summe der Quadrate, im infinitesimalen Sinne die Summenfläche unter der Quadratkurve ein Minimum wird:

$$S(a, b) = \int_{\text{Messbereich}} f^2(x_a(x_e), x_e) \cdot dx = \textit{Minimum}$$

Linearisierung

Ist die Kennlinie eine Gerade oder eine linearisierte Kennlinie, dann hat das Messgerät in allen Arbeitspunkten dieselbe konstante Empfindlichkeit E . Verläuft die Kennlinie zusätzlich durch den Nullpunkt, liegt eine reine Proportionalität vor:

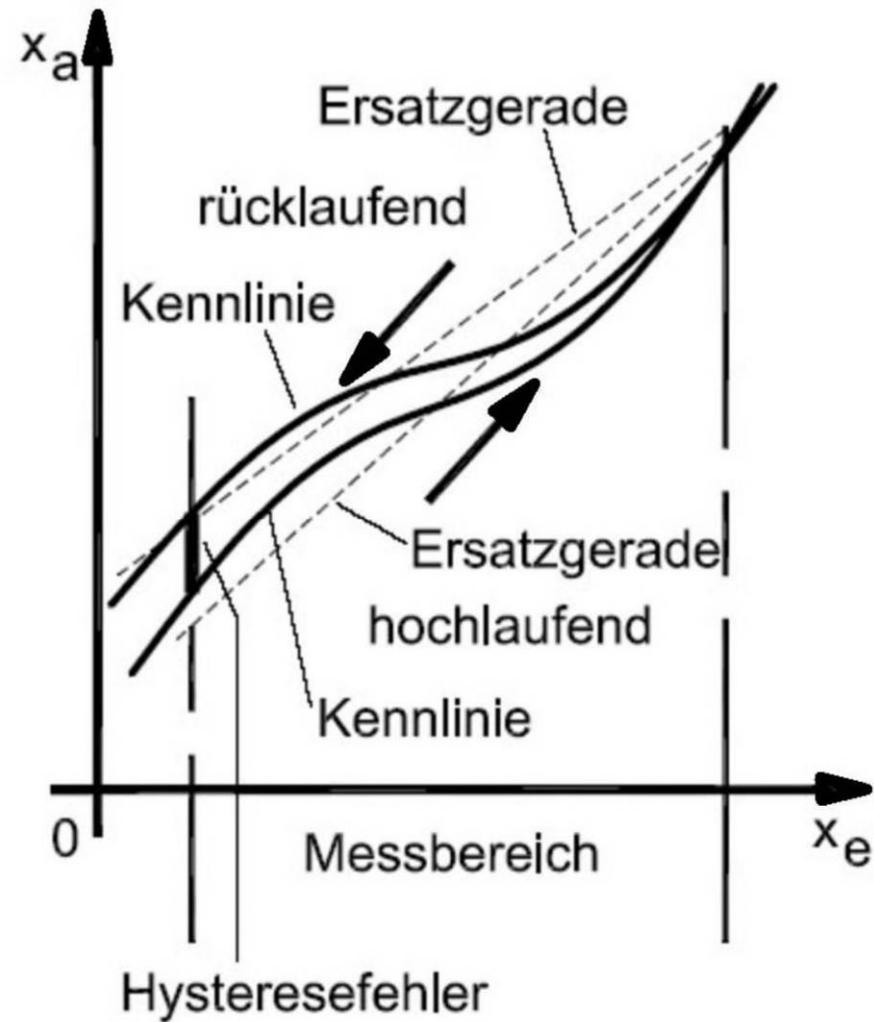
$$x_a = E \cdot x_e$$

Bei vielen Messgeräten, insbesondere solche mit hoher Empfindlichkeit, kann es nützlich sein, den Nullpunkt zu unterdrücken. Das bedeutet, bei einer Messgröße vom Wert 0 wird bereits ein Wert ungleich 0 angezeigt (**Nullpunktabweichung**). Nimmt die Messgröße Werte in einem relevanten Bereich an, dann kann der Anzeigewert klein bleiben. Änderungen der Messgröße ergeben dann signifikante Änderungen in der Anzeigegröße.

Linearisierung

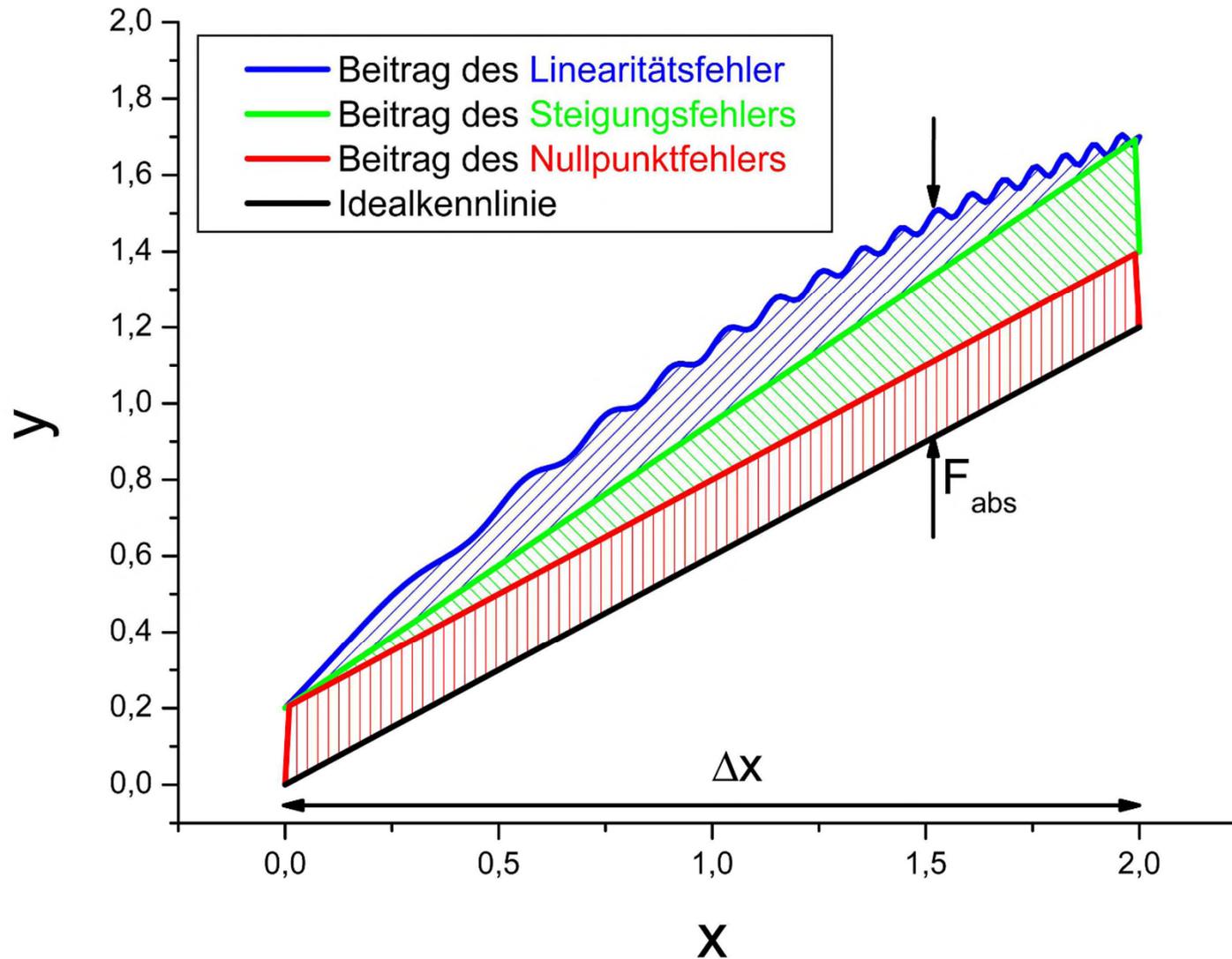
Andere Gründe für eine **Nullpunktabweichung** können z. B. die **Energieversorgung des Messgerätes** über Signalleitungen oder eine **Bereitschaftsanzeige** sein. Ein typisches Messgerät der ersten Kategorie ist eines mit 4..20 mA-Schnittstelle (vorzugsweise Sensoren). Der Anzeigewert ist der Strom, der durch das Messgerät getrieben werden kann. Dieser ist immer größer oder gleich 4 mA, um die Energieversorgung des Messgerätes aufrecht zu erhalten.

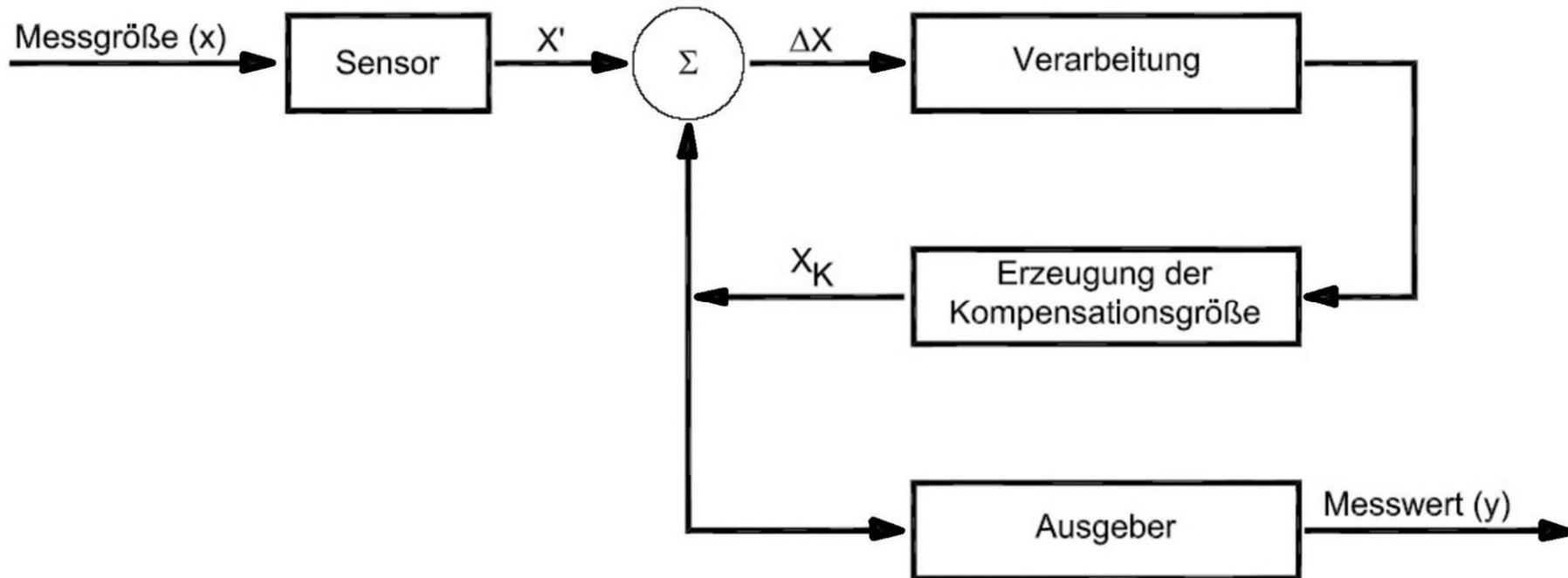
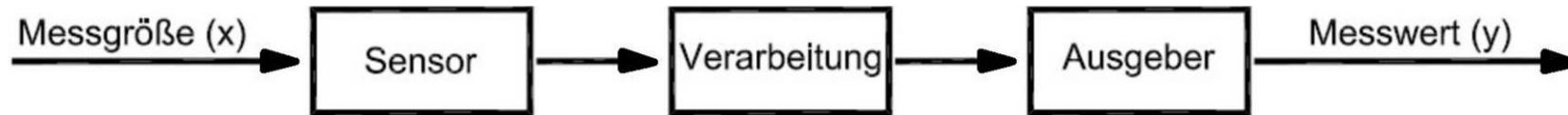
Weitere Abweichungen von einer idealen Kennlinie, z. B. einer Geraden, können sich durch sog. **Hystereseeffekte** einstellen. Bei Messgeräten und Sensoren ist dieser Effekt natürlich nicht erwünscht, stellt sich aber oft ein. Insbesondere dann, wenn magnetische Systeme Bestandteil des Messwertaufnehmers sind.



Linearisierung

Das Bild zeigt den Verlauf einer nichtlinearen Kennlinie, und der dazugehörigen linearisierten Kennlinie (**Ersatzgeraden**), für **zunehmende Werte der Messgröße**, beginnend am unteren Ende des Messbereichs, durchlaufend bis zum oberen Ende des Messbereichs und wieder zurück. Für die **hochlaufende** und die **rücklaufende Kennlinien** und der dazugehörenden Ersatzgeraden ergeben sich **unterschiedliche Empfindlichkeiten** und **unterschiedliche Nullpunkte**. Dieser **Hysteresefehler** ist den anderen Fehlern überlagert und mindert die Qualität des Messaufnehmers.





Dynamisches Verhalten von Messgeräten

Bisher wurde nur die statische Kennlinie eines Messgerätes betrachtet. Messgeräte sind aber nicht in der Lage in beliebig kurzer Zeit auf eine Änderung der Eingangsgröße mit einem der Kennlinie entsprechendem Anzeigenwert zu reagieren.

Ist die Messgröße konstant, muss sich auch ein konstanter Anzeigewert, der sog. **stationäre Endwert** (entsprechend der statischen Empfindlichkeit) ergeben. Wenn sich die Messgröße zeitlich verändert, kann es zu erheblichen Abweichungen, d. h. in diesem Fall **dynamischen Messfehlern** kommen.

Beispielsweise neigen viele Messgeräte und Sensoren bei schnellen Veränderungen der Messgröße zur Mittelwertbildung.

Messungen im Beharrungszustand unterliegen dem dynamischen Verhalten prinzipiell nicht!

Zufällige Fehler

Zufällige Messfehler streuen regellos zufällig nach beiden Seiten des richtigen Wertes.

Das Fehlervorzeichen wechselt und die Fehlerbeträge sind gleich groß. Da der Fehler eine Zufallsgröße ist, können die Methoden der **Statistik** herangezogen werden, um den Fehler abschätzen zu können. Folgende Methoden werden angewendet:

Mittelwert (Arithmetisches Mittel)

Um den zufälligen Fehler zu ermitteln, bzw. um die Größe des richtigen Wertes zu erhalten, wird der Mittelwert \bar{x} berechnet.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Zufällige Fehler

n = Anzahl der Messwerte (Stichprobenzahl)

Mit steigender Stichprobenzahl nähert sich der Mittelwert \bar{x} immer mehr dem richtigen Wert x_r

Zur Beurteilung der Streuung der Einzelmesswerte um den Mittelwert wird die **Standardabweichung s** berechnet.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Empirische Varianz $s^2 = \sigma$

Zufällige Fehler

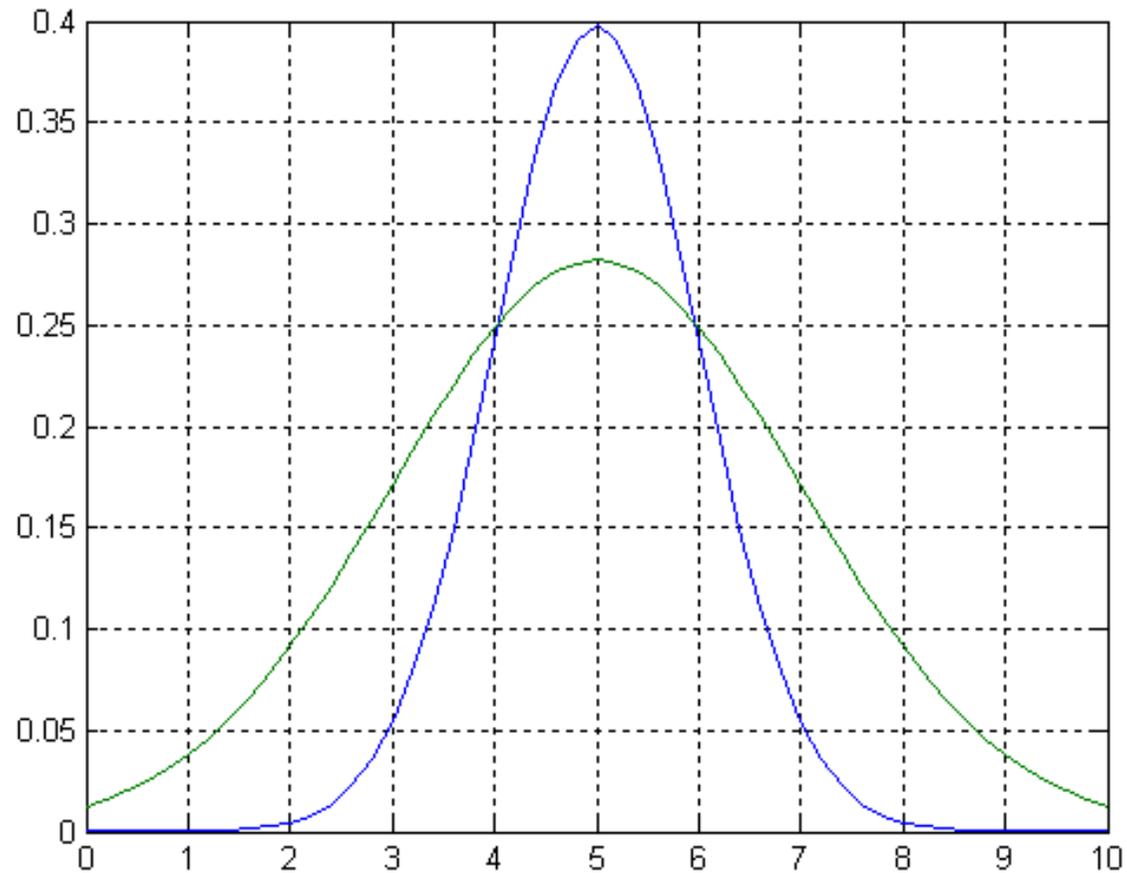
s ist der Schätzwert der Standardabweichung σ bei Normalverteilung und endlicher Anzahl von Stichproben.

Der Zusammenhang von Mittelwert und Standardabweichung ist in der Verteilungskurve (**Normalverteilung**) nach Gauß zu erkennen. Diese Normalverteilung heißt Dichtefunktion $p(x_a)$.

$$p(x_a) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_a - x_r}{\sigma} \right)^2}$$

Bei einer Normalverteilung liegen die Werte x_a mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb bestimmter Intervalle um den Median (Erwartungswert) x_r .

Zufällige Fehler



$s^2 = 1$ (blau) und $s^2 = 2$ (grün)

Zufällige Fehler

Für eine endliche Anzahl n von Messwerten kann für den Mittelwert \bar{x} ein Vertrauensbereich x_v berechnet werden.

$$x_v = \bar{x} \pm \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot s$$

Hierbei ist t = Vertrauensfaktor; er ist abhängig von der Anzahl n und der geforderten statistischen Sicherheit (68%, 95,5%, 99,7%). Im Industriebereich wird meist die statistische Sicherheit mit $P = 95,5 \%$ verwendet, aber auch $P = 99,7 \%$.

Für $n = 50$ und $P = 95,5 \%$ ist $t = 2,0$ oder $P = 99,7$ ist $t = 3,0$ (Hierzu DIN 1319).

Fehlerfortpflanzung

Wird ein **Messergebnis** aus **mehreren Messwerten** berechnet, so ist Auswirkung der **Messunsicherheit** des **einzelnen Messwertes** auf das **Gesamtergebnis** zu beachten.

Das Messergebnis ist eine Funktion der Messwerte

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Die Fehlerfortpflanzung behandelt den **Einfluss der Messfehler der Messwerte auf das Messergebnis**. Es werden die vier Grundrechenarten behandelt.

Fehlerfortpflanzung

Addition und Subtraktion von Messwerten

(mit systematischem Fehlern)

Setzt sich das Messergebnis aus n Messwerten zusammen, so wird der **absolute Gesamtfehler** aus der **Summe** bzw. **Differenz** der **absoluten Einzelfehler** berechnet.

$$y \pm F = x_1 \pm F_1 + x_2 \pm F_2 + \dots + x_n \pm F_n$$

$$\Rightarrow F = \pm F_1 \pm F_2 \dots \pm F_n$$

Sind die Vorzeichen der Fehler nicht bekannt, so addieren sich die Beträge der Einzelfehler (**Maximalfehler**).

$$|F| = |F_1| + |F_2| + \dots + |F_n|$$

Fehlerfortpflanzung

Multiplikation und Division

Wird das Messergebnis gebildet mit:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

so errechnet sich der absolute Gesamt-Fehler F bei genügend kleinen absoluten Fehlern F aus dem **totalen Differential** (**partielle Ableitungen**).

$$F = \frac{\partial f}{\partial x_1} F_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} F_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} F_n$$

Bei der Multiplikation und Division der Messwerte wird das Ergebnis mit $y = x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}$ berechnet.

Fehlerfortpflanzung

Nach Anwendung des totalen Differentials ergibt sich:

$$F = y \left(\alpha_1 \frac{F_1}{x_1} + \alpha_2 \frac{F_2}{x_2} + \dots + \alpha_n \frac{F_n}{x_n} \right)$$

Als **relativer Gesamtfehler** (abs. Gesamtfehler bezogen auf das Messergebnis) folgt:

$$\frac{F}{y} = \alpha_1 \frac{F_1}{x_1} + \alpha_2 \frac{F_2}{x_2} + \dots + \alpha_n \frac{F_n}{x_n}$$

Fehlerfortpflanzung

Sind die **Vorzeichen der Einzelfehler bekannt**, so werden sie mit den **Potenzen α** multipliziert.

Sind die **Vorzeichen unbekannt**, so muss der **ungünstigste Fall** angenommen werden, d. h. alle Fehler wirken in die gleiche Richtung. Es werden dann alle relativen Fehler zum gesamten relativen Fehler addiert.

$$F = \frac{F}{y} = \frac{F_1}{x_1} + \frac{F_2}{x_2} + \dots + \frac{F_n}{x_n}$$

Der **abs. Gesamtfehler** wird durch **Multiplikation des relativen Fehlers** mit dem Messwterergebnis berechnet.

Gaußsches Fehlerfortpflanzung

Zur statistischen Kombination wird die Varianz des Messergebnisses nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet:

$$\sigma_y^2 = \sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{\delta f}{\delta x_k} \Big|_{(\mu_1, \dots, \mu_n)} \right)^2 \cdot \sigma_k^2 \right)$$

oder in anderer Schreibweise:

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\delta f}{\delta x_1} \cdot \sigma_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta x_2} \cdot \sigma_2 \right)^2 + \left(\frac{\delta f}{\delta x_3} \cdot \sigma_3 \right)^2 + \dots$$

Gaußsches Fehlerfortpflanzung

Die Varianz des Messergebnisses ergibt sich aus der Addition der Varianzen der Einzelwerte, die mit dem Quadrat der partiellen Ableitung an der Stelle $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ multipliziert werden. Dies gilt streng genommen für normalverteilte Zufallsgrößen, es ist aber auch für andere Verteilungen (zentraler Grenzwertsatz) eine gute Näherung.

Die Gleichungen können auf die Schätzwerte Mittelwert und empirische Varianz übertragen werden:

$$y = f(x_1, \dots, x_n)$$

$$s_y^2 = \sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{\delta f}{\delta x_k} \right)^2 \cdot s_k^2 \right)$$

Fehler der größten Wahrscheinlichkeit

Der Fehler der größten Wahrscheinlichkeit wird aus der geometrischen Addition der Einzelfehler berechnet:

$$F_W = \sqrt{F_{g_1}^2 + F_{g_2}^2 + F_{g_3}^2 \dots + F_{g_n}^2}$$

$$F_W = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\left(\frac{\delta f}{\delta x_k} \right)^2 \cdot F_g^2 \right)}$$

Beispiel

Gegebene Funktion :

$$y = \frac{a}{b^2} - c^3$$

mit:

$a = 1$	$\pm 20 \%$
$b = 17,75$	$\pm 10 \%$
$c = 1$	$\pm 0,1 \%$

Gesucht:

Größter Fehler
Wahrscheinlicher Fehler

Beispiel

Größter Fehler:

$$F_g = \left| \left(\frac{1}{b^2} - 0 \right) \cdot \Delta a \right| + \left| \left(\frac{-2a}{b^3} - 0 \right) \cdot \Delta b \right| + \left| (0 - 3c^2) \cdot \Delta c \right|$$

$$F_g = 0,0006347 + 0,0006347 + 0,003$$

$$F_g = \pm 0,00427$$

Beispiel

Ergebnis der Funktion :

$$y = \frac{1}{17,75^2} - 1^3 = -0,9968$$

$$F_{gr} = \pm 0,00427 / 0,9968 = 0,428 \%$$

Beispiel

Wahrscheinlicher Fehler:

$$F_g = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{b^2} - 0\right) \cdot \Delta a\right)^2 + \left(\left(\frac{-2a}{b^3}\right) \cdot \Delta b\right)^2 + \left((0 - 3c^2) \cdot \Delta c\right)^2}$$

$$F_g = \sqrt{0,0006347^2 + 0,0006347^2 + 0,003^2}$$

$$F_g = \pm 0,00313$$

$$F_g = \pm 0,00313 / 0,9968 = 0,324 \%$$

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Der Temperaturübertragungsgrad einer Wärmerückgewinnung ergibt sich aus den Wärmeleistungen:

$$\Phi_2 = \frac{\dot{Q}_{ZU}}{\dot{Q}_{PO}} = \frac{\dot{m}_{Zu} c_p \Delta \vartheta}{\dot{m}_{Ab} c_p \Delta \vartheta'} = \frac{\dot{m}_{ZU} \vartheta_{Zu} - \dot{m}_{Zu} \vartheta_{Au}}{\dot{m}_{Ab} \vartheta_{Ab} - \dot{m}_{Ab} \vartheta_{Au}}$$

abgeleitet ergibt sich:

$$\Phi_2 = \frac{\dot{m}_{Zu} \cdot (\vartheta_{Zu} - \vartheta_{Au})}{\dot{m}_{Ab} \cdot (\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Au})}$$

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Mit dieser Funktion hat man die Möglichkeit die Unsicherheit über die partiellen Ableitungen der Fehlerfortpflanzung zu bestimmen. Bestimmt man die Unsicherheit über die partiellen Ableitungen, so wird jede Abweichung bzw. **Unsicherheit** mit dem **zugehörigen Parameter gewichtet**, und so der wahre Einfluss der Größe auf die Gesamtunsicherheit (wahrscheinlicher Fehler) berücksichtigt:

$$u_{\Phi} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Zu}}\right)^2 u_{\vartheta_{Zu}}^2 + \left(\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Ab}}\right)^2 u_{\vartheta_{Ab}}^2 + \left(\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Au}}\right)^2 u_{\vartheta_{Au}}^2 + \left(\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \dot{m}_{Zu}}\right)^2 u_{\dot{m}_{Zu}}^2 + \left(\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \dot{m}_{Ab}}\right)^2 u_{\dot{m}_{Ab}}^2}$$

Die Bezeichnung der Rückwärmzahl Φ werden weiter ohne den Index 2 benutzt.

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Der Größte Fehler errechnet sich aus:

$$u_{\Phi} = \pm \left| \frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Zu}} u_{\vartheta_{Zu}} \right| + \left| \frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Ab}} u_{\vartheta_{Ab}} \right| + \left| \frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Au}} u_{\vartheta_{Au}} \right| + \left| \frac{\partial f(\Phi)}{\partial \dot{m}_{Zu}} u_{\dot{m}_{Zu}} \right| + \left| \frac{\partial f(\Phi)}{\partial \dot{m}_{Ab}} u_{\dot{m}_{Ab}} \right|$$

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Damit die ganze Vorgehensweise transparent und nachvollziehbar bleibt, werden die partiellen Ableitungen im Einzelnen durchgeführt.

Zulufttemperatur

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Zu}} = - \frac{\dot{m}_{Zu}}{\dot{m}_{Ab}} \cdot \frac{1}{\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Au}}$$

Durch eine Dimensionskontrolle lässt sich die Richtigkeit der Ableitung prüfen. Als Ergebnis jeder partiellen Ableitung erhalten wir eine **dimensionslose Größe**, da auch die Rückwärmzahl Φ dimensionslos ist.

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Ablufttemperatur

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Ab}} = \frac{\dot{m}_{ZU}}{\dot{m}_{Ab}} \cdot \frac{\vartheta_{ZU} - \vartheta_{Au}}{(\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Au})^2}$$

Außenlufttemperatur

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Au}} = - \frac{\dot{m}_{ZU}}{\dot{m}_{Ab}} \cdot \frac{\vartheta_{ZU} - \vartheta_{Ab}}{(\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Au})^2}$$

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Zuluftmassenstrom

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \dot{m}_{Zu}} = -\frac{1}{\dot{m}_{Ab}} \cdot \frac{\mathcal{G}_{Zu} - \mathcal{G}_{Au}}{\mathcal{G}_{Ab} - \mathcal{G}_{Au}}$$

Abluftluftmassenstrom

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \dot{m}_{Ab}} = -\frac{\dot{m}_{Zu}}{\dot{m}_{Ab}^2} \cdot \frac{\mathcal{G}_{Zu} - \mathcal{G}_{Au}}{\mathcal{G}_{Ab} - \mathcal{G}_{Au}}$$

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Mit einem Beispiel soll die Wirksamkeit der Methode dargestellt und exemplarisch die Unsicherheit der Rückwärmezahl aus den Einzelunsicherheiten berechnet werden. Dabei werden folgende Zahlenwerte für den Betriebszustand zugrunde gelegt:

			Absolute Unsicherheit		
Zuluftmassenstrom	60.000 kg/h		1.920 kg/h	3,20	%
Abluftmassenstrom	60.000 kg/h		1.920 kg/h	3,20	%
Zulufttemperatur	16,3 C		0,15 K	0,90	%
Ablufttemperatur	19,5 C		0,15 K	0,77	%
Außenlufttemperatur	5,0 C		0,15 K	3,00	%

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Mit diesen Zahlenwerten lassen sich die einzelnen Terme der Fehlerfortpflanzung berechnen. Man erhält zuerst die dimensionslosen Größen.

Zulufttemperatur

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Zu}} = - \frac{\dot{m}_{ZU}}{\dot{m}_{Ab}} \cdot \frac{\vartheta_{Au}}{\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Au}} = 0,069$$

Ablufttemperatur

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Ab}} = \frac{\dot{m}_{ZU}}{\dot{m}_{Ab}} \cdot \frac{\vartheta_{Zu} - \vartheta_{Au}}{(\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Au})^2} = 0,056$$

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Außenlufttemperatur

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \vartheta_{Au}} = -\frac{\dot{m}_{ZU}}{\dot{m}_{Ab}} \cdot \frac{\vartheta_{Zu} - \vartheta_{Ab}}{(\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Au})^2} = 0,013$$

Massenstrom Zuluft

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \dot{m}_{Zu}} = -\frac{1}{\dot{m}_{Ab}} \cdot \frac{\vartheta_{Zu} - \vartheta_{Au}}{\vartheta_{Ab} - \vartheta_{Au}} = 1,34 \cdot 10^{-5}$$

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Massenstrom Abluft

$$\frac{\partial f(\Phi)}{\partial \dot{m}_{Ab}} = -\frac{\dot{m}_{Zu}}{\dot{m}_{Ab}^2} \cdot \frac{\mathcal{G}_{Zu} - \mathcal{G}_{Au}}{\mathcal{G}_{Ab} - \mathcal{G}_{Au}} = 1,34 \cdot 10^{-5}$$

Setzt man die Quadrate dieser Terme ein und multipliziert sie mit der jeweiligen Unsicherheit u_{Tx} , um etc. und bildet die radizierte Summe, so erhält man die **wahrscheinliche Gesamtunsicherheit** für die Rückwärmzahl als dimensionslose Größe.

Die Unsicherheit des Massenstroms in der Zuluft wie in der Abluft werden mit 3,2% angenommen (siehe Netzmessung).

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

	Ableitung	Quadrat	Einzelunsicherheit
Zulufttemperatur	0,066310	0,00440	9,89E-05
Ablufttemperatur	0,053510	0,00286	6,44E-05
Außenlufttemperatur	0,012810	0,00016	3,69E-06
Zuluftmassenstrom	0,000013	1,7E-10	0,000616
Abluftmassenstrom	0,000013	1,7E-10	0,000616
		Summe	0,0014
		Wurzel	0,037416
Rückwärmezahl Φ_2	= 71,3	$\pm 3,74$	[$\pm 5,24\%$]

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Fazit

Interessant ist, dass entgegen der herkömmlichen Auffassung die Unsicherheiten der Temperaturmessungen bei gleichem Sensorfehler sich nicht gleichermaßen fortpflanzen und auf die Rückwärmezahl auswirken. Als Resultat der partiellen Ableitungen wird deutlich, dass die Unsicherheit der **Zulufttemperatur** ($\sim 1\%$) und der **Ablufttemperatur** ($\sim 0,8\%$) sich in ähnlicher Größenordnung fortpflanzen, während die Unsicherheit der **Außenlufttemperatur** ($\sim 0,2\%$) kaum eine Rolle spielt.

Die Unsicherheiten der **Massenströme** jeweils mit ($\sim 2,5\%$) angenommen, wirken sich am deutlichsten aus.

Beispiel Temperaturübertragungsgrad

Fazit

Zum Schluss noch einen Vergleich der Methoden zur Berechnung der Unsicherheit.

Die **geometrische Addition**, die häufig verwandt wird, liefert einen Fehler von 6,26% und die geometrische Addition bezogen auf die Temperaturdifferenzen ΔT beträgt 7,2% während der **Maximalfehler** bei 11,1% liegt.

Beispiel Luftmengenmessung (Netzmessung)

Die Netzmessungen von Volumenströmen in **Rechteckkanälen** sind eine lange eingeführte Methode. Die **DIN EN 12599** gibt dafür eine Messvorschrift zur Prüfung im Bereich der RLT-Anlagen an die Hand.

Dabei hängt die erzielbare Genauigkeit von der Anzahl der Messungen im Kanal ab. Allerdings ist es schwer eine Genauigkeit besser als 5% zu erzielen.

Dazu kommt eine relative grobe Fehlerabschätzung über die mittleren Geschwindigkeiten in den Quadranten.

*Erst die Methode der Fehlerbehandlung über die Differenzenbildung mit den jeweils **nächsten Nachbarn** führt zu wesentlich besseren Fehlerabschätzungen und kleineren Unsicherheiten.*

Beispiel Luftmengenmessung (Netzmessung)

Das hier verwendete Raster hatte insgesamt 72 Messstellen.

Damit erreicht man nach DIN eine Genauigkeit von $\pm 10\%$ unter der Voraussetzung eines ungestörten Strömungsprofils.

Die Anzahl der geforderten Messpunkte ist erfüllt, wenn man eine Messunsicherheit von 10 % und einen Messgerätefehler von 5 % zugrunde legt (siehe DIN EN 12599, Tabelle E1).

Beispiel Luftmengenmessung (Netzmessung)

Messung in m/s (72 Messwerte)

Position [mm]	96	288	479	671	863	1054	1246	1438	1629	1821	2013	2204
92	5,35	5,40	5,30	5,30	5,40	5,55	5,50	5,15	5,05	5,15	5,40	5,25
275	5,40	5,05	4,95	4,90	5,10	5,30	5,20	4,85	4,65	4,80	5,20	5,45
458	4,90	4,45	4,25	4,35	4,60	4,95	4,80	4,75	4,30	4,35	4,55	4,90
642	4,60	4,20	4,10	4,20	4,45	4,75	4,70	4,35	4,05	4,20	4,25	4,45
825	4,05	4,15	3,95	4,05	4,20	4,40	4,45	4,45	4,15	4,05	4,10	4,15
1008	3,40	3,75	3,85	3,95	4,05	4,20	4,30	4,15	4,05	3,85	3,90	3,40

Beispiel Luftmengenmessung (Netzmessung)

Messung in m/s (72 Messwerte)

Quadrant 1	Mittel [m/s]* 5,15	Quadrant 3	Mittel [m/s]* 5,09
Quadrant 2	Mittel [m/s]* 4,23	Quadrant 4	Mittel [m/s]* 4,27

Gesamtmittelwert: 4,69 m/s

Die **Quadrantenmittelwerte** aus der Tabelle wurden noch mit einem Korrekturfaktor für das Hitzdrahtanemometer von 1,03 multipliziert.

Beispiel Luftmengenmessung (Netzmessung)

Der Wert für die Unregelmäßigkeit des Profils U gemäß DIN 12599 wird durch die mittlere Geschwindigkeit in den Quadranten angegeben, siehe Tabelle 3.

Unregelmäßigkeit des Profils:
$$U = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2\bar{v}}$$

Damit erhält man für diesen Fall einen Faktor von $U = 9,81\%$. Daraus ergibt sich nach Tabelle E.7 der DIN 12599 eine Unsicherheit von $u_{\text{Profil}} \sim 3\%$.

Tabelle E.4 — Unsicherheit der Messung bei einer Strömung mit einer radialen Bewegung von annähernd null in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte

Anzahl der Messpunkte	Unsicherheit des Messortes τ_u %					
	Unregelmäßigkeit des Profils U %					
	2	10	20	30	40	50
4	6	12	20	28	36	42
5	5	11	17	24	31	36
6	5	10	15	21	27	32
8	4	8	13	18	23	27
10	3	7	12	16	20	24
20	2	5	8	11	14	16
30	2	4	7	9	11	14
50	1	3	5	7	8	10
100	1	2	3	5	6	7
200	1	1	2	3	4	5

Beispiel Luftmengenmessung (Netzmessung)

Durch die Fehler des Messgeräts von 1,2% und der Ablesefehler 0,6%, der zufälligen Schwankungen bei der Messung 1,1%, der Dichtebestimmung 1% ergibt sich für die Messwerte ein Gesamtfehler von:

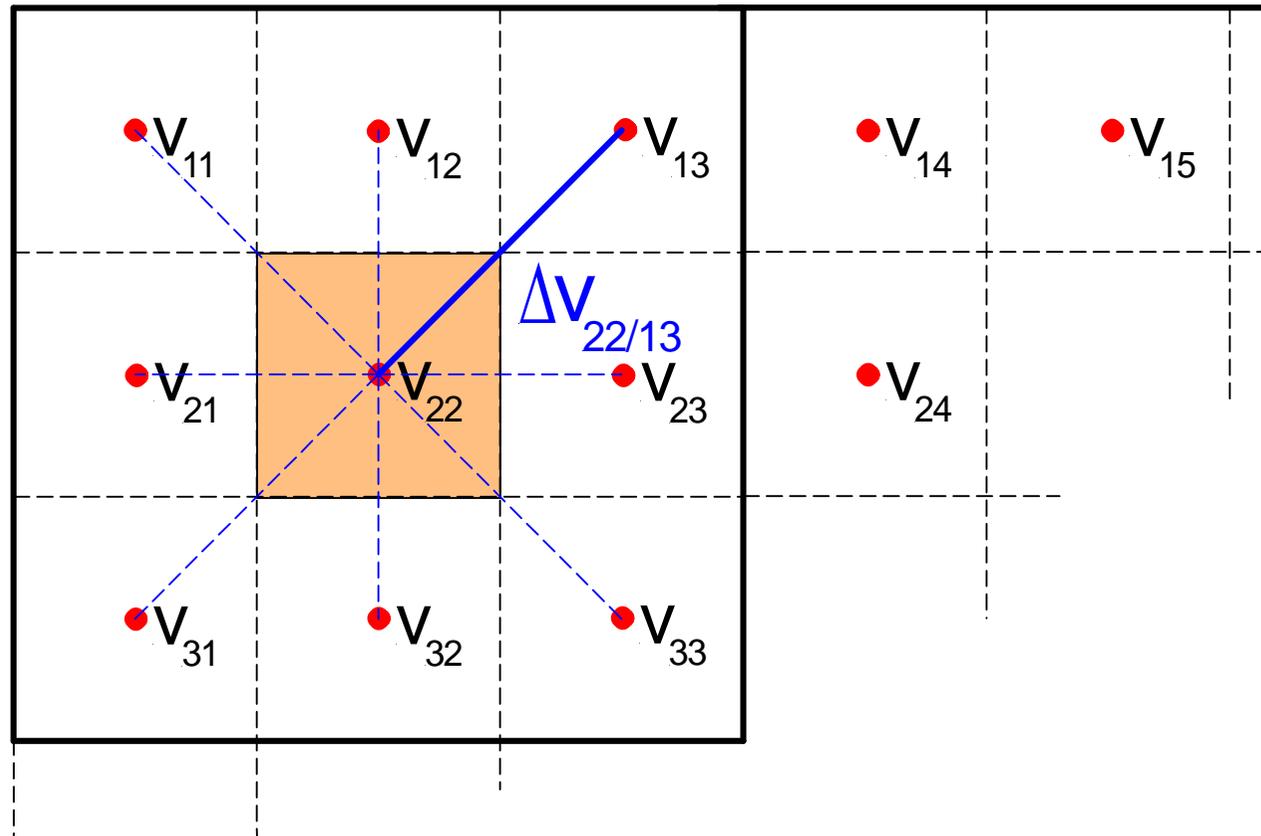
$$U_{\text{Gesamt}} = \sqrt{3^2 + 1,2^2 + 0,6^2 + 1,1^2 + 1,0^2} = 3,6\%$$

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)

Die Ortsunsicherheit der Geschwindigkeit, welche den größten Beitrag der gesamten Unsicherheit des Verfahrens liefert, wird durch die Veränderung zu seinen **nächsten Nachbarn** sowohl in der **x-Richtung** als auch in der **y-Richtung** bestimmt und damit messbar. Im folgenden Bild sieht man einen Ausschnitt eines Rechteckkanals als Skizze mit den zugehörigen Messpunkten für die Geschwindigkeiten.

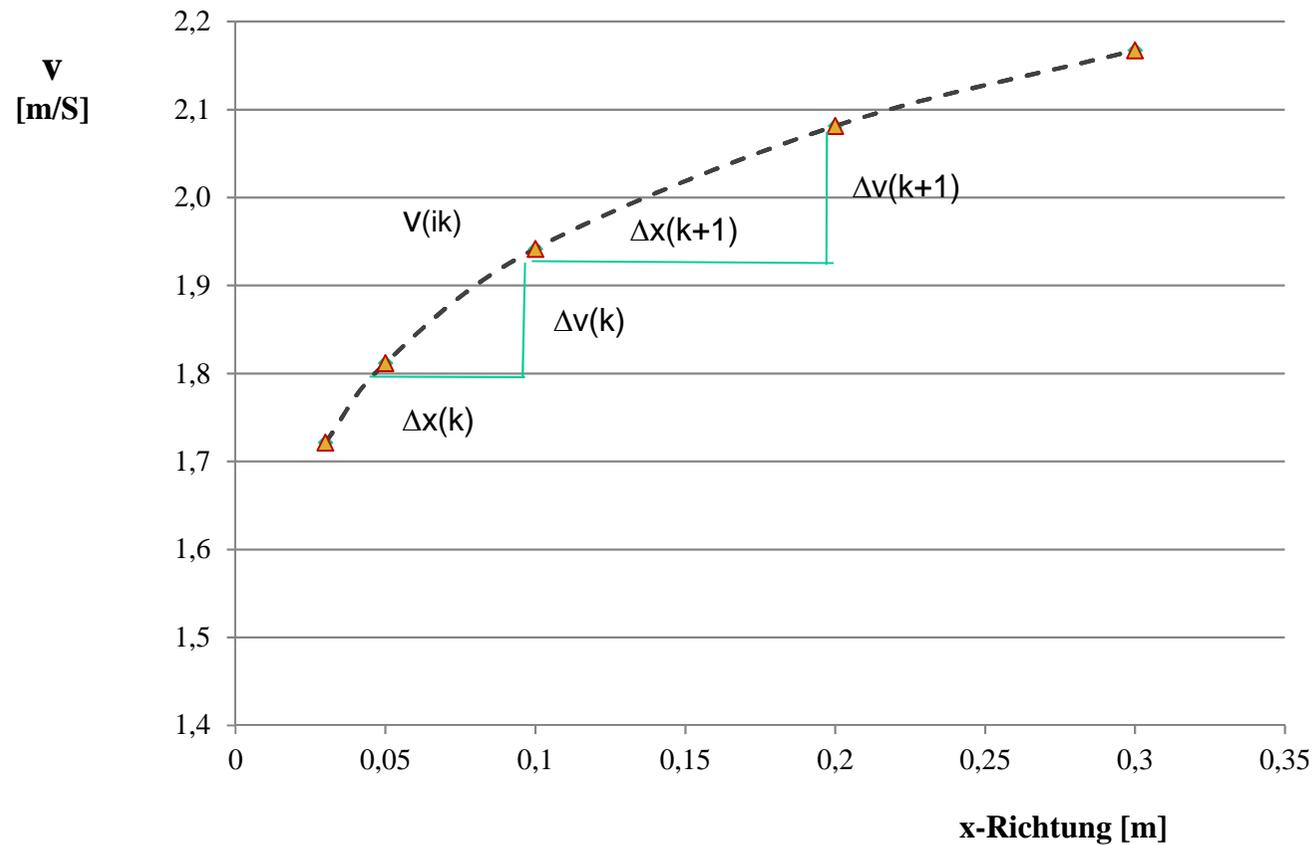
Wenn man das Bild betrachtet, so wird klar, was unter dem Konzept der nächsten Nachbarn verstanden werden soll. Nimmt man dazu die zentrale Geschwindigkeit v_{22} und betrachten jeweils die einzelnen Differenzen. Zu den **acht Nachbarn** lassen sich jeweils die **Geschwindigkeitsdifferenzen**, hier exemplarisch durch Δv_{13} dargestellt, bilden und auf den Mittelwert aller neuen beteiligten Geschwindigkeiten beziehen.

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)



Prof. Dr. Gerke FH Köln

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)



Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)

Zur Bestimmung der Unsicherheit des Messortes benutzt man die allgemeine Definition für die Fehlerfortpflanzung. Das bedeutet jede einzelne Abweichung Δv trägt mit ihrem Quadrat zur Unsicherheit bei.

Mit der bereits festgelegten Bezeichnung erhält man:

$$u_{v(ik)} = \pm \frac{1}{n-1} \sqrt{\left(\frac{\Delta v_{22/11}}{\sqrt{2} \bar{v}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v_{22/12}}{\bar{v}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta v_{22/33}}{\sqrt{2} \bar{v}}\right)^2}$$

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)

Da die Abstände durch die Messsystematik klar festliegen, müssen sie nicht weiter berücksichtigt werden. Allerdings werden alle diagonalen Geschwindigkeitswerte aufgrund ihrer größeren Entfernung mit dem Faktor 0,707 beaufschlagt. Dies entspricht ihrer **geometrischen Lage**. Da wir im Allgemeinen eine relative Größe bevorzugen, müssen wir auf einen mittlere Geschwindigkeit normieren. Dazu bietet sich die mittlere Geschwindigkeit der betrachteten Gruppe an:

$$\bar{v} = \sum_{i,k=i-1,k-1(i \neq k)}^{i+1,k+1} v_{ik} + \sum_{i,k=i-1,k-1(i=k)}^{i+1,k+1} v_{ik}$$

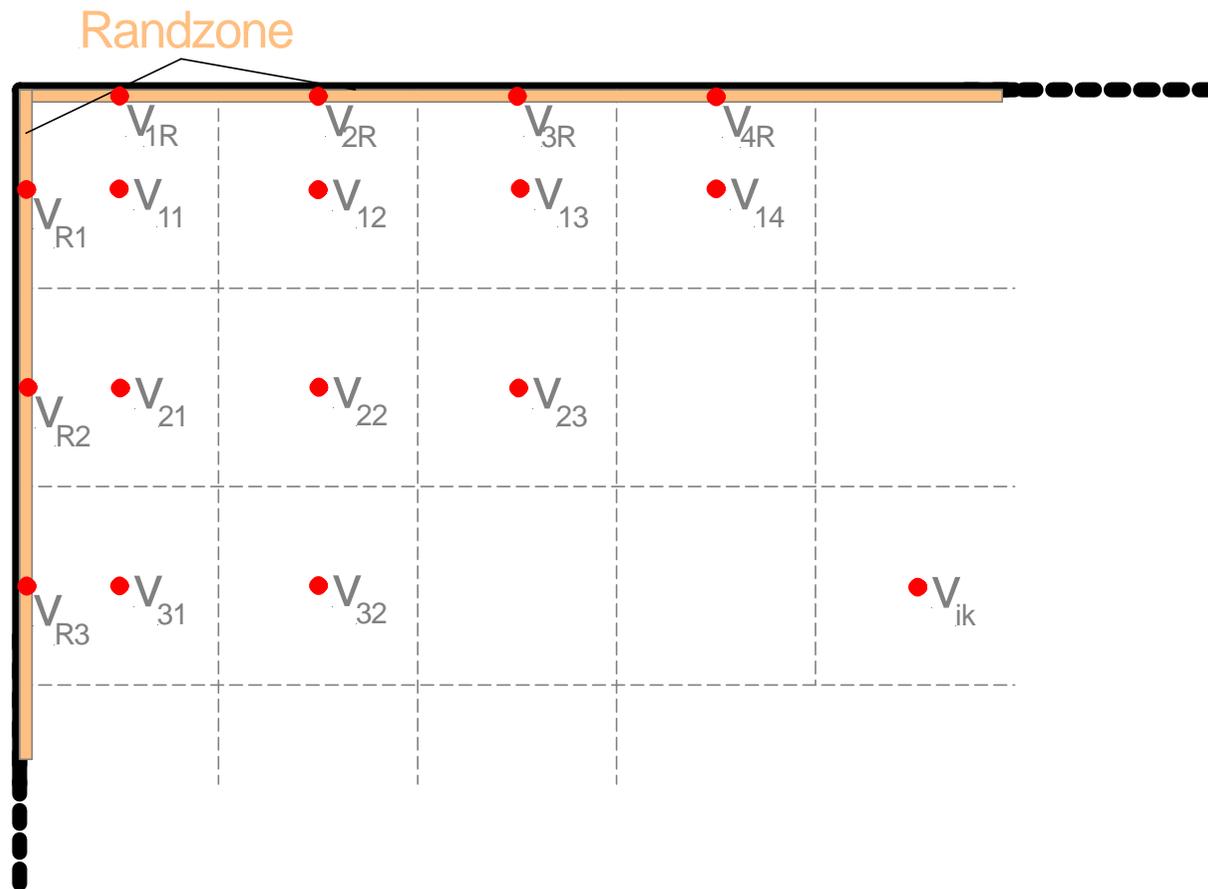
Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)

Durch die Bildung der mittleren Geschwindigkeit mit Hilfe der nächsten Nachbarn, können die Abweichungen unmittelbar zur **Ortsunsicherheit** beitragen.

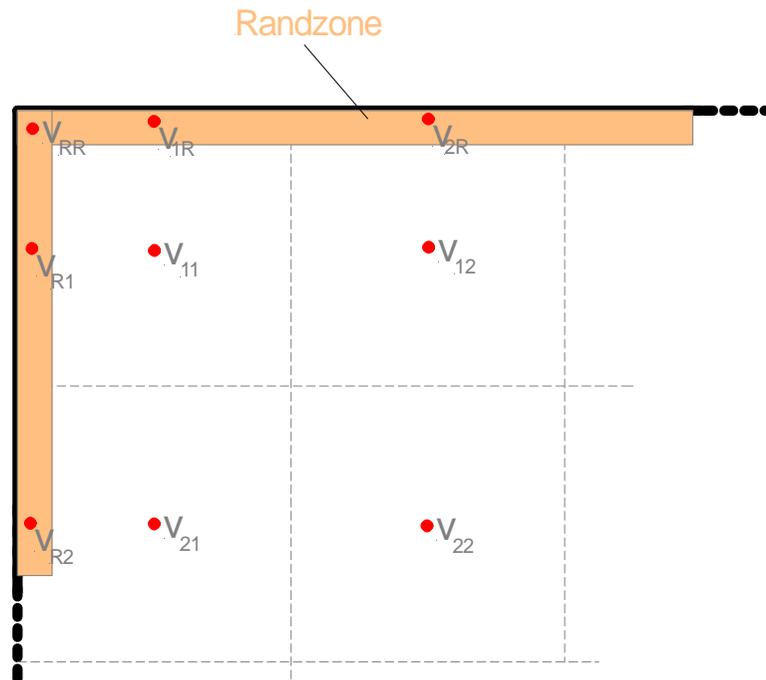
Damit die Randzonen nicht eine zu große Abweichung verursachen, wird am Rand eine weitere Geschwindigkeit gemessen und zwar zum Beispiel v_{iR} . Diese bezeichnen wir als Randgeschwindigkeit. Die Messung erfolgt auf einem Zehntel des ursprünglichen Abstands zum ersten Messpunkt vom Kanalrand aus betrachtet. In der Regel sind hier 10 mm gut realisierbar.

Diese **Randgeschwindigkeit** wird nicht zur Berechnung des Volumenstroms genutzt, sondern nur zur Berechnung der Ortsunsicherheit des ersten Messpunktes in x- oder y-Richtung.

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)



Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)



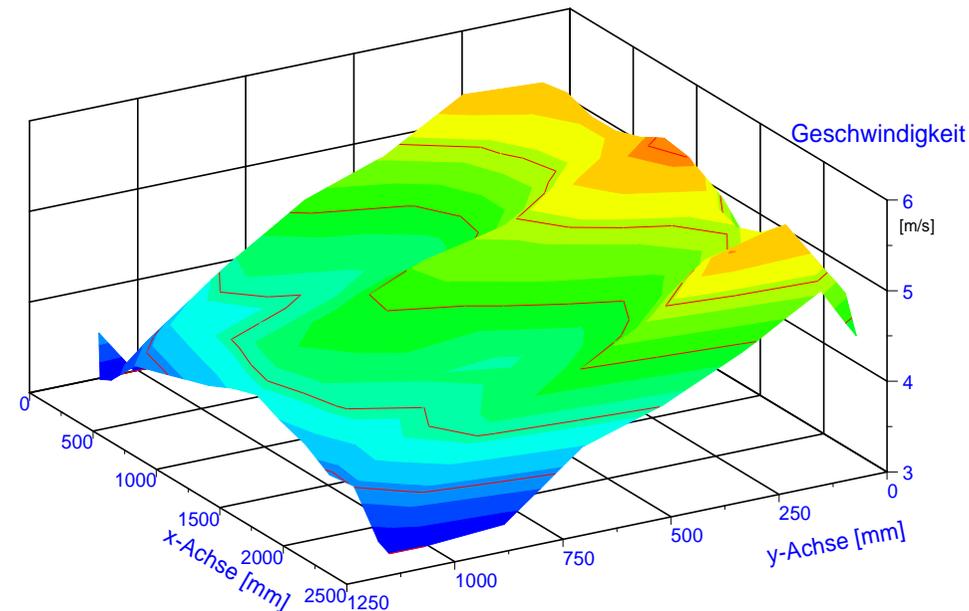
$$u_{v(11)} = \pm \frac{1}{n-1} \sqrt{\left(\frac{\Delta v_{11/R1}}{\sqrt{2} \bar{v}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v_{11/R2}}{\bar{v}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta v_{11/22}}{\sqrt{2} \bar{v}}\right)^2}$$

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)

Messung in m/s (72 Messwerte)

Position [mm]	96	288	479	671	863	1054	1246	1438	1629	1821	2013	2204
92	5,35	5,40	5,30	5,30	5,40	5,55	5,50	5,15	5,05	5,15	5,40	5,25
275	5,40	5,05	4,95	4,90	5,10	5,30	5,20	4,85	4,65	4,80	5,20	5,45
458	4,90	4,45	4,25	4,35	4,60	4,95	4,80	4,75	4,30	4,35	4,55	4,90
642	4,60	4,20	4,10	4,20	4,45	4,75	4,70	4,35	4,05	4,20	4,25	4,45
825	4,05	4,15	3,95	4,05	4,20	4,40	4,45	4,45	4,15	4,05	4,10	4,15
1008	3,40	3,75	3,85	3,95	4,05	4,20	4,30	4,15	4,05	3,85	3,90	3,40

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)



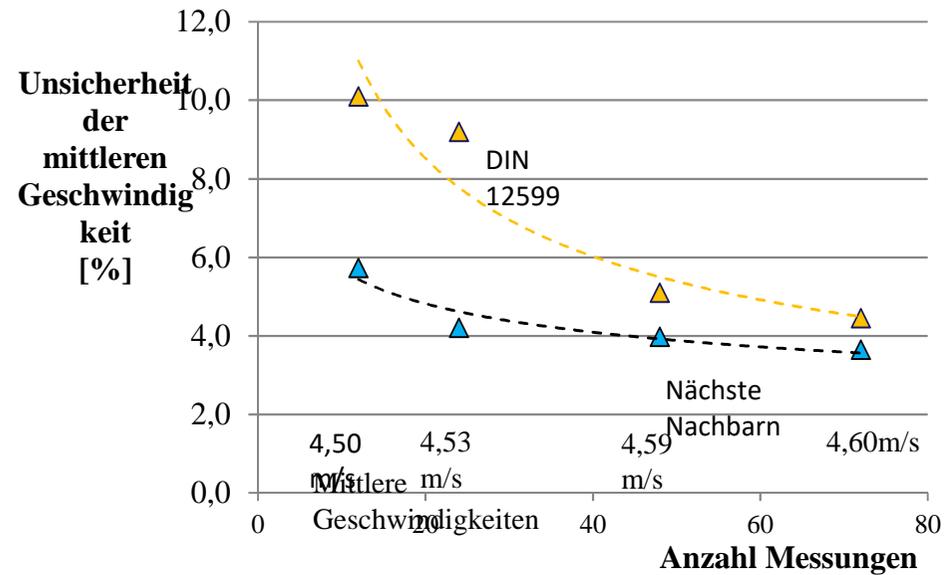
Position [mm]	20	95,8	287,5	479,2	670,8	862,5	1054,2
20	4,83	5,08	5,13	5,04	5,04	5,13	5,27
91,7	5,08	5,35	5,40	5,30	5,30	5,40	5,55
275,0	5,13	5,40	5,05	4,95	4,90	5,10	5,30
458,3	4,66	4,90	4,45	4,25	4,35	4,60	4,95

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)

Messunsicherheiten

Unsicherheiten der Geschwindigkeit bezogen auf den nächsten Nachbarn [%]											
3,65	2,93	2,70	2,69	2,77	3,02	3,47	2,77	2,56	2,84	3,33	3,71
4,23	3,07	3,31	3,13	2,82	2,45	2,26	2,55	2,60	2,99	3,15	5,63
3,73	3,79	3,63	3,29	2,99	2,18	2,11	2,88	2,73	3,04	3,58	5,33
4,13	2,57	1,51	1,76	2,32	2,25	1,83	2,33	2,75	1,38	2,32	5,39
4,69	3,22	1,54	1,58	2,12	1,93	1,67	2,30	1,49	1,20	2,63	7,01
4,77	3,66	2,63	2,51	2,61	2,66	2,83	2,68	2,91	2,45	4,09	6,16

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)



Messstellenzahl	Mittlere Geschwind.	Messunsicherheit Nächste Nachbar [%]	Messunsicherheit DIN12599 [%]
72	4,60	3,65	4,46
48	4,59	3,98	5,10
24	4,53	4,21	9,20
12	4,50	5,73	10,10

Beispiel Luftmengenmessung (Konzept nächster Nachbar)

Mit dieser Methode kennt man die Ortsunsicherheit der Geschwindigkeit für jeden Messpunkt. Aus der Fehlerfortpflanzung ergibt sich ein Wert für die Gesamt-Ortsunsicherheit von **2,997 %**.

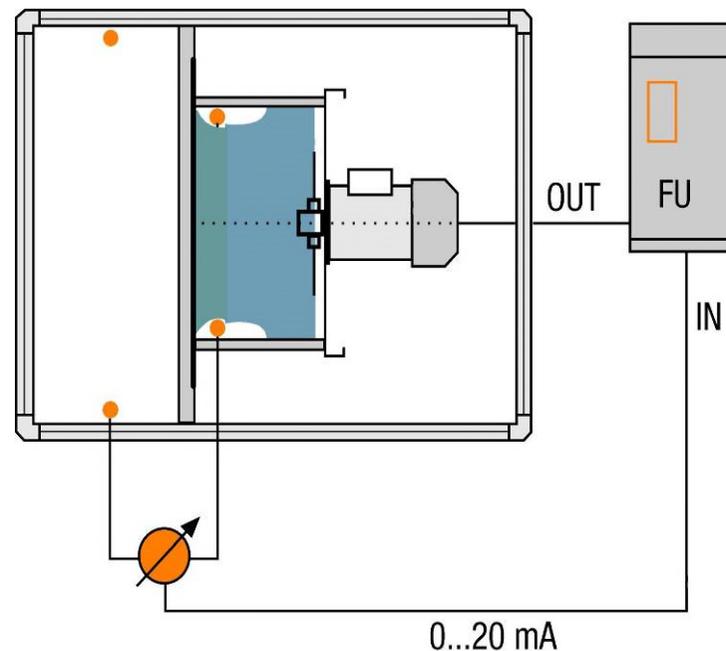
Setzt man die Unsicherheit in die Gesamtunsicherheit (also mit Messgerätefehler etc.) ein, so erhält man Unsicherheit von:

$$u_{\text{Ges.}} = 3,60 \%$$

$$u_{\text{Gesamt}} = \sqrt{3^2 + 1,2^2 + 0,6^2 + 1,1^2 + 1,0^2} = 3,6\%$$

Beispiel Luftmengenmessung (Einlaufdüse)

Die Volumenstrommessung in Anlagen wird heute häufig mit Hilfe einer Düse durchgeführt. Dazu ist es notwendig den **Durchflusskoeffizienten** der Düse zu kennen. Die Messung erfolgt indirekt über die **Wirkdruckmessung** in der **Einlaufdüse** des Ventilators.



Beispiel Luftmengenmessung (Einlaufdüse)

Die Volumenstrommessung erfolgt nach der
Durchflussgleichung:

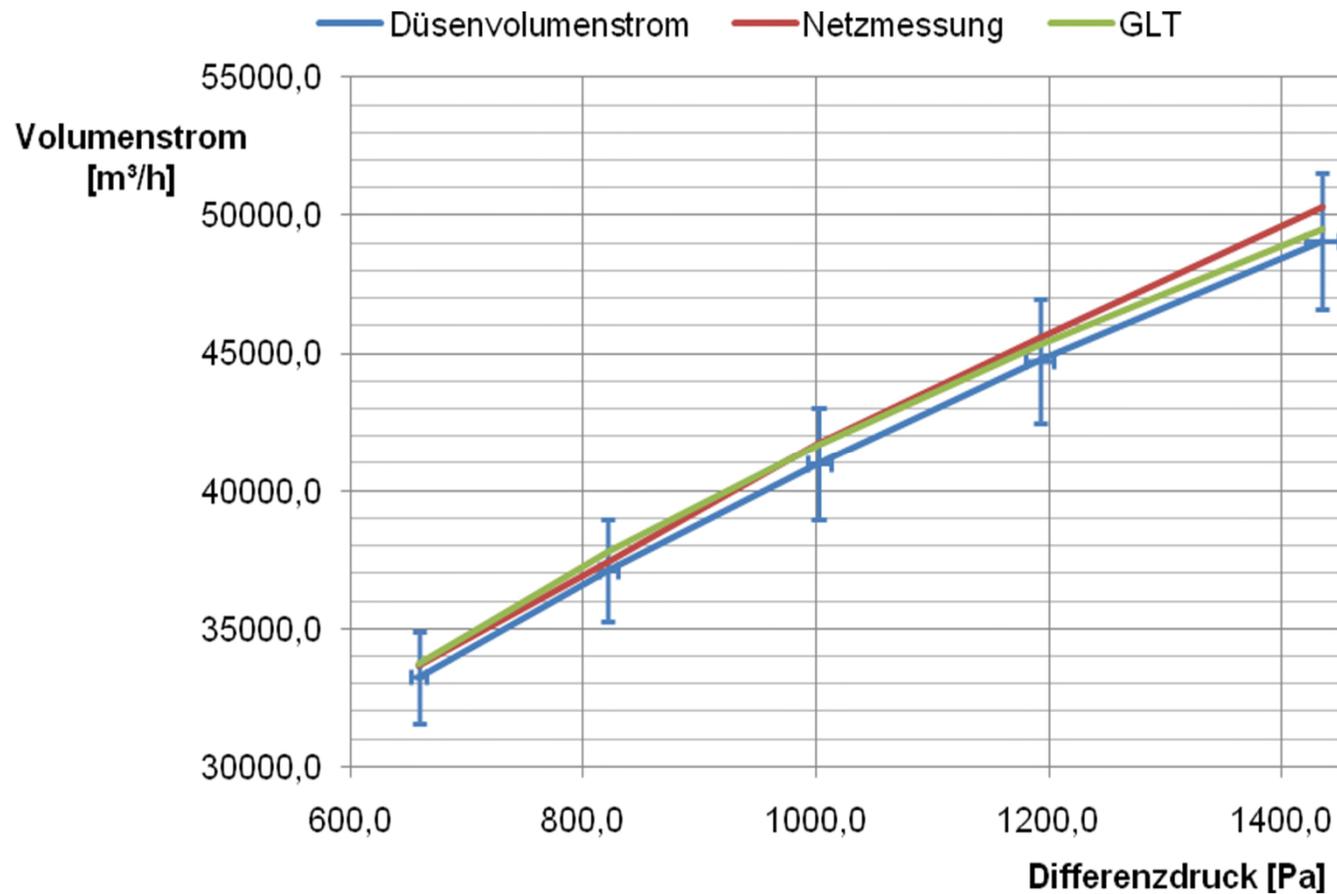
$$\dot{V} = \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \pi / 4 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p / \rho}$$

wobei:

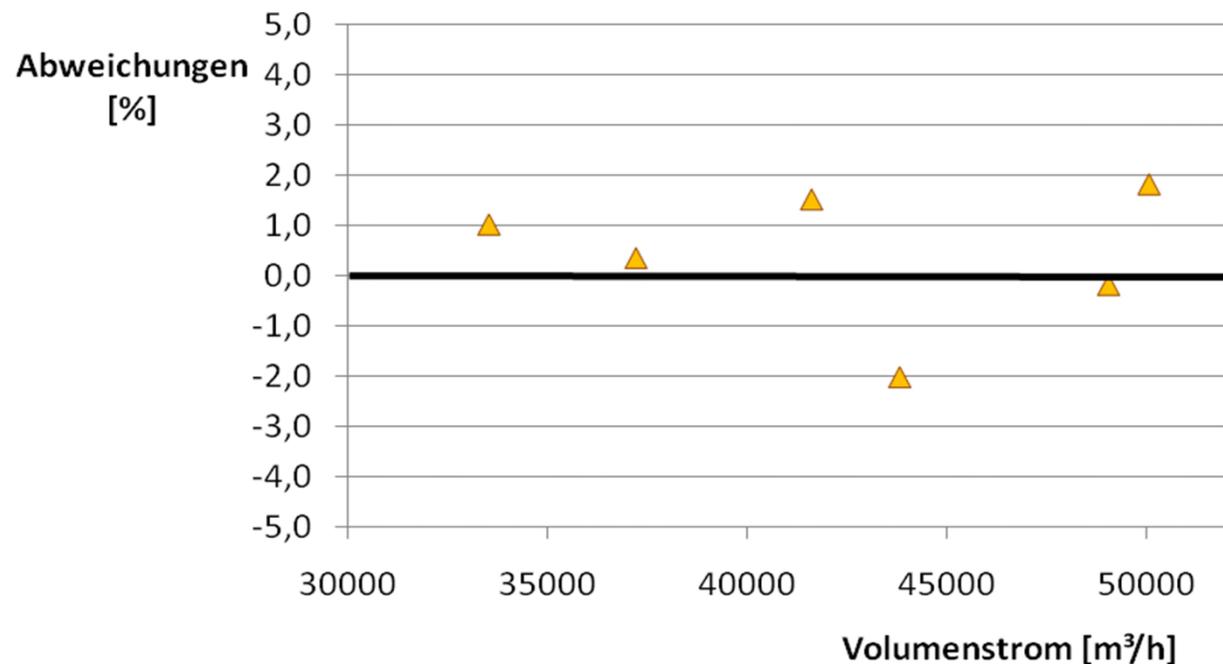
- α Durchflusskoeffizient
- ε Kompressionszahl ($\varepsilon = 1$ bei < 2.000 Pa)
- d Durchmesser der Düse (engster Querschnitt) in m
- Δp Differenzdruck zwischen Saugraum und Düse in Pa

Dies Messgenauigkeit dieses Verfahrens liegt bei $< 2 \%$

Beispiel Luftmengenmessung (Vergleich Netzmessung - Einlaufdüse)



Beispiel Luftmengenmessung (Vergleich Netzmessung - Einlaufdüse)

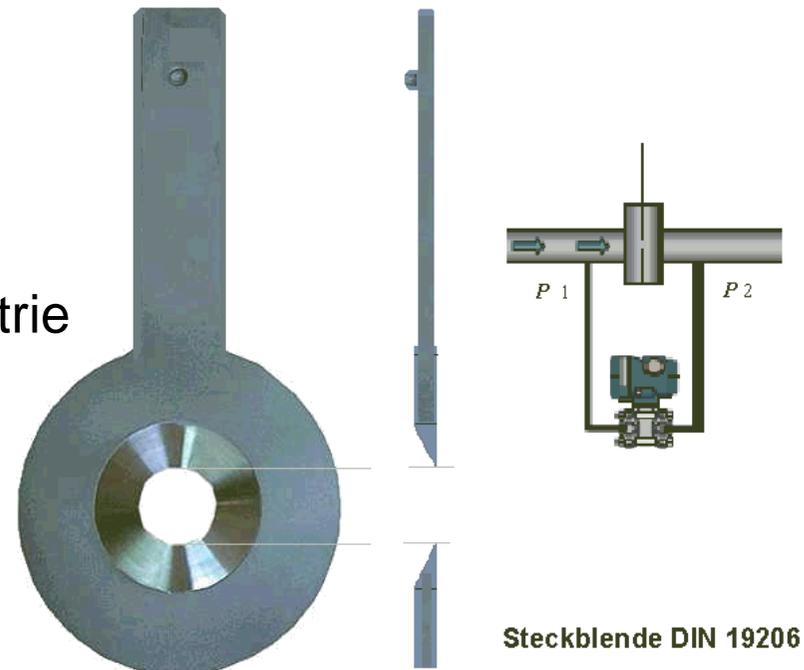


Die Abweichungen zwischen der Netzmessung und der Düsenmessung sind gering. Innerhalb der Unsicherheit auch der Netzmessungen erkennt man die Verlässlichkeit der Volumenstrommessung mittels Düse.

Möglichkeiten der Luftgeschwindigkeitsmessung

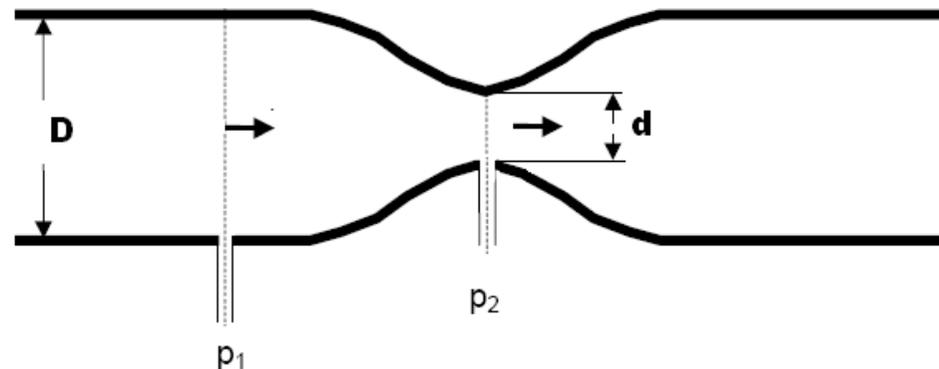
Die Messung der Luftgeschwindigkeit erfolgt nicht direkt, sondern indirekt über andere messbare Größen, wie Druck, Spannung, Wärmefluß, etc.)

- Drosselgeräte
- Staurohre
- Flügelradanemometer
- Hitzdrahtanemometer
- Laser / Doppler – Anemometrie
(für z. B. Raumströmung)



Drosselgeräte

Geräte die in Rohrleitungen fest eingebaut werden und der Durchflussmessung von Fluiden dienen.



Blenden

Dünne Scheiben mit kreisförmiger Öffnung, scharfer rechteckiger Einlaufkante und geringer Dicke im Verhältnis zum Rohrdurchmesser. **Sprunghafte Querschnittsverringering** des Kanals oder Rohres. **Umwandlung** des **statischen Druckes** in **dynamischen Druck**. Der Druckabfall ist damit ein Maß für die Durchflussmenge. Geringer Fehler und sehr genau ($< 2 \%$).

Drosselgeräte

Düsen (Norm / Venturidüse)

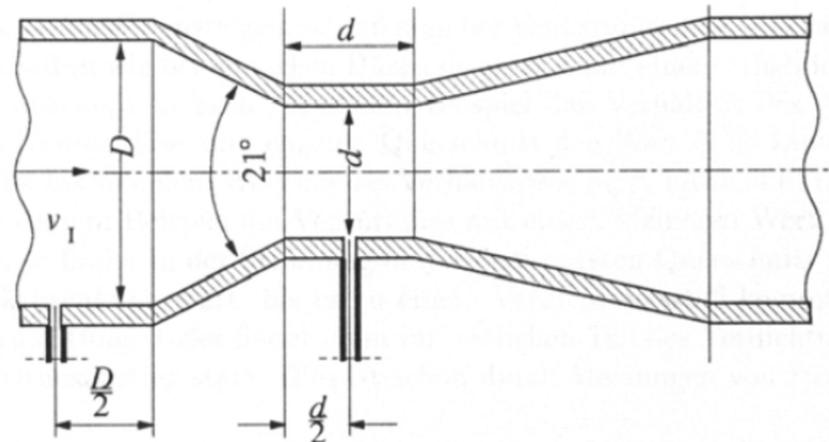
Funktion wie Blenden, Querschnitt mit einem sich verengenden Einlaufteil und gerundetem Profil, einem zylindrischen Teil und einem Diffusor als Auslaufteil.

Der **bleibende Druckverlust** ist ca. 80 % geringer.

Geringer Fehler und sehr genau ($< 2 \%$).

Weitere Bauformen sind:

- Viertelkreisblenden
- Einlaufdüsen, etc.



Staurohre

Prandtl-Staurohr

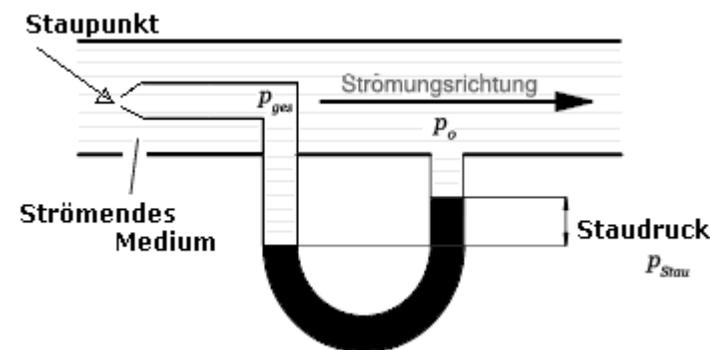
Statisches Messverfahren 90° Winkel-Rohr mit 2 Messöffnungen

Die **erste Öffnung** an der Rohrspitze ist der Strömung entgegengerichtet und misst den **Gesamtdruck**.

Die **zweite Messöffnung** in Form eines Schlitzes senkrecht zur Strömung misst den **statischen Druck**.

Der **dynamische Druck**, oder auch **Staudruck** ist die **Differenz** der beiden Drücke

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$



Grenzen: kleine Staudrücke sind kaum noch zu erfassen

Flügelradanemometer

Dynamisches Messverfahren

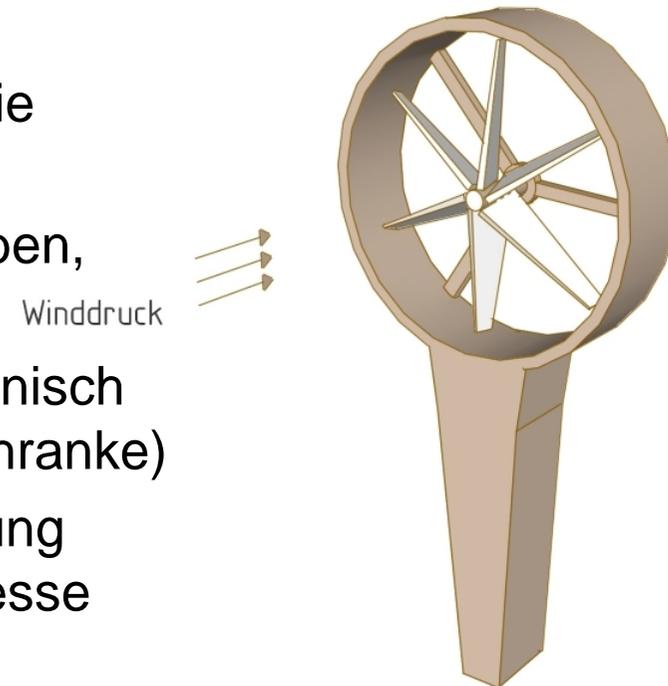
Messung der Geschwindigkeit über die
Drehzahl des Rades.

Das Rad wird durch die Luft angetrieben,
die es durchströmt.

Die Drehzahl des Flügels wird elektronisch
abgetastet (z. B. mittels einer Lichtschranke)

Die kinetische Energie der Luftströmung
muss ausreichen, die Trägheit der Messe
des Flügel-rades zu überwinden.

Das Verfahren ist deshalb bedingt für kleine
Geschwindigkeiten geeignet ($< 1 \text{ m/s}$).



Hitzdrahtanemometer (Thermosonden)

Wirkprinzip: Der **Wärmefluss eines Körpers** ist durch die Geschwindigkeit eines vorbeiströmenden Fluids (höherer und niedriger Temperatur) beeinflussbar.

Konstantstrom-Methode

Ein **beheizter Draht mit konstant gehaltenem Strom** wird in eine **kühlere Luftströmung** gehalten.

Damit wird ein **Wärmestrom vom Draht zur Luft** erzeugt.

Mit der **Abkühlung ändert** sich der **Widerstand** und damit die **Spannung** im Draht.

Die **Spannungsänderung** wird als **Maß für die Geschwindigkeit** erfasst.

Hitzdrahtanemometer (Thermosonden)

Konstant-Temperatur-Methode

Ein **beheizter Draht** mit **konstant gehaltener Temperatur** in eine Luftströmung gehalten.

Der **Heizstrom** stellt ein **Maß für die Geschwindigkeit** dar.

Die Sensortemperatur liegt dabei 10 bis 70 K über der Raumtemperatur.

Thermische Anemometer weisen eine hohe Messgenauigkeit auf und sind für die Untersuchung von Strömungsfeldern geeignet.

Sie messen die ungerichtete Strömung (richtungsunabhängig).



Grundsätzliche Möglichkeiten

Grundsätzlich finden die beschriebenen **Drosseln** (Blenden, Düsen, Venturirohre, etc.) und die thermischen Verfahren ebenfalls auch bei der Durchflussmessung von **flüssigen Medien** Verwendung.

Auch Staurohre können für flüssige Medien eingesetzt werden.

Daneben werden

- Volumenzählung,
- Ultraschall-Durchflussmessung,
- Schwebekörper-Durchflussmessung,
- induktive Durchflussmessung und weitere
- Sonderverfahren (Wirbel-Durchflussmessung, etc.) verwendet.

Volumenzählung

Volumenzähler können in zwei unterschiedliche Klassen eingeteilt werden: die **unmittelbaren** und die **mittelbaren** Volumenzähler.

Bei den **unmittelbaren** Volumenzählern werden Teilmengen des Messguts jeweils abgetrennt und entsprechend dem durchlaufenden Kammerinhalt fortlaufend addiert und als durchtransportiertes Volumen angezeigt. Jeder Hub oder jede Umdrehung des Messelements entspricht dabei einem geometrisch genau definierten Volumen des zu messenden Mediums.

Bei **mittelbaren** Volumenzähler versetzt die zu messende Strömung ein mit Schaufeln besetztes Laufrad in Rotation.

Die **Zahl der Laufradumdrehungen n** muss dem **durchfließenden Volumen V proportional** sein:

$$n = k \cdot V$$

Volumenzählung

Die Strömung in Rohren hängt unter anderem vom Rohrdurchmesser, der Geschwindigkeit und anderen Eigenschaften des strömenden Mediums ab. Man kann diese Parameter zu einer Größe, der **Reynoldszahl Re** , zusammenfassen.

Die Reynoldszahl Re ist bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen proportional zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit v , so dass sie als Maß für die Geschwindigkeit einer Strömung verwendet werden kann.

Turbinenradzähler

Bei diesem Zähler liegt die Achse des Laufrads parallel zur Rohrachse. Das zu messende Medium durchströmt zunächst einen eingebauten **Strömungsgleichrichter**, der eventuelle Turbulenzen beruhigt. Dann trifft das Medium auf die Schaufeln des **Turbinenrads** und versetzt es in Rotation. Eine Spule mit magnetisiertem Kern außerhalb des Rohres dient als Sensor.

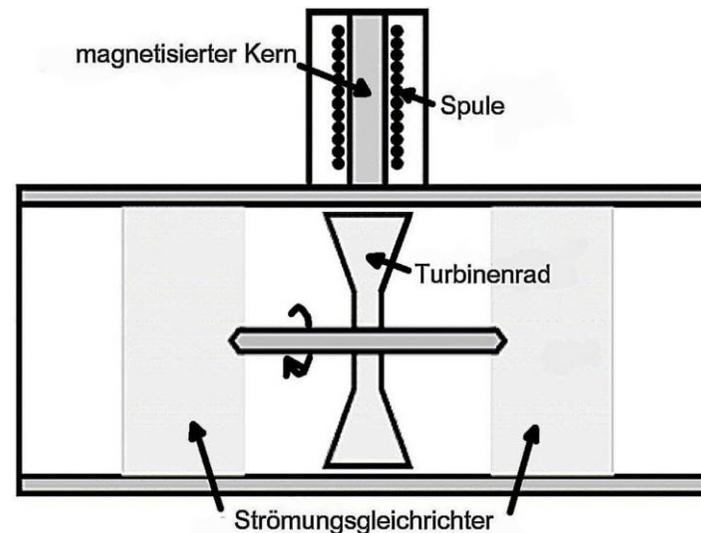
Die Frequenz der Spannungsänderung ist streng proportional zur Rotationszahl des Laufrads und stellt somit ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit durch das Turbinenrad dar.

Turbinenradzähler zeichnen sich durch **kleine Abmessungen** und **hohe Messgenauigkeit** aus.

Problematisch ist die Verwendung eines Turbinenradzählers nur bei **kleinen Durchflüssen**, da dann die **Reibung der Lager** immer größeren Einfluss gewinnt und es somit zu deutlichen Mindermessungen kommen kann.

Turbinenradzähler

Sie sind aufgrund des relativ großen freien Querschnitts **gegenüber Schwebeteilchen** im strömenden Medium nur in **geringem Maße empfindlich** und es treten auch bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten nur **geringe Druckverluste** durch Reibung im Turbinenrad auf.



Durch die geringe Trägheit des Laufrads ist sogar die Messung **pulsierender Strömungen möglich**.

Flügelradzähler

Das Flügelrad in diesem Zähler wird **tangential durch die Strömung beaufschlagt** und somit in Rotation versetzt.

Die Umsetzung der Rotation in ein elektronisch auswertbares Signal kann entweder wie beim Turbinenradzähler geschehen oder mit mehreren Dauermagneten, die in einige der Flügelenden eingesetzt werden.

Die Verwendung von Flügelradzählern ist bei **niedrigen Durchflussmengen** genauso **begrenzt** wie bei den Turbinenradzählern. Aufgrund des Aufbaus sind Flügelradzähler empfindlicher gegenüber Schwebeteilchen als Turbinenradzähler, und sie führen außerdem zu einem deutlich **höheren Druckverlust** am Ausgang.

Flügelradzähler

Bei *beiden* Zählern ist die **Messabweichung für nicht ideale Strömungen relativ groß**. Daher empfehlen die Hersteller meist eine **gerade Vorlaufstrecke** ($l > 40d$) vor dem Zähler zur Beruhigung der Strömung vorzusehen. Alternativ kann bei beiden Zählern ein **Strömungsgleichrichter vor dem Zähler** eingesetzt werden, wodurch die Strömung ebenfalls beruhigt und die Messabweichung des Zählers deutlich verkleinert wird.

Bei den *mittelbaren* Volumenzählern gibt es Weiterentwicklungen, bei denen die Energie für den **Antrieb des Zählers** nicht dem bewegten Fluid entzogen, sondern von außen über einen **Motor** zugeführt wird. Die Drehzahl des Motors wird so eingestellt, dass die Druckdifferenz zwischen Einlauf und Auslauf des Volumenzählers zu Null geregelt wird. So lassen sich noch geringere Messabweichungen erreichen.

Ultraschallmessung (Laufzeitverfahren)

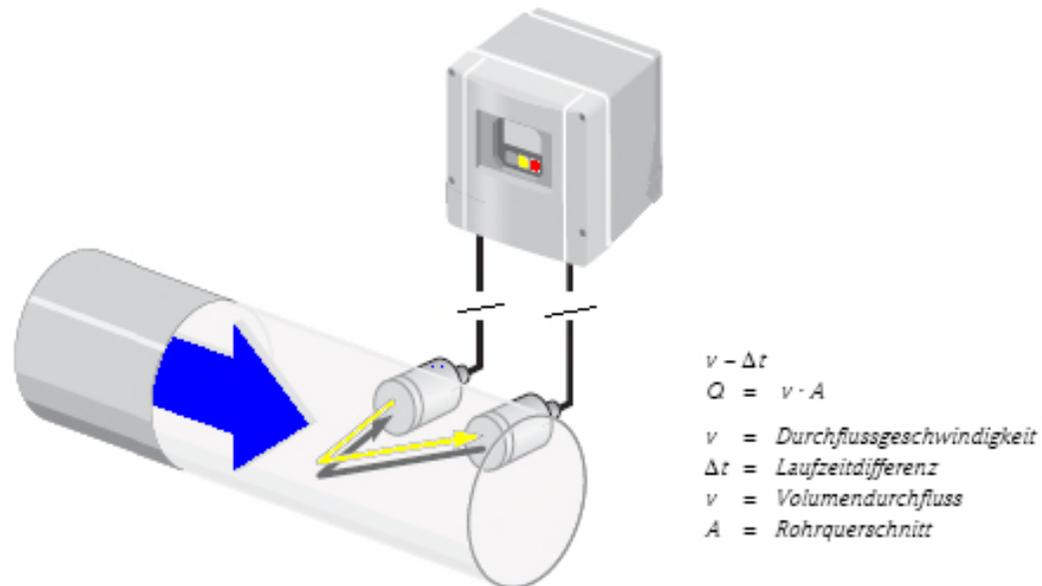
Dieses Verfahren ermittelt die **Laufzeitdifferenz eines Ultraschallsignals zwischen zwei Wandlern**, welche an zwei Stellen entlang der Strömung angeordnet werden. Dies werden so an den Rohrwänden angeordnet, dass der Schallstrahl die Strömung kreuzt. Somit ermittelt man die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in einem Schnitt durch die Strömung (Mittelwert der Strömung im ganzen Querschnitt).

Beide **Wandler** arbeiten **abwechslungsweise als Sender** und **als Empfänger**. Dadurch kann die Laufzeit des Signals mit und gegen die Strömung erfasst werden. Aus der Laufzeitdifferenz kann dann die Strömungsgeschwindigkeit ermittelt werden.

Ultraschallmessung (Laufzeitverfahren)

Ultraschall-Durchflussmesser können **außen (auch nachträglich)** an Rohrleitungen montiert werden. Wichtig ist eine gute **Geometrieanpassung** der Wandler an das Messrohr. Damit die Umrechnung auf den Volumenstrom zulässig ist, muss die **Rohrströmung voll ausgebildet** und **rotationssymmetrisch** sein.

Üblicherweise bedingt dies im Einlauf ein gerades Rohrstück von mindestens $10 \cdot d$.



Magnetisch induktive Durchflussmessung

Für **elektrisch leitende Fluide** (z. B. Wasser) kann die Strömungsgeschwindigkeit durch das Induktionsgesetz bestimmt werden.

Legt man in einem Rohrquerschnitt der durchflossen wird ein **Magnetfeld** an, bildet sich **rechtwinklig dazu** eine **Spannung** im Fluid, die über **Elektroden erfasst** werden kann.

Das **Messrohr** muss **isolierend ausgekleidet** sein. Die entstehenden Spannungen sind sehr klein im Vergleich zu ebenfalls auftretenden elektrochemischen Potentialen, die sich durch die Magnetisierung zwischen Fluid und Elektrode bilden können.

Durch Anlegen von magnetischen Wechselfeldern oder gepulsten Magnetfeldern kann diese Störung kompensiert werden.

Kontakthermometrie

Das Fluid steht im direkten Kontakt mit dem Messgerät.

$$T_{\text{gemessen}} = T_{\text{Medium}} - T_{\text{Übertragungsverluste}} - T_{\text{Auskühlung}}$$

Messgenauigkeit hängt ab von:

- Konstruktion
- Einbau
- Umgebungsverluste
- Ort und Lage

zu berücksichtigen:

- Beruhigungsstrecke
- Temperaturschichtungen

Flüssigkeitsthermometer

Quecksilber- und Ausdehnungsfederthermometer

Quecksilberfüllung

- Erstarrungstemperatur - 38,862 °C
- Siedetemperatur 356,66 °C
- Messbereich: - 35 bis 300 °C mit Gasfüllung bis 500 °C
- Für tiefere Temperaturen wird eine Alkohol- füllu (Toluol, Pentan) verwendet
- Größerer Messfehler: Alkohol benetzt das Glas, schlechte Wärmeleitung



Praxis

- Bourdon-Federthermometer (Ausdehnung erzeugt Druck auf eine Feder)

Gasthermometer

Temperaturfühler nur **zum Teil mit Flüssigkeit gefüllt**

- Verwendung von leicht siedenden Flüssigkeiten (Toluol, Pentan)
- **Dampfdruck** wird mit einem Federthermometer gemessen
- Temperaturänderungen in der **Leitung** müssen nicht berücksichtigt werden (Leitungskompensation)
- Der hydrostatische Druck muss allerdings berücksichtigt werden.

Bimetallthermometer

- Zwei **zusammengewalzte Metallstreifen** mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten

$$l = l_R \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

- Ausdehnung kann durch eine Wicklung als Spirale vergrößert werden
- Geringe thermische Trägheit durch eine große Oberfläche
- Messgenauigkeit 1 % des Skalenumfangs



Widerstandsthermometer

Kaltleiter (PTC)

- Widerstand nimmt mit steigender Temperatur zu
- Metallische Leiter, vorzugsweise Platin mit chemischer Beständigkeit
- Temperaturbeiwert 0,4 bis 0,5 %

Heißleiter (NTC)

- Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab
- Metalloxide, Bariumnitrat
- Temperaturbeiwert -2 bis - 6 %

Widerstandsthermometer

$$a_0 = (R_{100} - R_0) / \Delta t_{R0}$$

R₁₀₀ Widerstand bei 100 °C

R₀ Widerstand bei 0 °C

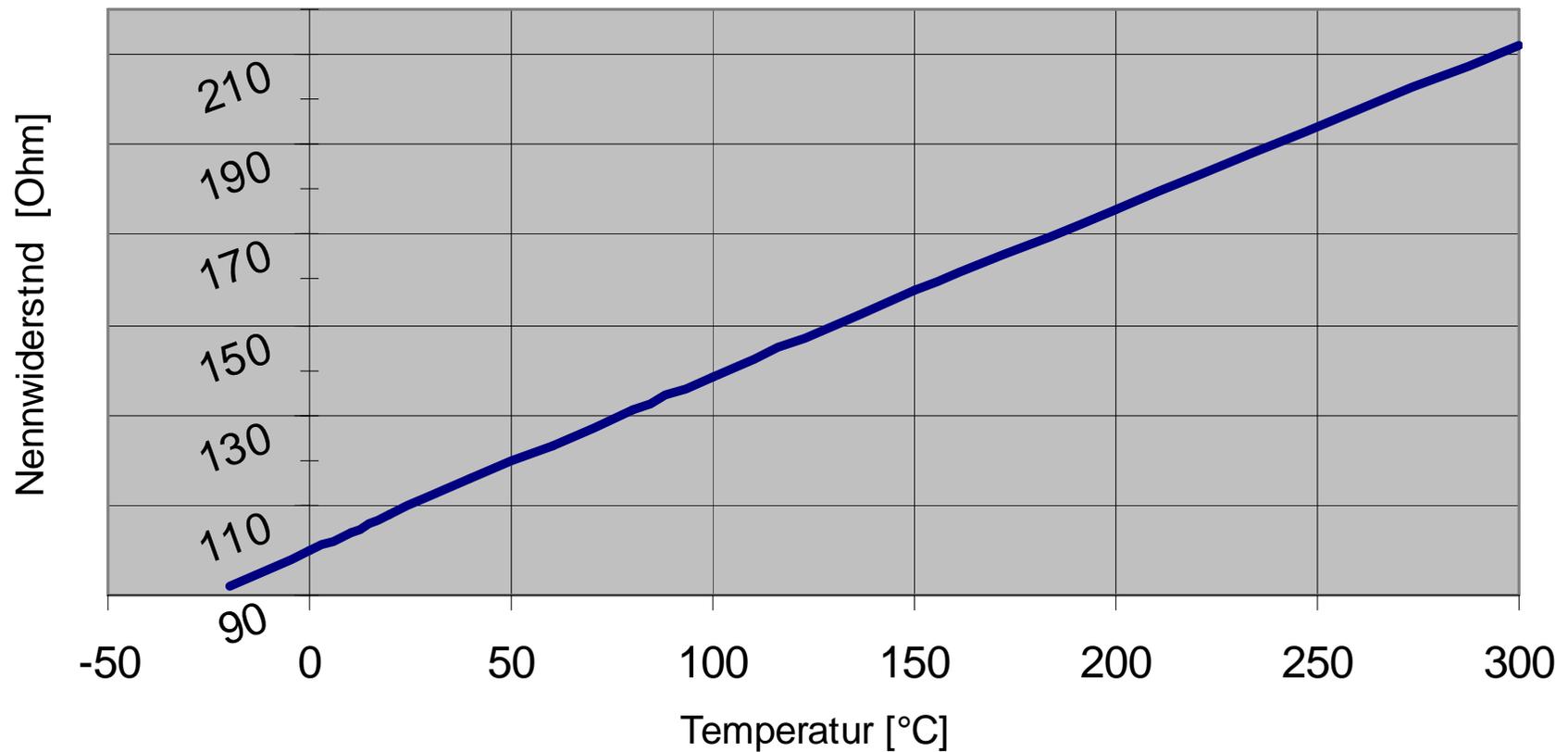
Δt_{R0} Temperaturdifferenz von 100 °C

Widerstandsthermometer

- $U_M = R \cdot I_{\text{konst}}$
- Drahtgewickelte Widerstände
- Metallschichtwiderstände
- Zuleitungen haben einen unbekanntem Widerstand
 - Abgleich auf vorgeschriebenen Normwiderstand mittels Potentiometer

Widerstandsthermometer PT 100

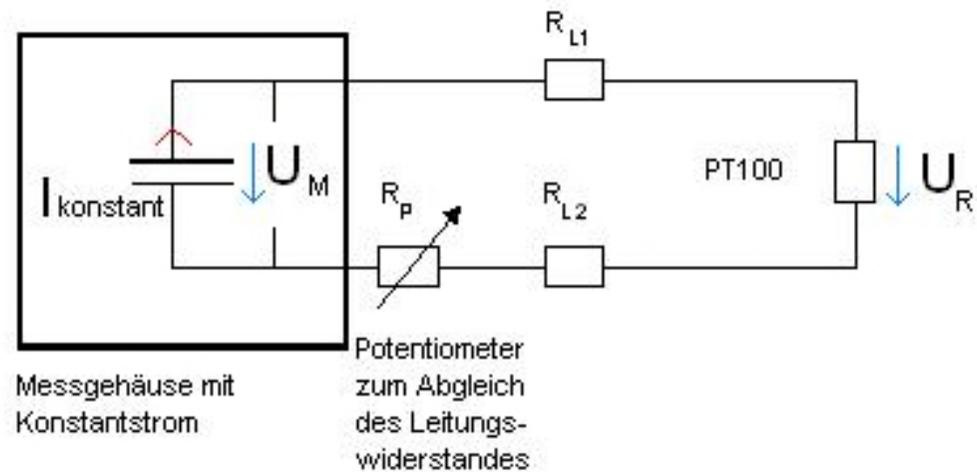
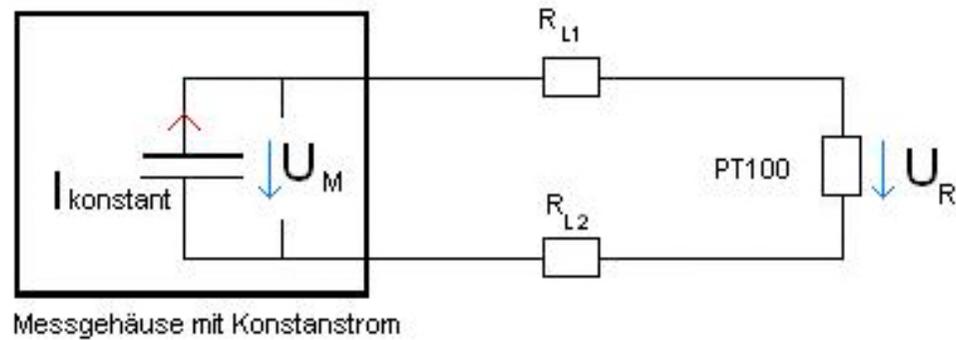
PT 100 Kennlinie



Kennlinie PT100

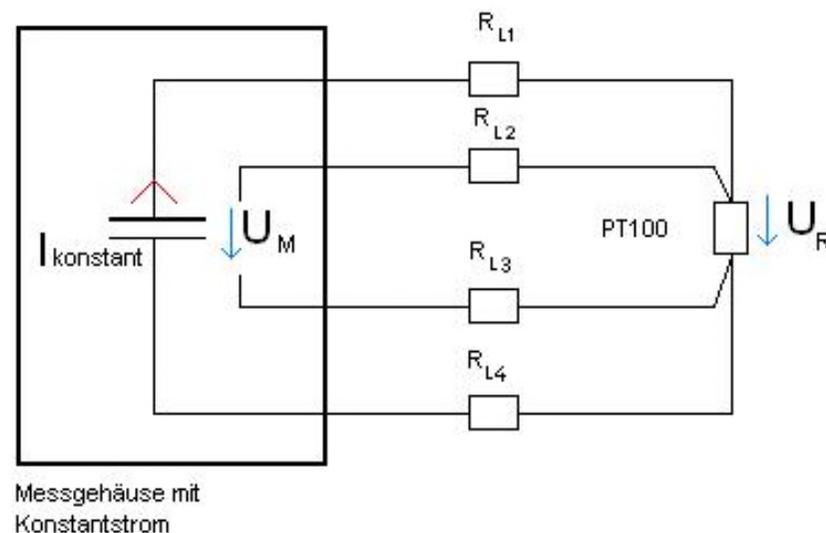
Temperatur [°C]	Nennwiderstand [Ohm]	Fehlergrenze [%]
-20	92,160	± 0,10
0	100,000	± 0,20
10	103,903	± 0,21
20	107,793	± 0,22
40	115,541	± 0,24
60	123,242	± 0,26
80	130,897	± 0,28
100	138,505	± 0,30
150	157,325	± 0,35
200	175,856	± 0,40
300	212,051	± 0,50

PT100 - Zweileiterschaltung



PT100 – Vierleiterschaltung

Man verwendet **zwei zusätzliche Leitungen, Kompensationsleitungen** genannt, vom Spannungsmesser zum PT100. Man erhält also am PT100 im Grunde eine **Parallschaltung** aus PT100 in einem Zweig und im zweiten Zweig eine **Reihenschaltung aus Leitungswiderständen** der Kompensationsleitungen und dem **Innenwiderstand des Spannungsmessers**.



PT100 - Vierleiterschaltung

Der **Konstantstrom** fließt über die aus der Zweileiterschaltung bereits vorhandenen Leitungen (hier nun R_{L1} und R_{L4}) und teilt sich dann direkt am Knotenpunkt des PT100 in die zwei Ströme für die **Parallelschaltung** auf.

Bei einer Parallelschaltung ist die **Spannung** an den Knotenpunkten ihrer Zweige immer **gleich**.

Daher ist die Spannung, welche am PT100 gemessen wird, gleich der Spannung, welche über der **Reihenschaltung** aus **Leitungswiderständen der Kompensationsleitungen** und dem **Innenwiderstand des Spannungsmessers** abfällt.

PT100 - Vierleiterschaltung

Die **Widerstände** der **Kompensationsleitungen** sind **irrelevant klein**, die Spannungsabfälle der Verbindungsleitungen verfälschen das Messergebnis somit fast nicht.

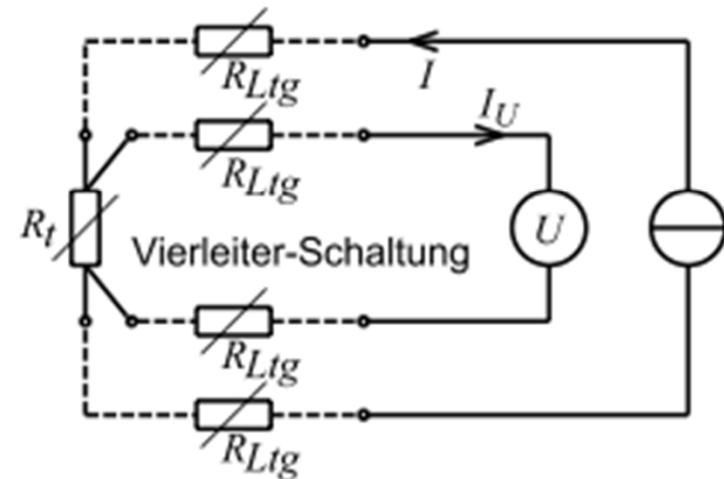
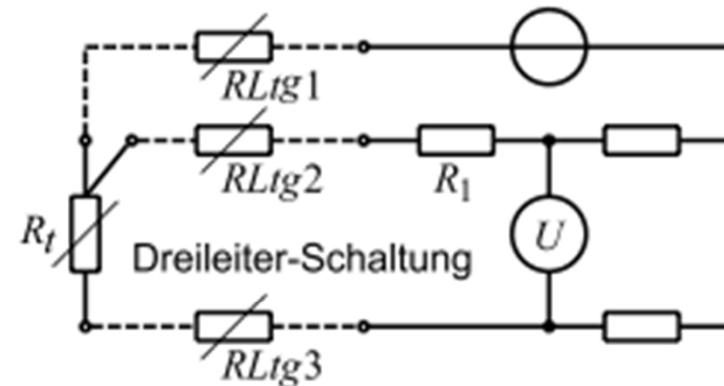
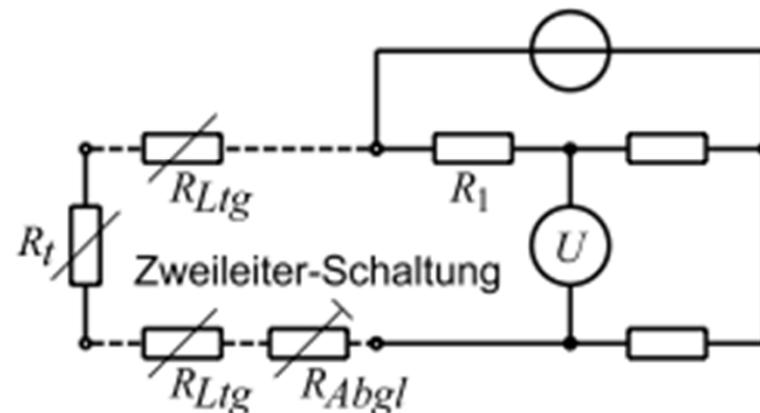
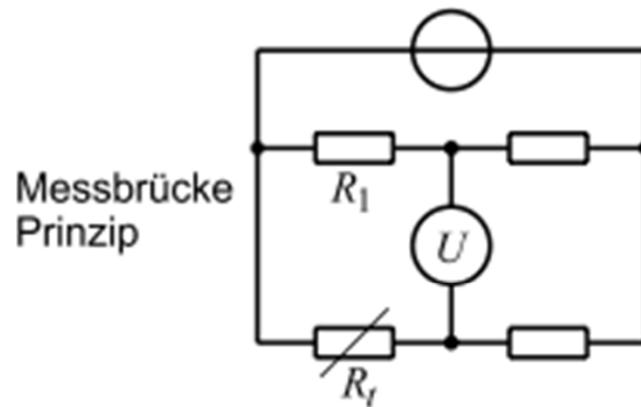
Aufgrund der **Parallelschaltung** gilt:

$$U_R = U_M + U_{L2} + U_{L3} \text{ bzw. } U_M = U_R - U_{L2} - U_{L3}$$

Die Leitungen haben gegenüber dem Messgerät einen verschwindend kleinen Widerstand. Infolgedessen sind auch Teilspannungen U_{L2} und U_{L3} vernachlässigbar und es gilt:

$$U_M = U_R$$

PT100 - Schaltungsvarianten



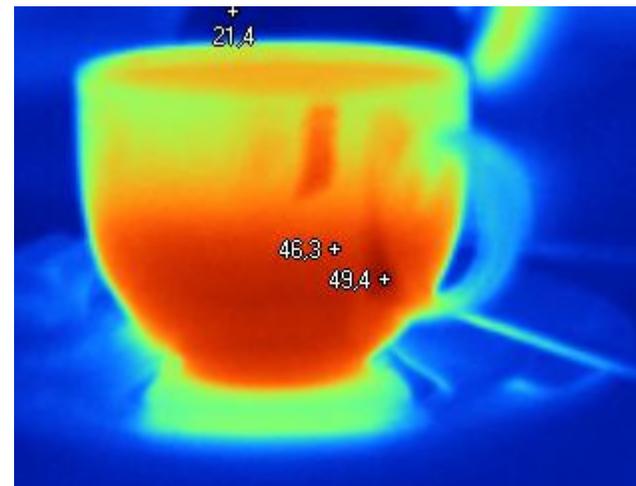
Thermoelemente

Thermopaar

- **Zwei elektrische Leiter**, die an ihren Enden verlötet sind
- Seebeck-Effekt: **Thermospannung** abhängig von den Leitern und dem Temperaturunterschied
- Die Spannung U ist damit ein Maß für die Temperatur an der Messstelle
- Thermospannung steigt linear mit der Temperaturdifferenz
- Z. B. NiCr-Ni Thermoelement

Thermografie

Berührungsloses Temperaturmessverfahren (**Pyrometrie**).
Abbildendes und **messendes Analyseverfahren**.



Stefan und Boltzmann Gesetz

Zusammenhang der Lichtabstrahlung und der Körpertemperatur:

$$I = \varepsilon \cdot s \cdot T^4$$

I die Intensität in Watt pro Quadratmeter

ε der Emissionskoeffizient

s die Stefan-Boltzmannkonstante ($s = 5,667 \text{ E}^{-8}$)

T die absolute Temperatur, gemessen in Kelvin

Es wird vollkommen dunkel, wenn die Temperatur am absoluten Nullpunkt angekommen ist.

Thermografie funktioniert im Prinzip also immer.

Wiensches Verschiebungsgesetz

Der Physiker **Wien** beschrieb den Zusammenhang des Abstrahlungsmaximums und der Temperatur in einem einfachen Gesetz, also nichts anderes, wie rot ein glühendes Stück Eisen bei einer bestimmten Temperatur ist:

$$\lambda_{max} = 2980 \mu\text{m K} / T$$

Hierbei ist λ_{max} die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts und T die absolute Temperatur in Kelvin.

Bei einer Temperatur von 20 °C (293 K) erhalten wir ein Abstrahlungsmaximum bei 10,17 μm .

IR Bereiche

Bei Umgebungstemperatur ist die Lichtabstrahlung eines Körpers bei 10 μm Wellenlänge am stärksten.

In diesem Bereich wird die Atmosphäre der Erde sehr durchlässig. Dieses transparente Fenster im Spektrum erstreckt sich von **8 μm bis etwa 13 μm** Wellenlänge.

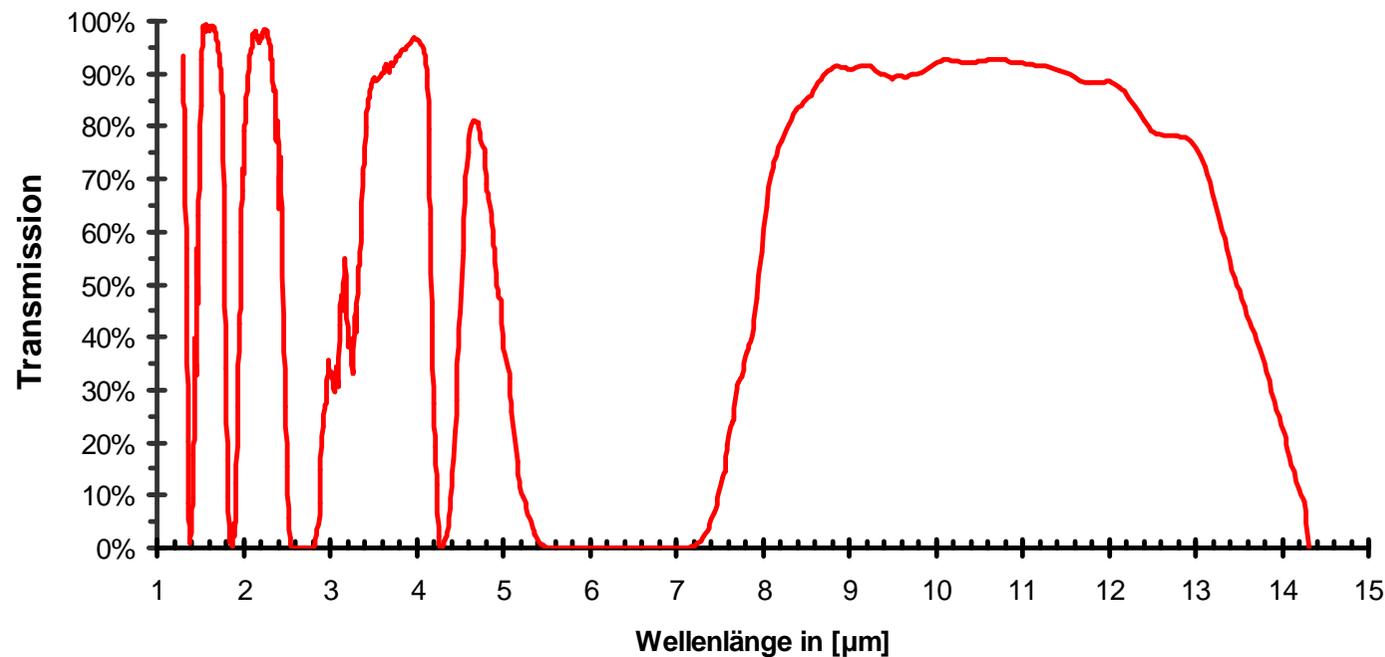
In diesem Fenster findet der Löwenanteil der Abstrahlung der Energie statt, welche die Erde von der Sonne erhält.

In diesem Bereich arbeiten Thermografiekameras besonders empfindlich und genau.

IR Bereiche

Die durchlässigen Fenster **3 bis 5 μm** für **hohe Temperaturen**,
8 bis 13 μm für den **Raumtemperaturbereich** werden zur
Thermografie benutzt.

Atmosphärische Transmission



Emission

Die Aussendung von IR aufgrund der eigenen Temperatur erfolgt mit einem gewissen **Wirkungsgrad**, der das Verhältnis des tatsächlich ausgesandten Lichtes **zum theoretisch möglichen** ist.

Diesen Faktor nennt man **Emissionskoeffizienten ϵ** .

Bei allen nichtmetallischen Stoffen liegen die Emissionskoeffizienten zwischen 0,98 (Blattgrün) und etwa um 0,92 (Gips).

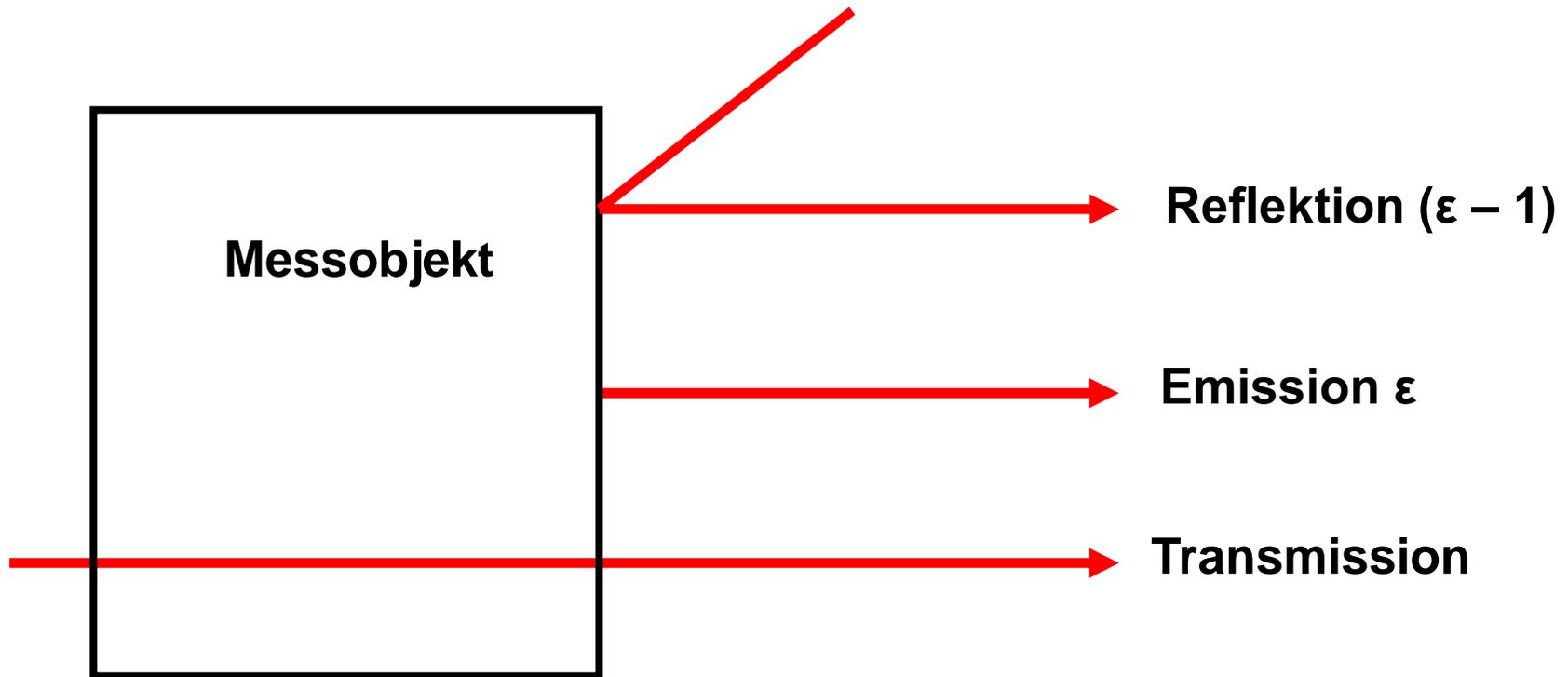
Wenn Thermografie an nicht elektrisch leitenden Oberflächen (auch lackierten Metallen) vorgenommen wird, so ist die Emissionskorrektur sehr klein.

Emission

Metalle sind jedoch elektrisch leitend und weichen sehr stark von $\epsilon = 1$ ab. Die Abweichung hängt stark vom Blickwinkel, vom Material und von der Oberflächenrauigkeit, etc. ab.

In diesem Fall ($\epsilon < 0.5$) ist mit einer Kalibriermessung der Emissionskoeffizient zu bestimmen.

Mit dem Wirkungsgrad ($1 - \epsilon$) wird die thermische Abstrahlung der Umgebung reflektiert.



Emissionsfaktoren

- Aluminium, poliert 0,05
- Eisen blank 0,13
- Verz. Stahl 0,25
- Eisen, verrostet 0,69
- Beton 0,92
- Ziegel 0,93
- Holz (Bretter) 0,96
- Glas 0,7 bis 0,9
- Eis 0,95
- Wasser 0,96
- menschliche Haut 0,98

Absorption

Bei längeren Aufnahmedistanzen wird die **Absorption** der Luft im Infraroten wirksam.

Dieser Effekt ist allerdings in der thermografischen Praxis irrelevant, da er sich erst ab mehreren Kilometern Abstand merklich auswirkt.

Bei Distanzen unter 100 - 200 m ist die Absorption selbst bei diesigem Wetter vernachlässigbar.

Sensorik

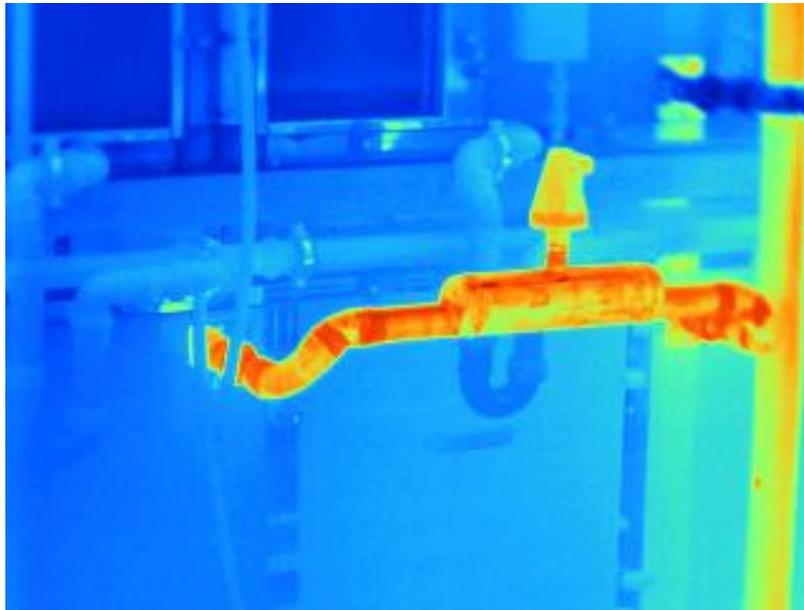
Flächensensor (**Focal-Plane-Array-Kamera**).

Wie elektronische Fotoapparate (Verwendung spezieller Sensoren und Sondermaterialien).

Microbolometer uFPA Matrix Sensor (ferroelektrische, und pyroelektrische Technologien) (u = ungekühlte Bolometer)

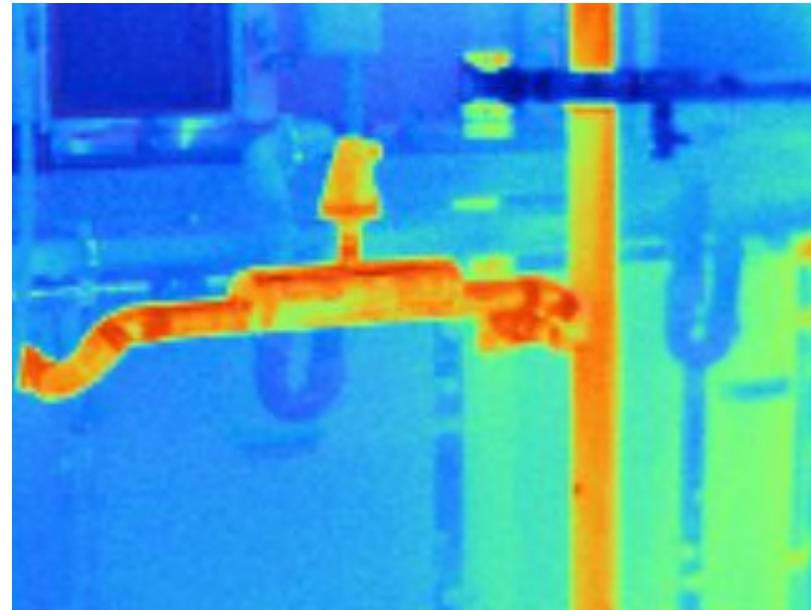
Häufig verwendete Materialanordnungen für Thermosensoren sind:

- ASi amorphes Silizium (mäßige Sensitivität und Haltbarkeit)
- VOx Vanadium Oxid (hohe Empfindlichkeit und Langlebigkeit)
- AlGa/GaAs- ferroelektrische-/ keramische Elemente
- Bariumstrontiumtitan (BST) uFPA Sensoren, etc.



320 x 240 Pixel

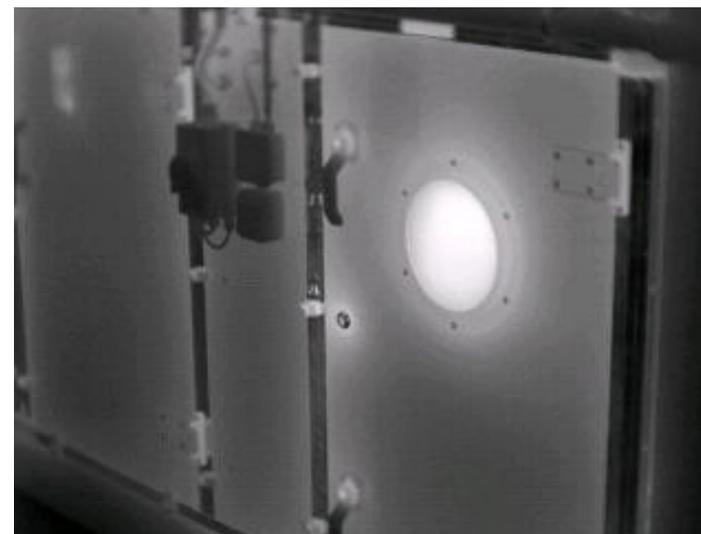
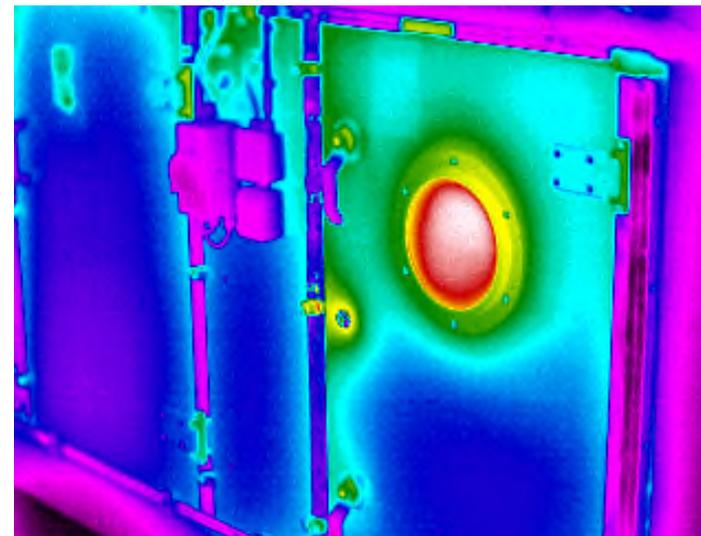
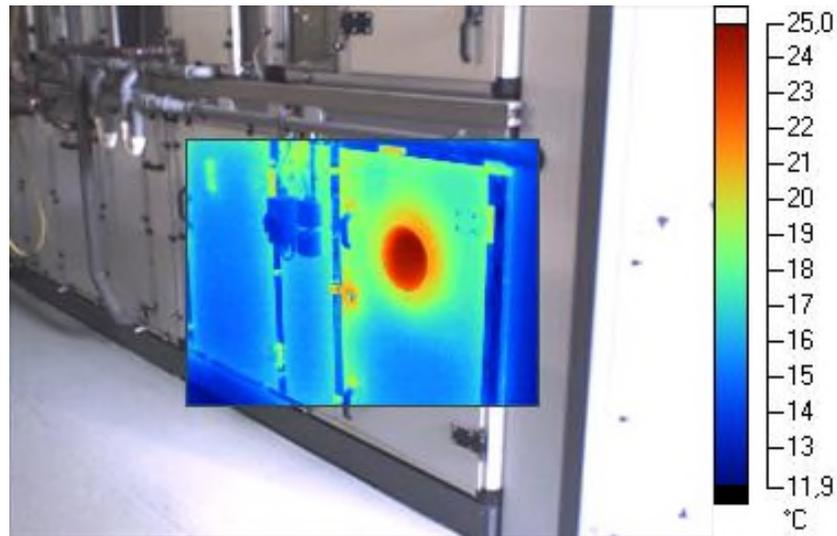
Kameraqualität



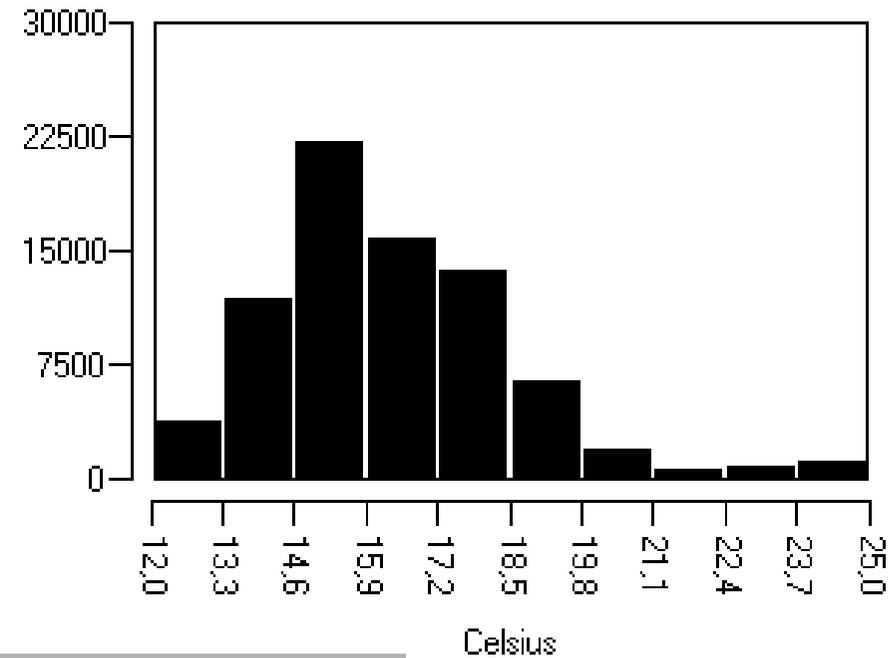
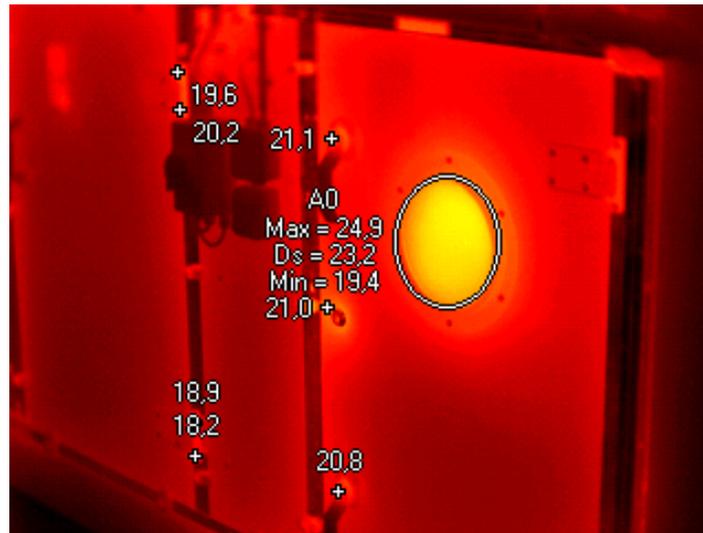
160 x 120 Pixel

Kameraqualität

Thermografie



Thermografie



Ort	ϵ	t Hinterg.	Min.	Ds	Max	Std.abw.	Einh.
A0	0,95	20,0	19,4	23,2	24,9	1,33	°C
P0	0,95	20,0	21,1	21,1	21,1	0,00	°C
P1	0,95	20,0	21,0	21,0	21,0	0,00	°C
P2	0,95	20,0	20,8	20,8	20,8	0,00	°C
P3	0,95	20,0	19,6	19,6	19,6	0,00	°C
P4	0,95	20,0	20,2	20,2	20,2	0,00	°C
P5	0,95	20,0	18,9	18,9	18,9	0,00	°C
P6	0,95	20,0	18,2	18,2	18,2	0,00	°C

Aufdeckung von z. B. Bauschäden.

Energetische Beurteilung von Gebäuden und Maschinen.

Qualitative Thermografie

Wärmebrücken, Undichtigkeiten, Feuchteschäden

Schaltschrankanalyse

Ortung verborgener Bauteile (z. B. Heizungsrohre)

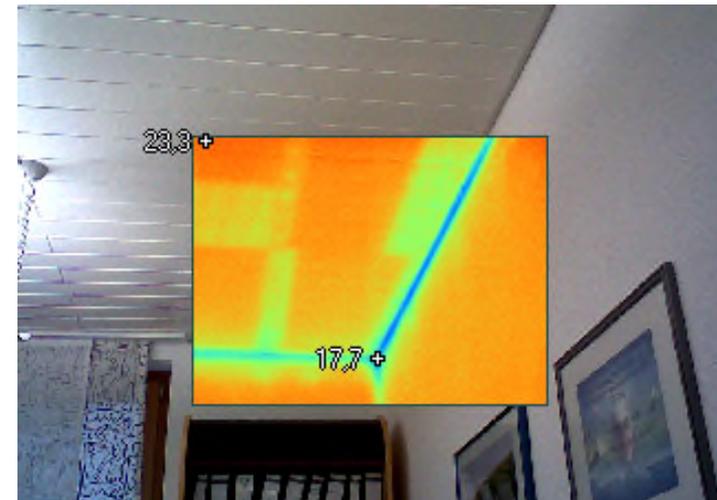
Quantitative Thermografie

Messung physikalischer Größen

z. B. Wärmestromdichte

Wärmedurchgangskoeffizient

Wärmebrückenfaktoren



Hygrometer

Das Hygrometer ist ein Messinstrument zur Bestimmung der Luftfeuchtigkeit, also des Wasserdampfgehalts der Luft.

Luftfeuchtigkeit

Die Luftfeuchtigkeit, oder kurz Luftfeuchte, bezeichnet den **Anteil des Wasserdampfs** am Gasgemisch der Luft.

Das geläufigste Maß für die Luftfeuchte ist die **relative Luftfeuchtigkeit**, angegeben in %. Sie bezeichnet das Verhältnis des **momentanen Wasserdampfgehalts** in der Luft zum **maximal möglichen Wasserdampfgehalt** bei derselben Temperatur.

Absorptionshygrometer

Absorptionshygrometer enthalten ein **hygroskopisches Material**, dessen Eigenschaften sich durch die Feuchtigkeit ändern. Am bekanntesten ist das **Haarhygrometer**. Es enthält ein Haar, das sich bei Feuchtigkeit ausdehnt. Der Längenunterschied bei völlig trockener Luft 0 % relative Luftfeuchte (r. F.) und gesättigter Luft 100 % r. F. beträgt dabei etwa 2,5 %.

Früher kamen dabei Menschen-, Schaf- oder Pferdehaare zur Anwendung, heute werden auch Kunstfasern verwendet.

Eine andere Möglichkeit ist die Messung der **Gewichtszunahme** bei der Einlagerung von Wasser.

Moderne elektronische **Absorptionshygrometer** dagegen basieren auf der Veränderung des **elektrischen Widerstands** oder der elektrischen Kapazität einer Schicht eines hygroskopischen Kunststoff-Polymers.

Taupunktspiegelhygrometer

Die Bestimmung des Taupunkts ist ein fundamentales, vergleichsweise aufwendiges und präzises Messverfahren. Es wird heute als das **präziseste Verfahren** zur Definition der nationalen Feuchtestandards eingesetzt.

Dazu wird ein Spiegel soweit abgekühlt, bis sich die Luftfeuchtigkeit auf ihm niederschlägt. Mit einer Lichtquelle und einem **Photosensor** wird der **Moment der Kondensation** bestimmt. Zur Umrechnung des Taupunkts, z. B. in absolute Luftfeuchte, wird zusätzlich der **Luftdruck** und die **Temperatur** benötigt, die zum Messzeitpunkt herrschte.

Psychrometer

Psychrometer bestimmen die relative Luftfeuchte und bestehen aus **zwei gleichartigen Thermometern**, wobei das Quecksilbergefaß bzw. der Temperatursensor des einen mit einem **kontinuierlich befeuchteten Mullstrumpf überzogen** ist. Dem **“feuchten” Thermometer** wird durch **Verdunstung** Wärme entzogen, und es zeigt in Folge dessen eine niedrigere Temperatur als das **“trockene” Thermometer** an. Die **Temperaturdifferenz** zwischen beiden Thermometern ist ein **Maß für die relative Feuchte**.

In der Regel unterscheidet man zwischen elektronisch und mechanisch arbeitenden Geräten. Die theoretische Grundlage für das Gerät liefert die **Mischungstheorie**. Dabei wird davon ausgegangen, dass beide Thermometer kontinuierlich mit ca. 3 m/s belüftet werden.

Weitere Verfahren

Bei **chemischen Hygrometern** ändern sich Eigenschaften eines Materials aufgrund der **chemischen Reaktion mit Wasser**, zum Beispiel in Form von Farbänderungen, die auf Teststreifen abgelesen werden können. Im Trocknungsmittel Silikagel wird / wurde Kobalt-(II)-Chlorid als Indikator verwendet: Blau = getrocknet, hellrosa = feucht.

Coulometrisches Hygrometer

Als coulometrischen Feuchtesensor bezeichnet man einen Feuchtesensor, der den Wasserdampfgehalt der Luft (Luftfeuchtigkeit) in sehr geringer Konzentration (**Spurenfeuchte**) misst. Die Messung basiert auf der Eigenschaft von Diphosphor-pentoxid (P_2O_5), den in der Umgebung enthaltenen Wasserdampf zu absorbieren.

Optische Hygrometer

Optische Hygrometer bestimmen die Luftfeuchte durch die Messung der **Absorption von Licht** mit einer bestimmten, für Wasserdampf charakteristischen Wellenlänge oder durch Messung der **Änderung der Brechzahl**.

Impedanzhygrometer (auch Resistive Hygrometer)

Impedanzhygrometer (auch Resistive Hygrometer) bestimmen die Luftfeuchte durch die Messung der **Änderung des elektrischen Widerstands einer Substanz bei Wasseradsorption**.

Kapazitive Hygrometer

Kapazitive Hygrometer bestimmen die Luftfeuchte durch die Messung der Änderung der **elektrischen Eigenschaften** eines **Kondensators** (Elektrotechnik) bei **Wasseradsorption**.

Es wird die Veränderung der **Dielektrizitätskonstanten** des Materials zwischen den Kondensatorplatten gemessen.

Spiral-Hygrometer

Spiral-Hygrometer ein **dünnes Blechband** ist einseitig mit Kunststoff, der sich bei Wasseraufnahme ausdehnt, beschichtet und aufgerollt. Funktion analog eines Bimetall-Thermometers.

Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer Möglichkeiten, die Luftfeuchtigkeit zu bestimmen, die aber selten angewendet werden. Alle Verfahren haben ihre Vor- und Nachteile, **das optimale Hygrometer für alle Anwendungen gibt es nicht.**

Kapazitive Hygrometer/ Metalloxidsensoren

Die Feuchtemessung mit **Metalloxidsensoren** ist ein kapazitives Messverfahren, bei dem die **Impedanz eines Kondensators feuchteabhängig** ist. Der Kondensator wird gebildet aus einer Aluminiumschicht, einem **Dielektrikum aus Aluminiumoxid** und einer **Gegenelektrode** aus einer **feuchtedurchlässigen Goldbeschichtung**. Anstelle von Al_2O_3 , ist auch Zirkondioxid geeignet. Weil Wasser oder Wasserdampf eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante ($\text{DK} = 81$) hat, ergibt sich ein sehr **deutlicher Messeffekt**.

Die Feuchtigkeitsaufnahme des Dielektrikums hängt vom Wasserdampfpartialdruck seiner Umgebung ab. Die sehr kleinen Kapazitätsänderungen werden durch eine integrierte Elektronik verstärkt und in ein störsicheres Signal umgewandelt, welches dann über Standardverbindungsleitungen zum Messumformer übertragen wird.

Kapazitive Hygrometer/ Metalloxidsensoren

Aufgrund ihrer sehr guten **Druckbelastbarkeit** und ihrer **geringen Empfindlichkeit** gegenüber wechselnden Strömungsbedingungen sind die Metalloxidsensoren die am häufigsten verwendeten Messfühler in technischen Spurenfeuchtemessbereichen.

Die Sensoren sind einschließlich der integrierten Elektronik in robusten Prozessgehäusen untergebracht. Sie können problemlos mittels Gewindeanschluss direkt in Prozessatmosphären eingesetzt werden, wenn gewährleistet ist, dass dort saubere Randbedingungen vorliegen.

Die im Feuchtesensor auftretenden Kapazitätsänderungen werden in ein entsprechendes elektrisches Signal umgewandelt.

Messgenauigkeit $\pm 3 \%$

Feuchtemessung

Absolute Feuchte

$$F_{abs} = \text{Masse Wasser} / \text{Luftvolumen} \quad [\text{g/m}^3]$$

Sättigungsfeuchte

$$F_{sat} (\vartheta) = \text{max. Masse Wasser} / \text{Luftvolumen} \quad [\text{g/m}^3]$$

Relative Feuchte

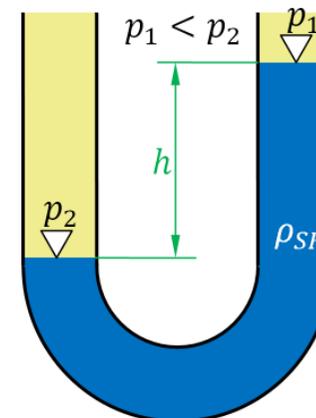
$$F_{rel} (\vartheta) = F_{abs} / F_{sat} (\vartheta) \cdot 100 \quad [\%]$$

Messprinzipien und Sensoren zur Druckmessung

Man unterscheidet bei der Druckmessung die Geräte, die die Messgröße direkt aus einer der beiden **Basisbeziehungen** ermittelt:

$$p = F / A \quad \text{oder} \quad \Delta p = \Delta h \cdot \rho \cdot g$$

und solche Geräte, die Längenänderungen, elektrische, optische oder chemische Auswirkungen einer Druckänderung in ein entsprechendes Signal wandeln.



Flüssigkeitsdruckmessgeräte

Der zu messende Druck p wird mit der **Höhe h** einer **Flüssigkeitssäule** verglichen.

Der Druck Δp aus $\Delta h \cdot \rho \cdot g$ bestimmt (ρ : Dichte des Messmediums, g : Erdbeschleunigung).

Diese Art der Messung ist jedoch durch die sinnvoll messbare Höhendifferenz sowohl nach unten wie nach oben begrenzt.

Druckwaagen/Kolbendruckmessgeräte

Druckwaagen bzw. Kolbendruckmessgeräte arbeiten nach der Basisdefinition des Drucks. Der Druck wirkt auf eine **definierte Fläche A** und bewirkt eine **Kraft F** . Diese Kraft wird beispielsweise mit der einer Feder (Kolbendruckmessgerät) oder eines Gegengewichtes (Druckwaage) verglichen.

Druckwaage

Die Druckwaage ist zusammen mit den Flüssigkeitsdruckmessern das Druckmessgerät mit dem **kleinsten Messfehler**. Sie wird daher als **Drucknormal, Eichgerät** und **Präzisionsmessgerät** verwendet. Ihr Anwendungsgebiet liegt zwischen 1 bar und 2500 bar Überdruck.

Bei einer Druckwaage übt der Druck über einen Zylinder eine Kraft auf einen Kolben aus und diese Kraft wird mit der Gewichtskraft geeichter Gewichte verglichen. Auch hier wird mit einer Ölvorlage und mit einem durch einen drehbaren Kolben gearbeitet um die Kolbenreibung weitgehend auszuschließen.

Druckwaagen dienen zur hochgenauen Kontrolle, Justierung und Eichung von anzeigenden, steuernden oder registrierenden Druck-, Mess-, und Regelgeräten. Die Druckprüfstände werden mit einem Werkszertifikat geliefert und sind daher auch ideal als Prüfmittel nach DIN EN ISO 9000 ff. geeignet

Mittelbare Druckmessgeräte

Federmanometer

Das Messwerk eines Rohrfedermanometers enthält eine **einseitig eingespannte elastische Rohrfeder**, die sogenannte Bourdon-Feder.

Dieses elastische Messglied verformt sich proportional zum anstehenden Druck. Nach der Definition des Druckes $p = F / A$ ergibt sich für die daraus resultierende Kraft $F = p \cdot A$. Da die äußere Fläche der Rohrfeder größer ist als die innere und damit auch die nach außen gerichtete Kraft überwiegt, biegt sich die Feder bei steigendem Druck auf.

Mit Hilfe eines mechanischen Hebelwerkes wird diese relativ kleine Auslenkung auf einer entsprechend geteilten Skala angezeigt.

Mittelbare Druckmessgeräte

Federmanometer

Für Drücke bis etwa 60 bar setzt man kreisförmige Rohrfedern ein. Durch Veränderung der Profilform, des Materials oder der Wandstärke der Rohrfeder ist das Messen von kleinen Drücken genau so möglich wie die Messung von Drücken **bis 10.000 bar**.

Rohrfedermanometer sind **empfindlich gegen Überlastung**.

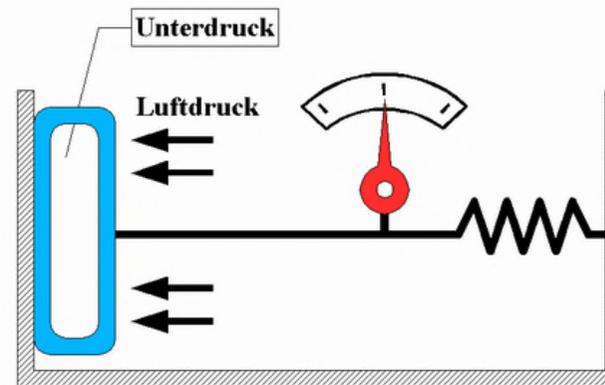
Bleibende Verformungen sind dadurch zu erkennen, dass der Zeiger des Manometers nicht mehr auf den Nullpunkt anzeigt. Die Anzeigegenauigkeit ist heute besser als 1%.



Mittelbare Druckmessgeräte

Kapselfedermanometer

Für Sonderfälle kommen als federelastische Messglieder auch Kapselfedern in Frage. Sie bestehen aus zwei konzentrisch gewellten Metallmembranen, die am Rand druckdicht miteinander verbunden sind. Unter dem Einfluss des Druckes **wölbt** sich die **Kapsel beidseitig auf**. Bei Unterdruckmessungen wird sie vom Außendruck beidseitig zusammengedrückt. Reichen die erzielten Federwege nicht aus, so können mehrere Federn zu einem Block zusammengefasst werden. Kleinste Messbereiche (z. B. 0 - 2,5 bar) sind möglich.



Mittelbare Druckmessgeräte

Differenzdruckmanometer nach Barton

Bei Differenzdruckmanometern subtrahieren sich die Messeffekte zweier Messorgane. Diese Messorgane bestehen häufig aus einer **senkrechten Membran oder Plattenfeder**, die sich an der Seite mit dem kleineren Druck durchbiegt. Die **Druckräume links und rechts der Plattenfeder** werden durch **Faltenbälge** vom **äußeren Luftdruck abgetrennt**.

Die Barton-Zelle ist ein betriebliches Differenzdruckmanometer mit sehr guten messtechnischen Eigenschaften. Der Messeffekt wird durch zwei miteinander über eine Ventilstange gekoppelten Bälge erzeugt.

Mittelbare Druckmessgeräte

Differenzdruckmanometer nach Barton

Die beiden Balgenaußenseiten sind starr durch eine Spindel verbunden. Die Bewegung der Spindel ist nahezu reibungslos und wird durch die Verdrehung eines Torsionsrohres nach außen übertragen. Die Innenräume der Bälge sind zur Dämpfung des Messwerkes mit Öl gefüllt.

Es können Differenzdrücke von 5 mbar bis 28 bar bei Bezugsdrücken bis 640 bar gemessen werden. Die **Messabweichung** ist mit $\pm 0,5\%$ sehr gering.

Die am meisten eingesetzten mechanischen Druckmessgeräte sind die mit federelastischen Messgliedern (Bourdonrohr). Hierbei gelangt der Druck in einen definierten Druckraum des Messorgans von dem sich eine oder mehrere der Wände proportional zum Druck elastisch verformen. Diese Verformung wird dann auf ein Zeiger übertragen.

Elektronische Drucksensoren

Der große Nachteil von allen bisher aufgeführten **mechanischen Messsysteme** ist, dass sie nur relativ **träge auf Druckänderungen** reagieren können. Elektronische Drucksensoren können bis zu einer Frequenz von ca. 100 kHz Druckänderungen erfassen.

Weiterhin lassen sich die **Messwerte** dieser Systeme nur auf Umwegen, wenn überhaupt, in ein **elektrisches Signal** für die Weiterverarbeitung mit einem Rechner umwandeln.

Es existieren eine Vielzahl von elektrischen Drucksensoren mit unterschiedlichsten Messprinzipien.

Elektronische Drucksensoren

Dehnungsmessstreifen, Halbleiterdehnungstreifen (piezoresistiver Effekt) etc.

Durch **Druckbeaufschlagung** ändert sich die Länge und damit der Wert eines **elektrischen Widerstandes**.

Diese Widerstandsänderung wird über ein spezielles Auswerteverfahren, der sogenannten **Wheatstone'schen Messbrücke** ausgewertet und in ein druckabhängiges Ausgangssignal umgewandelt.

Weitere **Dehnungsmessstreifen**, neben der genannten Halbleitertechnologie sind Dick- und Dünnschichtdehnungsmessstreifen und Foliendehnungsmessstreifen.

Wheatstone - Brücke

Anhand der Wheatstone-Brücke soll exemplarisch das Messprinzip der Brücken gezeigt werden.

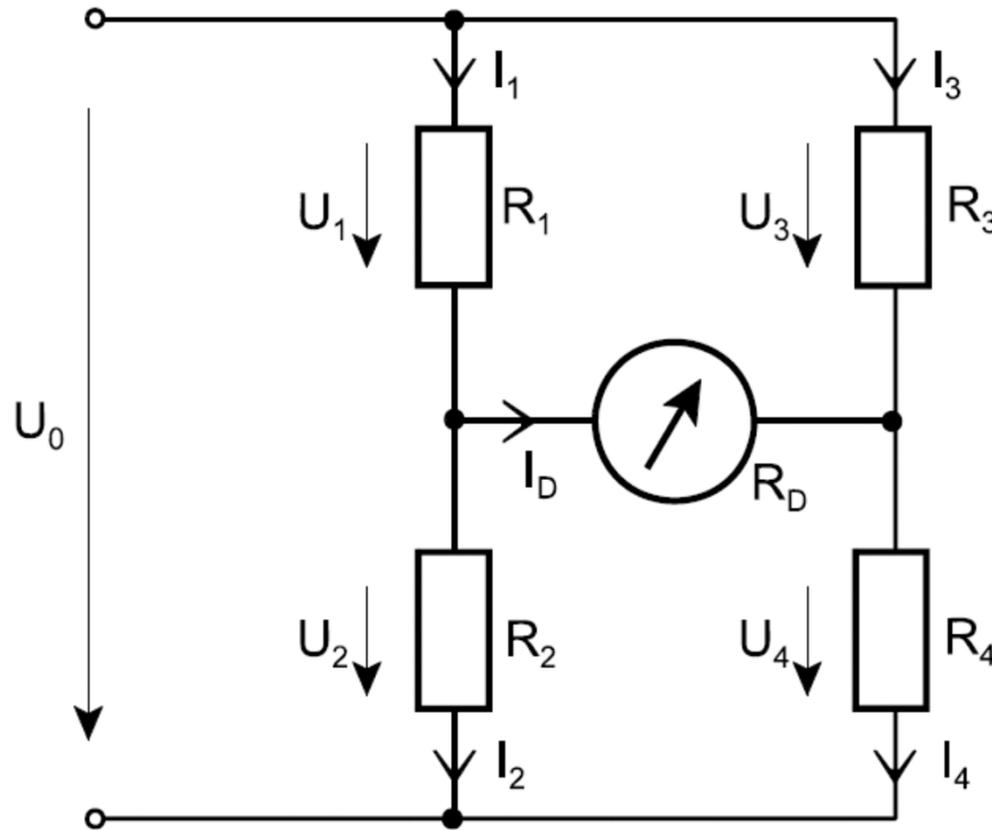
Die Wheatstone-Brücke arbeitet als **abgeglichene Brücke**, d. h. die Anzeige zeigt **nicht den Messwert** an, sondern dient als **Indikator**.

An einer Spannungsquelle liegen die beiden Widerstandszweige R_1 , R_2 und R_3 , R_4 an.

Das Messwerk ist ein **Nullspannungsindikator**, d. h. es hat keinen Ausschlag, wenn an der Brückendiagonalen gleiches Potential vorhanden ist.

Dann ist die Brücke abgeglichen. Damit ist U_2 und U_4 gleich sowie U_g und I_g sind 0.

Wheatstone - Brücke



Wheatstone - Brücke

In diesem Fall sind $I_1 = I_2$ und $I_3 = I_4$

Weiter gilt:

$$R_1 \cdot I_1 = R_3 \cdot I_3 \quad \text{sowie} \quad R_2 \cdot I_2 = R_4 \cdot I_4$$

Damit erhält man:

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4$$

oder:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$$

Die Produkte der Diagonalwiderstände sind gleich.

Wheatstone - Brücke

In der Messbrücke wird z. B. R_1 durch den unbekanntes Widerstand R_x ersetzt. Ist die Brücke abgeglichen, so berechnet sich:

$$R_x = R_2 \cdot R_3 / R_4$$

Üblicherweise wird R_4 als Potentiometer mit genauer Skala ausgeführt, auf der R_x sofort abgelesen werden kann.

Elektronische Drucksensoren

Halleffektsensoren

Ein Halleffektsensor bestimmt die Änderung eines **Magnetfeldes** in Abhängigkeit von der Auslenkung einer Membran oder ähnlichem.

Kapazitive Sensoren

Bei der Druckmessung mit kapazitiven Sensoren macht man sich die **Abstandsänderung** der beiden Kondensatorplatten in Abhängigkeit vom Druck zu Nutze.

Wattmeter

Das Wattmeter besteht aus einem **elektrodynamischen Messwerk** mit Anpassungswiderständen.

Es hat eine **feste Stromspule** als Strompfad (Strom i_1) und eine **Drehspule** als Spannungspfad (Strom i_2).

Der Strom i_1 erzeugt einen magnetischen Fluss im Eisenkreis. Mit dem Strom i_2 wird ein Drehmoment in der Drehspule mit Zeiger erzeugt.

Die Augenblicksleistung ist im Gleichstromkreis gleich dem Mittelwert.

Im Wechselstromkreis wird aufgrund der Trägheit des Zeigers mit Drehspule der Mittelwert P angezeigt.

Der Ausschlag des Wattmeters ist **polaritätsabhängig**.

Wattmeter

Es gibt zwei Bauarten:

- eisenfreies Messwerk für **Präzisionsmessgeräte** (keine Sättigungseffekte des Eisens, geringere Empfindlichkeit)
- eisengeschlossenes Messwerk für normale Anwendungen.

Wirkleistungsmessung

Da zeitabhängige Größen $U(t)$ und $I(t)$ vorliegt, ergibt die Multiplikation beider Größen die Augenblicksleistung

$$P(t) = U(t) \cdot I(t).$$

Der arithmetische Mittelwert der Augenblicksleistung ist die Wirkleistung P .

Der Zeiger stellt sich aber aufgrund der Trägheit auf den Mittelwert P , d. h. die Wirkleistung, ein.

Wattmeter

Der Leistungsmittelwert P wird auch als **Wirkleistung** P_W bezeichnet:

$$P_W = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i)$$

Werden nur die Effektivwerte von Spannung und Strom ohne Berücksichtigung der Phasenlage gemessen, dann erhalten wir die sogenannte **Scheinleistung** P_S :

$$P_W = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

Sie ist i. d. R. zu groß und stimmt mit der Wirkleistung nur bei ohmschen Verbrauchern, also Phasendifferenz 0 oder in Gleichstromnetzen überein. Sie berücksichtigt nicht, dass Leistungsanteile von kapazitiven oder induktiven Speichern wieder zurückgegeben werden.

Wattmeter

Bei Phasenverschiebung ungleich 0 stellt sich die sogenannte **Blindleistung** Q ein und es gilt der Zusammenhang zwischen Wirkleistung und Scheinleistung:

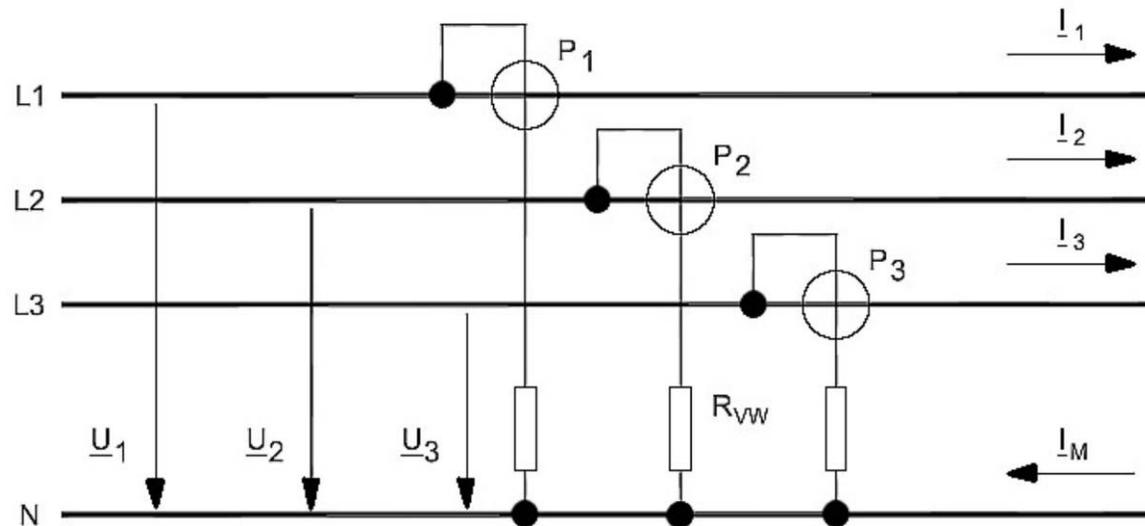
$$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i)$$

$$Q = (P_S^2 - P_W^2)^{0,5}$$

Soll die Wirkleistung ermittelt werden, dann kann dies prinzipiell über Verfahren geschehen, bei denen die Momentanleistung erfasst wird, also das Produkt zu jedem Zeitpunkt aus Strom und Spannung, und danach eine Mittelung durchgeführt wird.

Wattmeter

Leistungsmessung im Drehstromkreis (Dreileiter-Verfahren)



Die gesamte Wirkleistung ist $P = P_1 + P_2 + P_3$

Diese aufwendige Dreiwattmeter-Verfahren ist notwendig, wenn **unsymmetrische Belastungen** der Leiter vorliegen und ein genaues Ergebnis gewünscht wird.

Energiemessung im Wechsel- und Drehstromnetz

Der Energieverbrauch von Wechselstrom- bzw. Drehstromgeräten wird in der Regel mit **Induktionszählern** (sogenannten Elektrizitätszählern) gemessen. Mit dem eingebauten Induktionsmesswerk wird die Wirkarbeit W bzw. die Elektrizitätsmenge Q gemessen. Mit einem **Induktionsmesswerk** und einem Phasenschieber kann auch die Blindarbeit gemessen werden. Die Energiemessung in Wechsel- und Drehstromnetzen hat eine besondere Bedeutung bei der Abrechnung der Energiekosten.

Wirkungsweise des Induktions-Messwerks

Das Einphaseninduktions-Messwerk besteht aus Spannungsspule, Stromspule, Läuferscheibe, Bremsmagnet und Rollenzählwerk.

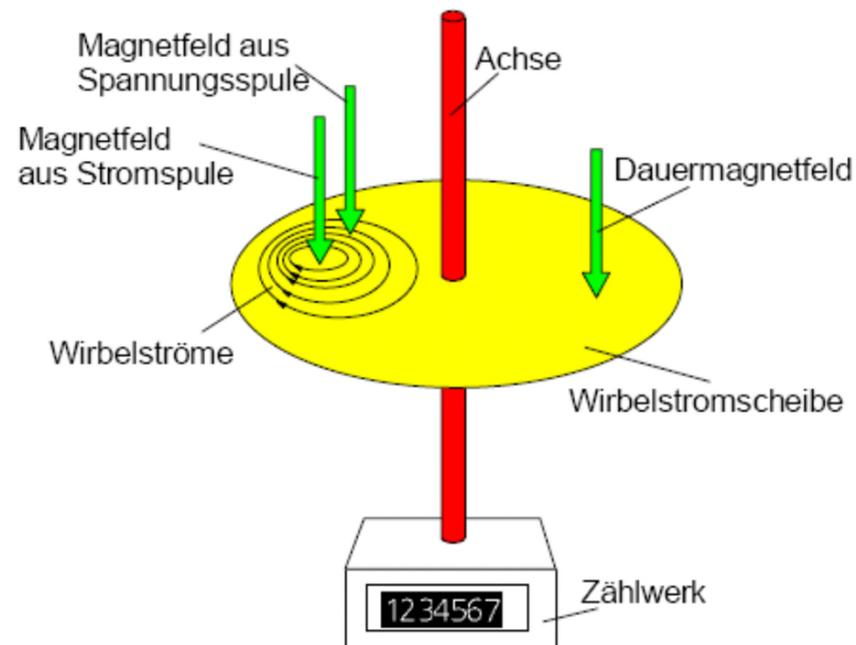
Spannungs- und Stromspule sind gegeneinander um 90° verdreht und erzeugen ein Wanderfeld, welches in der Aluminium-Läuferscheibe Wirbelströme induziert. **Wanderfeld** und **Wirbelströme** erzeugen ein **Antriebsdrehmoment**. Die Achse der Scheibe treibt das Rollenzählwerk.

Der **Bremsmagnet** erzeugt ebenfalls ein Wirbelstrom in der Scheibe und damit ein **Bremsmoment** (Wirbelstrombremse).

Diese Konstruktion ist sehr alt, wird aber immer noch aufgrund des guten Preis/Leistungsverhältnisses bei gleichzeitig hoher Genauigkeit und Langzeitstabilität von den EVU's eingesetzt.

Wirkungsweise des Induktions-Messwerks

Rein elektronische Verfahren werden meist in Anlagen eingesetzt, in denen eine elektronische Messdatenverarbeitung gewünscht wird.



Messprinzipien

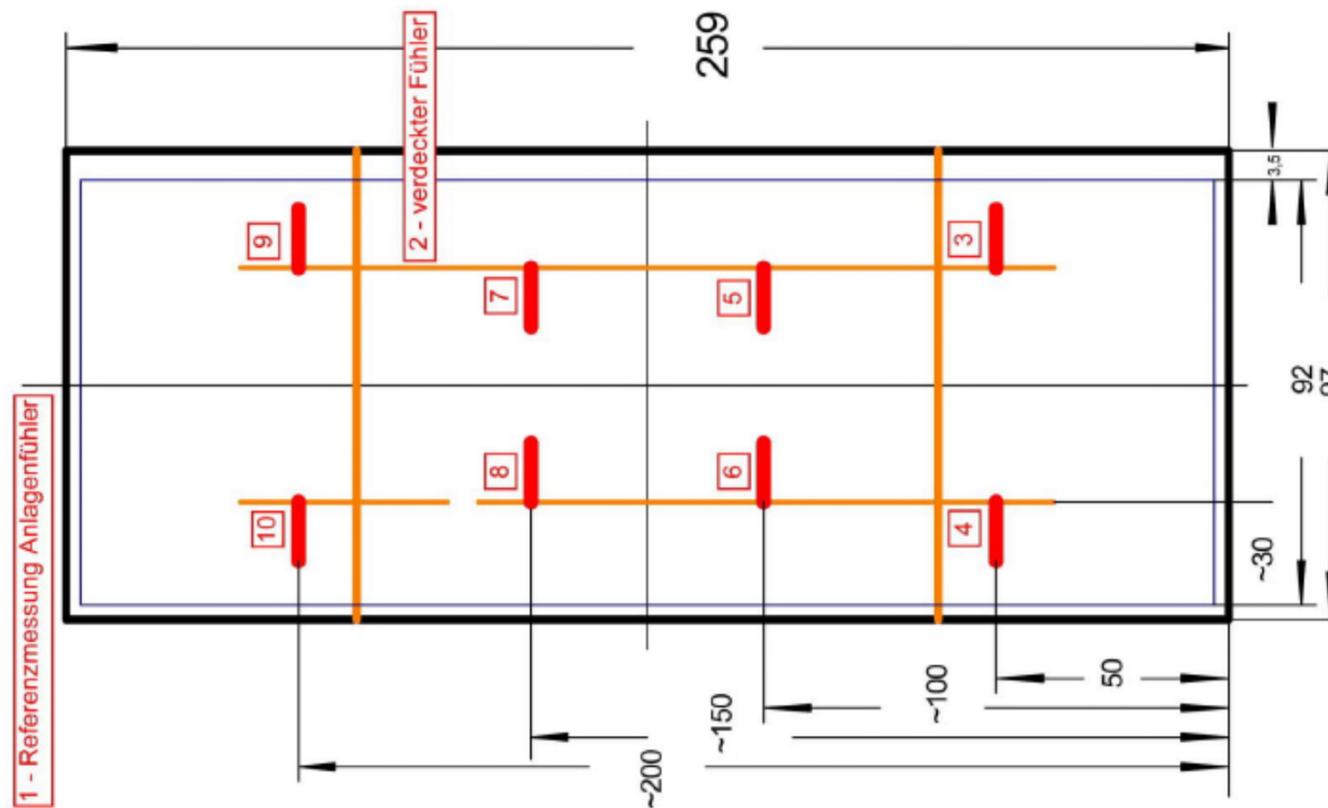
Worauf ist bei Messungen generell zu achten:

- Die **Messunsicherheit** des Messgerätes muss auf die Messaufgabe abgestimmt sein.
- Die Messunsicherheit eines Messgerätes soll höchstens 1/10 der geforderten Messunsicherheit der durchzuführenden Messung sein (**Faktor-10 Regel**).
Beispiel: ± 10 mA gefordert Unsicherheit des Messobjekts benötigt ± 1 mA max. Unsicherheit des Messgerätes.
- **Messwerte** müssen **repräsentativ** sein. Oft genügt ein Messwert nicht, da Schichtungen (z. B. nach Wärmeübertragern) erfasst werden müssen. Hier werden evtl. ein Vielzahl von Sensoren benötigt (siehe auch Fehlerrechnung)

Messprinzipien

Erfassung von repräsentativen Mittelwerten (Schichtungen, etc.)

Beispiel Temperaturmessung



Messprinzipien

Worauf ist bei Messungen generell zu achten:

- Messwerte müssen **geprüft** werden.
- Oft ist es sinnvoll mindestens zwei Messwerte parallel zu messen. Mit der **Redundanz** können Abweichungen auf Fehler in der Messung oder des Sensors hinweisen.
- Kann die Messung nicht redundant erfolgen, müssen **Plausibilitäten** geprüft werden. Evtl. ist das Messgerät **vor und nach der Messung** mit einem weiteren Messgerät zu kalibrieren.
- Die gesamte Messung (kombinierte Messung) muss prinzipiell auf Plausibilität geprüft werden.

Messprinzipien

Beispiel Wärmeübertragermessung (Wärmerückgewinnung):

- Prüfung der Leistungen (**Leistungsbilanz**)

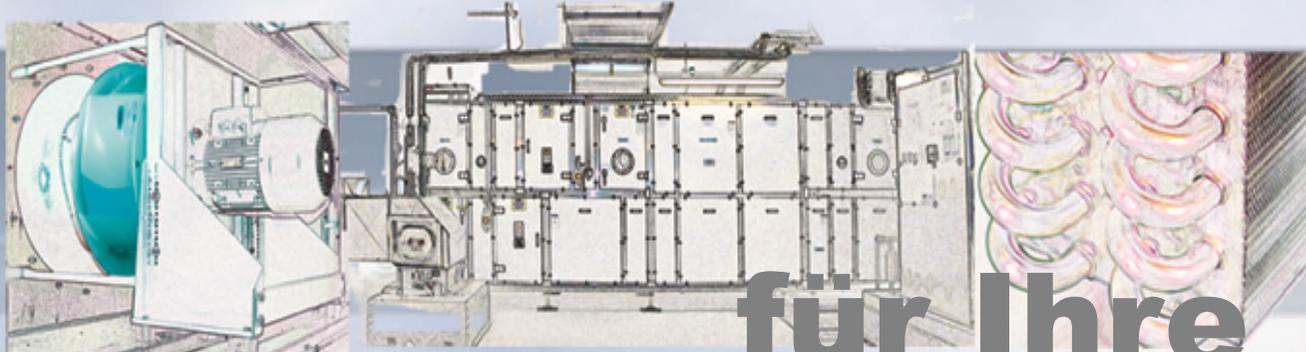
$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_Z = \dot{Q}_k$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta$$

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m$$

Die aus den Messwerten berechneten Leistungen der Luftseiten und des evtl. Zwischenmediums sollen gleich sein ($\pm 5\%$ nach EN 308). Weichen die Leistungen zu weit voneinander ab, stimmt die Messung nicht!

Herzlichen Dank



für Ihre
Aufmerksamkeit

Raumlufttechnik Messtechnik

Energierückgewinnung und Energieeffizienz-
technologien in der Lüftungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Dr. Christoph Kaup

c.kaup@umwelt-campus.de



Umwelt-Campus
Birkenfeld

H O C H
S C H U L E
T R I E R