



WISSEN

Messtechnik

[siemens.com/buildingtechnologies](https://www.siemens.com/buildingtechnologies)

SIEMENS

Inhalt

1	Messtechnische Grundlagen	7
1.1.	Allgemeines.....	7
1.2.	Messgröße	10
1.3.	Messwert (Messergebnis).....	11
1.4.	Messprinzip	11
1.5.	Messverfahren	11
1.6.	Messen durch Zählen.....	13
1.7.	Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler	13
1.8.	Messstrecke / Messeinrichtung.....	14
1.9.	Gerätetechnische Begriffe.....	18
1.10.	Bedienungsregeln für Messinstrumente.....	21
2	Übertragungsverhalten.....	22
2.1.	Allgemein	22
2.1.1.	Statisches Verhalten	22
2.2.	Dynamisches Verhalten	22
2.2.1.	Ohne Verzögerung.....	23
2.2.2.	Mit zeitlicher Verzögerung.....	24
2.2.3.	Mit Verzögerung durch ein Speicherglied	24
2.2.4.	Mit Verzögerung durch mehrere Speicherglieder	25
2.3.	Zeitkonstanten von Temperaturfühler	25
3	Toleranzen und Messfehler.....	27
3.1.	Die Toleranz.....	27
3.1.1.	Statische Toleranz	27
3.1.2.	Dynamische Toleranz	27
3.2.	Messfehler.....	28
3.2.1.	Statische Fehler	28
3.2.2.	Dynamische Fehler	29
3.3.	Zeitpunkt von Messungen	31
3.4.	Fehlersuche	31
4	Messgrößen in der HLK-Technik.....	32
4.1.	Allgemeines.....	32
4.2.	Temperatur.....	32
4.2.1.	Material-Ausdehnung	33
4.2.2.	Widerstandsänderung	33
4.3.	Luftfeuchte	35
4.3.1.	Messprinzipien für die relative Feuchte [% r.F.].....	36
4.3.2.	Messprinzip der kapazitiven Feuchtemessung	38
4.3.3.	Messprinzip für die absolute Feuchtigkeit (x).....	38
4.4.	Luftqualität.....	39
4.4.1.	CO ₂ -Fühler	39
4.4.2.	Mischgas-Fühler.....	40
4.4.3.	Feinstaub	42
4.4.4.	Andere Indikatoren.....	42

4.5.	Druck, Volumenstrom und Geschwindigkeit.....	43
4.5.1.	Messverfahren zur Volumenstromermittlung.....	43
4.5.2.	Grundlagen.....	44
4.5.3.	Bernoulli-Gleichung	45
4.5.4.	Ausflussgeschwindigkeit und Massenstrom	45
4.5.5.	Wirkdruckverfahren	46
4.5.6.	Geschwindigkeits-Messprinzip	47
4.5.7.	Durchflussmessung	49
4.6.	Messung in Gasen / Luft und Flüssigkeiten.....	50
4.6.1.	Prandtl'sches Staurohr	50
4.6.2.	Schrägrohr-Manometer	51
4.6.3.	U-Rohrmanometer	52
4.6.4.	Ringrohrmanometer.....	52
4.6.5.	Elastische Druckmesser	52
4.6.6.	Federbelastete Membranen und Bälge	54
4.6.7.	Nutzung elektrischer Effekte (in Gas und Flüssigkeit).....	55
4.6.8.	Flügelradanemometer	56
4.6.9.	Hitzdrahtanemometer	56
4.7.	Messung in Flüssigkeiten	57
4.7.1.	Füllkammerzähler	58
4.7.2.	Verdrängungszähler	58
4.7.3.	Flügelradzähler	58
4.8.	Wärme-Mengenmessung	59
4.9.	Sonnenstrahlungsfühler.....	61
4.10.	Windfühler	61
5	Fühlerplatzierung	62
5.1.	Strömungsbilder, Geschwindigkeitsprofile.....	62
5.2.	Die Zeitkonstante bei Fühlern in Flüssigkeiten.....	63
5.3.	Platzieren eines Fühlers	63
5.4.	Fremdeinflüsse	64
5.5.	Messprobleme	64
5.6.	Beispiele zum Platzieren von Fühlern	65
5.7.	Temperaturmessung in Wasser	67
5.8.	Temperaturmessung in Luft.....	68
5.9.	Messen der Außentemperatur bzw. der Witterung.....	69
5.10.	Temperaturmessung im Luftkanal	70
5.11.	Raumtemperaturmessung	73
5.12.	Geschwindigkeitsmessung	74
5.12.1.	Geräte zur Geschwindigkeitsmessung	74
5.12.2.	Geschwindigkeitsfühler.....	75
5.12.3.	Platzieren des Druckfühlers.....	77

6	Messkonzept / Messplanung.....	80
6.1.	Messkonzept.....	80
6.2.	Messplanung.....	80
6.2.1.	Organisatorische Planung.....	81
6.2.2.	Technische Planung.....	81
6.2.3.	Auswertung von Messungen.....	82
6.2.4.	Schlussprotokoll.....	82
6.2.5.	Checklisten.....	83

1 Messtechnische Grundlagen

1.1. Allgemeines

Der Begriff „Messtechnik“ definiert die Gesamtheit der Verfahren und Geräte zur empirischen Bestimmung (Messung) zahlenmäßig erfassbarer Größen in Wissenschaft und Technik. Aufgaben der Messtechnik sind außerdem die Überprüfung der Einhaltung von Messtoleranzen, Verbrauchszählung, Produktionsüberwachung, sowie allgemein (im Rahmen der Mess- und Regeltechnik) die Steuerung technischer Vorgänge durch Regelung nach Messwerten.

Das präzise Messen von physikalischen Größen ist im Zeitalter der Gebäudeleittechnik und Facility Management (Bewirtschaftung, Betrieb und Instandhaltung von Gebäuden) von großer Bedeutung. Entscheidungen für Veränderungen oder Aussagen zu Energieverbrauchszahlen und Gebäudeunterhaltskosten sind von der Genauigkeit der erfassten Messwerte abhängig. Eine exakte Messwerterfassung hat im Regelkreis einen hohen Stellenwert für die Genauigkeit und Stabilität des Regelergebnisses. Die Auswahl der richtigen Messeinrichtung ist entscheidend für ein richtiges Messergebnis, das richtige (zuverlässige) Messergebnis wiederum ist wichtig für eine aussagekräftige Beurteilung.

Die Grundbegriffe der Messtechnik sind in den Normen DIN 1319 und VDI/VDE26000ß, Blatt 2 definiert. In der Schweiz ist das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) zuständig für das gesetzliche Messwesen. Eine Liste von Eichämtern und Eichinstituten ist dort zu finden.

Messgeräte

Messgeräte haben die Aufgabe, physikalische Größen wie Druck, Temperatur, Feuchte oder Verbrauchsmengen, z.B. von Energie, Brennstoffen, Volumenströmen usw. zu erfassen, zu überwachen oder die Aufdeckung von Fehlern oder Verlusten zu ermöglichen. Sie sind ein wichtiges Hilfsmittel für eine wirtschaftliche Betriebsführung.

Sensor (Messfühler)

Mit der Entwicklung neuer Technologien, vor allem der Mikroelektronik, entstand der Begriff Sensor (lat. sensus "Wahrnehmung") als Synonym zum Begriff Messfühler. Es ist derjenige Teil einer Mess- oder Registriervorrichtung, der unmittelbar der zu messenden oder zu erfassenden Größe ausgesetzt wird; auch Bezeichnung für eine auf elektromagnetische Strahlung (z.B. Infrarotwellen) oder bei Berührung (z.B. Sensortaste) ansprechende Vorrichtung.

Der Sensor enthält mindestens ein Messelement und die Gerätetechnik zur Erfüllung der Messaufgabe. Er liefert ein standardisiertes elektrisches Messsignal, z.B. 0 (4)...20 mA oder 0...10 V oder ändert seinen elektrischen Widerstand in Abhängigkeit vom Messwert. Diese Widerstandsänderung kann auch genormt sein, z.B. nach DIN. In größeren Anlagen wird oft mit vielen Sensoren gemessen. Dabei werden die Messwerte auf Mess- oder Schalttafeln oder auf einer digitalen Erfassungseinheit (z.B. PC, Automationsstation, Analyzer, ...) zusammengefasst.

Wichtige Begriffe

Folgende Begriffe sind in der Messtechnik wichtig und sollten nicht verwechselt werden:

- Messen
- Prüfen
- Eichen
- Kalibrieren
- Justieren

Messen

- Feststellen des Wertes x einer physikalischen Größe, der Messgröße, durch Vergleich mit einer gleichartigen Normgröße.
- Feststellen, wie oft in einer zu messenden physikalischen Größe eine gleichartige, im Voraus festgelegte Masseinheit enthalten ist.



Fig. 1-1 Prinzipieller Vorgang des Messens (Quelle: pixabay.com)

- 1 Messgröße (Physikalische Größe Länge m)
- 2 Messeinrichtung – Vergleichsnorm (Meterstab)
- 3 Messwert (Distanz in cm)

Prüfen

Prüfen bedeutet feststellen, ob ein zu prüfender Gegenstand vorgegebene Bedingungen erfüllt. Beurteilt werden Fehlergrenzen und Toleranzen und man unterscheidet zwischen der objektiven und der subjektiven Prüfung.

Beispiel Raumtemperatur:

Subjektive Prüfung (gefühlsmässig):	Es ist Ihnen zu warm und Sie öffnen das Fenster.
Objektive Prüfung (Erhalt eines Messwerts):	Sie messen die Temperatur und stellen fest, es ist 26 °C.

Die Arbeitsabläufe Prüfen und Messen liegen eng beieinander.

Eichen

Das Eichen ist eine amtliche Tätigkeit, die in der Measurement Instruments Directive (abgekürzt "MID", deutsch: Europäische Messgeräte-Richtlinie 2008/118/EG) geregelt ist. Diese europäische Richtlinie wurde 2006 in deutsches Recht umgesetzt und ersetzt alle vorangegangenen Eichvorschriften. Die Eichung ist ein Spezialfall der Kalibrierung. Der Eichpflicht unterliegen alle Messgeräte, deren Messgenauigkeit im öffentlichen Interesse liegt, das heißt, deren Ergebnisse zur Festsetzung von Preisen verwendet werden wie z.B. Durchflussmessgeräte an Zapfsäulen an der Tankstelle oder Waagen im Supermarkt.



Fig. 1-2 Durchflusstandard für Wasserzähler bis DN100 (Quelle: © Raimond Spekking / CC BY-SA 4.0 (via Wikimedia Commons), Eich-Messgefäß - Normal der nächste höheren Ordnung (4513), CC BY-SA 4.0)

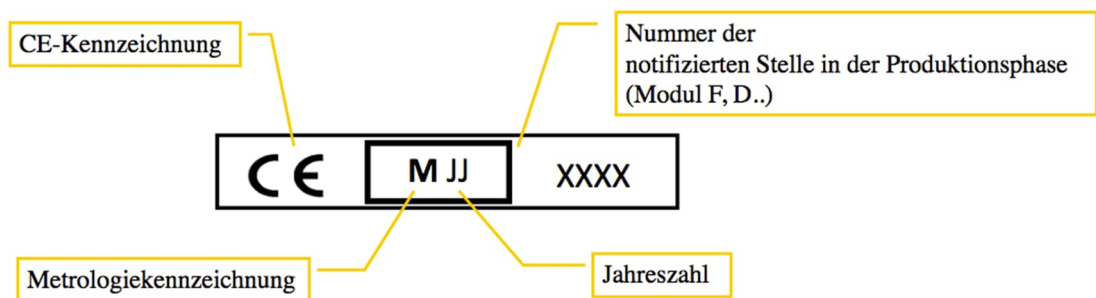


Fig. 1-3 MID Konformitätskennzeichnung, früher Eichmarke
(Quelle: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/dienstleistungen/zertifizierungsstelle/Praesentation_Europaeische_Messgeraeterichtlinie_HStolz_04-2017.pdf)

Kalibrieren (Eichen)

Durch Kalibrieren wird der Zusammenhang zwischen Anzeige (Ausgangsgröße) und Messwert (Eingangsgröße) festgestellt. Kalibrierungen finden unter genau festgelegten Referenzbedingungen statt, dabei sind keine technischen Eingriffe am Messgerät erforderlich. Siehe Anhang A: Kalibrierzertifikat.

Justieren (Abgleichen)

Sobald bei der Kalibrierung die Messabweichung zwischen dem Anzeigewert des Messgeräts und dem des Referenzgerätes unzulässig hoch ist, wird im Anschluss das Messgerät justiert. Das bedeutet: Im Unterschied zum Kalibrieren erfolgt beim Justieren ein Eingriff in das Messsystem.

Nullpunkt-Einstellung

Die Kontrolle der Nullpunkteinstellung ist eine wichtige Aufgabe bei der Anwendung von Messgeräten. Hochwertige Anzeigeegeräte haben oft eine Möglichkeit der Nullpunktkontrolle.

Achtung: Fehlerquelle bei nicht richtig eingestelltem Nullpunkt!

1.2. Messgröße

Die Messgröße ist meist eine physikalische Größe, deren Wert durch die Messung ermittelt werden soll. Beispiel für die Messgröße „Zeit“:

Messgröße	Formelzeichen	Einheiten
Zeit	t	Jahr, Monat, Woche, Tag, Stunde, Minute, Sekunde

Je genauer die Messung, desto größer ist auch der messtechnische Aufwand.

Eine Messung ist ein komplexer Vorgang. Eine zuverlässige und repräsentative Messung ist die Voraussetzung für ein gutes Regelergebnis.

Wir erhalten ein Messergebnis, indem wir den gemessenen Wert mit einer bekannten „Vergleichsgröße“ vergleichen.

Vergleichsgröße

Grundsätzliche Voraussetzungen für jeden Messvorgang sind:

1. Eine eindeutige Definition der zu messenden Größe x (Messgröße)
2. Eine Konvention (gesetzliche Festlegung) über die Vergleichsgröße (z.B. Urkilo, Urmeter, etc.).

Beide Voraussetzungen sind nicht ohne weiteres gegeben:

Die Temperatur eines Körpers oder der Druck eines Gases sind z.B. einfache Messgrößen, für welche internationale Vereinbarungen festgelegt sind.

Für die Temperatur existieren z.B. als Fixpunkte der Eis- und der Siedepunkt des Wassers bei einem Druck von 1013 mbar (Meereshöhe). Zwischenwerte werden durch Vereinbarung über die Interpolation mit Standard-Platin-Widerstandsthermometern definiert.

Andere Größen, wie z.B. die „Behaglichkeit“ oder die „Luftqualität“, lassen sich meistens nicht nur mit einer physikalischen Größe beschreiben, sondern sind oft mit einer Kombination beschrieben (z.B. Raumlufttemperatur und Raumluftfeuchte für Behaglichkeit). Oft sind diese auch mit menschlichem Empfinden verbunden, was zu einer subjektiven Bewertung des Zustandes führt.

Basiseinheiten

Durch das Internationale Einheitensystem SI (Système International d'Unité), wie wir es heute kennen, wurde eine übersichtliche Ordnung bezüglich der Masseinheiten geschaffen:

Größe	Einheit	Zeichen
Temperatur	Kelvin	K
Länge	Meter	m
Zeit	Sekunde	s
Stromstärke	Ampère	A
Masse	Kilogramm	kg
Lichtstärke	Candela	cd
Stoffmenge	Mol	mol

Tabelle 1.1 Basiseinheiten des SI-Systems

1.3. Messwert (Messergebnis)

Der Messwert ist der als Abbild einer Messgröße ermittelte und am Ausgeber (Anzeigeskala) dargestellte Wert. Er wird als Produkt aus Zahlenwert und Einheit der Messgröße angegeben.

Messgröße	Messwert (Zahlenwert)	Einheit
Zeit	3	h

1.4. Messprinzip

Zur Ermittlung der Messgrößen werden bestimmte Messprinzipien verwendet.

Das Messprinzip ist die charakteristische physikalische Erscheinung, die bei der Messung benutzt wird. Zur Temperaturmessung können z.B. folgende Messprinzipien angewendet werden:

- Längenausdehnung
- Strahlung
- Thermoelektrischer Effekt
- Änderung des elektrischen Widerstands

Die praktische Anwendung eines Messprinzips führt auf ein Messverfahren. Man unterscheidet direkte und indirekte Messverfahren.

1.5. Messverfahren

Direkte Messverfahren

Beim direkten Messverfahren – auch Vergleichsverfahren oder relatives Messverfahren genannt – wird der gesuchte Messwert der Messgröße durch Vergleich mit einem Bezugswert derselben Messgröße gewonnen. Unter die direkten Messverfahren können auch Messungen eingeordnet werden, bei denen der Messwert unmittelbar ohne ergänzende Rechnung, meist aus der Anzeige eines einzelnen Messgeräts erhalten wird (Beispiel Widerstandsthermometer: Widerstand entspricht Temperatur).

Indirekte Messverfahren

Beim indirekten Messverfahren wird der gesuchte Wert einer Messgröße auf andersartige physikalische Größen zurückgeführt. Aus diesen Größen ermittelt man den Messwert unter Verwendung der vorgegebenen physikalischen Beziehung (Größengleichung). Beispielsweise wird für eine Temperaturmessung eine Widerstandsmessung eines Metalls hinzugezogen.

Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach analogen und digitalen Messverfahren:

Analoge Messverfahren

Ein Messverfahren ist analog, wenn der Messgröße durch das Verfahren oder die Einrichtung eine Ausgangsgröße zugeordnet wird, die eine eindeutige, stetige Darstellung der Messgröße ist. Meist erscheint der Messwert innerhalb des Messbereichs als stetige, verschiebbare Stellung einer Marke (Zeiger) gegenüber einer Skala.

Vorteile:

Die analoge Messung wird verwendet, wo Trendmessung und schnelles, visuelles Erfassen und Bewerten eines Messwertes (Zeigerausschlag, Wertigkeit) erwünscht ist.



Fig. 1-4 Analogmultimeterskala
(Quelle: : Wikipedia, Urheber: Saure, CC BY-SA 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AMM_Skalen_lin.jpg#/media/File:AMM_Skalen_lin.jpg)

Digitale Messverfahren

Ein Messverfahren ist digital oder eine Messeinrichtung arbeitet digital, wenn die Messgröße zeitdiskret erfasst und durch ein Wandlungsverfahren einer Ausgangsgröße zugeordnet wird, bei dem die Messgröße durch feste, kleinste Schritte zahlenmässig dargestellt wird (Quantisierung der Messgröße). Der Messwert erscheint hier als Summe von Quantisierungseinheiten oder von Impulsen.



Fig. 1-5 Digitale Messanzeige
(Quelle: Wikipedia, Urheber: Saure 10:12, 14. Dez. 2009 (CET) - Selbst fotografiert, CC BY-SA 3.0 de
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12631312>)

Vorteile:

Die Messwerte lassen sich ausdrucken, speichern, elektronisch übertragen und weiterverarbeiten. Eine bequeme Ablesung ist möglich, da nur eine Ziffer oder eine Ziffernfolge zu erfassen ist.

Messgröße	Messprinzip	Messverfahren	Messeinrichtung
Temperatur	Längenänderung	direkt, analog	Bimetall
	Volumenänderung	direkt, analog	Thermometer
	Änderung des elektrischen Widerstands	direkt, analog	Messbrücke, Widerstandsthermometer
Feuchte	Längenänderung	indirekt, analog	Hygrometer
	Temperaturvergleich	indirekt, analog	Thermometer
	Kapazität	direkt, analog	Diffusion
Druck	elastische Verformung	direkt, analog	Druckdose
	Auswölbung einer Membrane	direkt, analog	Membrane
Volumenstrom	Differenzdruck (Blende)	indirekt, analog	Messblende, Manometer
	statischer und dynamischer Druck	indirekt, analog	Staurohr
	Ultraschall, Laufzeit-Differenz	indirekt, digital	Ultraschallzähler
Drehzahl	Zählung von Impulsen	indirekt, digital	Photozelle, Impulszähler

Tabelle 1.2 Beispiele für Messverfahren und Messeinrichtungen

1.6. Messen durch Zählen

Die Messtechnik bedient sich in Verbindung mit digitalen Messverfahren zunehmend des Zählens zur Ermittlung eines Messwertes.

Zählen

Zählen ist das Ermitteln der Anzahl von jeweils in einer bestimmten Hinsicht gleichartiger Elemente oder Ereignisse.

Gezählt werden z.B. Gegenstände, Impulse, Umdrehungen, Elementarteilchen.

Gezählt wird durch Sinneswahrnehmung oder vorwiegend mittels Zähleinrichtungen, z.B. Personenzähleinrichtungen im Kaufhaus für den Betrieb von Lüftungsanlagen.

Messwerte in Form von Zählungen können durch Datenverarbeitung in andere Messgrößen übergeführt werden.

Beispiel Geschwindigkeitsmessung:

- Zählen der Radumdrehungen pro Zeit
- Umrechnen in Geschwindigkeit (= Radumfang · Radumdrehungen / Zeit)

1.7. Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler

A/D-Wandler

Die in der Gebäude- und HLK-Anlagentechnik verwendeten Messwertfühler liefern als Messwert (in den meisten Fällen) ein analoges Strom-, Spannungs-, Widerstands- oder Drucksignal. Dieses Signal kann in der konventionellen Analogtechnik direkt verwendet werden.

In der Digitaltechnik muss ein analoges Eingangssignal (z.B. Messwert) in einen, dem Mikrocomputer verständlichen, digitalen Eingangswert umgesetzt werden.

Dies geschieht mittels eines Analog-Digital-Wandlers, kurz A/D-Wandler genannt.

Auch der umgekehrte Vorgang, also ein digitaler Ausgangswert in ein analoges Ausgangssignal umzusetzen, wird oft benötigt (z.B. Ausgabe eines analogen Stellbefehls). Das Bauteil für die Umsetzung digital/analog heißt D/A-Wandler.

Genauigkeit (Auflösung)

Die Genauigkeit (Auflösung) eines A/D- bzw. D/A-Wandlers ist von der Anzahl Stufen abhängig, mit welchen das Analogsignal dargestellt werden kann.

Beispiel: Ein 10-Bit-A/D-Wandler kann ein Analogsignal in $2^{10} = 1024$ Stufen unterteilen.

In der Fig. 1-6 wird der Vorgang anhand eines 3-Bit-A/D-Wandlers dargestellt, welcher nur $2^3 = 8$ Stufen erlaubt (sehr grobe Auflösung). x_1 ist die analoge Eingangsgröße für den A/D-Wandler. Die entsprechende digitale Ausgangsgröße x_2 ist in der Tabelle dargestellt. Das erste Bit von rechts steht für den Wert 1, das mittlere für den Wert 2 und das linke für den Wert 4. Wenn nun x_2 als Eingangsgröße eines D/A-Wandlers verwendet wird, erhält man als Ausgangsgröße das Analogsignal x_3 , das dem Digitalsignal x_2 entspricht.

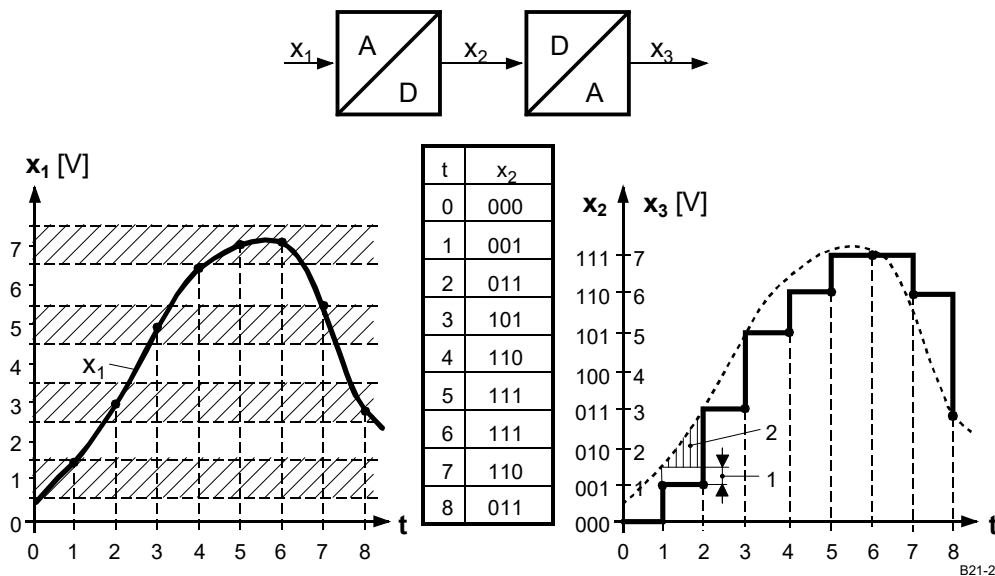


Fig. 1-6 Analog/Digital- und Digital/Analog-Wandler

- 1 Quantisierungsfehler
- 2 Fehler durch zeitdiskrete Messung (Das Signal x₁ läuft dem zeitdiskret gehaltenen Wert x₂ davon.)

Obwohl das Hintereinanderschalten eines A/D-Wandlers und eines D/A-Wandlers in der Praxis unsinnig ist, zeigt das Beispiel deutlich den durch die Digitalisierung entstehenden Fehler, den sogenannten Quantisierungsfehler (Fig. 1-6, rechts (1)) und den Fehler durch die zeitdiskrete Messung (Fig. 1-6, rechts (2)). Die Auflösung (hohe Bit-Zahl) ist entscheidend für die Genauigkeit des digitalen Messergebnisses.

1.8. Messstrecke / Messeinrichtung

Wo endet die Messstrecke, wo beginnt die Messeinrichtung?

Messstrecke

Messstrecken sind Anlagen oder Teile, in denen der zu messende Wert beeinflusst wird. Sie stellen keine Strecke im geometrischen Sinne dar. Die Messstrecke kann erst definiert werden, wenn die Funktion der Anlage und das Ziel der Messung bekannt sind. Je genauer dies der Fall ist, desto genauer kann die Messstrecke definiert werden.

Zur Messstrecke gehören auch Störgrößen, die von außen auf den zu messenden Wert einwirken.

Messeinrichtung

Die Messeinrichtung enthält alle Funktionen, welche zur Ausgabe (Anzeige) des Messwertes erforderlich sind. Allgemein wird für die Messeinrichtung der Begriff Messinstrument verwendet und als einziges Gerät betrachtet.

Übertragungsmittel

Das Übertragungsmittel (Kontaktmittel, z.B. Öl oder Wärmeleitpaste) bildet die Verbindung von der Messstrecke zur Messeinrichtung. Damit kann die Qualität einer Messeinrichtung wesentlich beeinflusst werden.

Anhand der Fig. 1-7 wird klar, dass hier nicht direkt die Wassertemperatur gemessen wird, sondern die Temperatur des Übertragungsmittels (Öl), welches die Nahtstelle zwischen Messstrecke und Messeinrichtung bildet.

Messstrecke

Das Wasser, das Rohr, die Tauchhülse und das Öl sind hier Bestandteile der Messstrecke. Aus der Physik wissen wir: Alle diese Materialien haben ein unterschiedliches Übertragungsverhalten.

Messeinrichtung

Der unten erweiterte Teil des Thermometers ist das Fühlelement, das Kapillarrohr bildet die Übertragung und das obere Ende der Messflüssigkeit mit der Skala bildet die Temperaturanzeige. Dies sind alle Teile der Messeinrichtung.

Es ist unschwer zu erkennen, dass ein Messresultat unter dem Einfluss zahlreicher Faktoren steht. Die verschiedenen Möglichkeiten sind im folgenden Schema dargestellt.

Messstrecke (1) und Messeinrichtung (6) bilden das Messsystem (10).

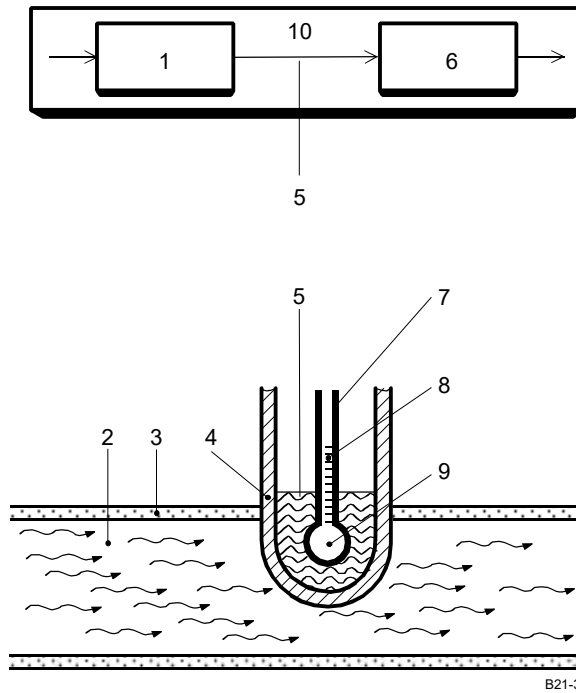


Fig. 1-7 Messung einer Wassertemperatur mittels Tauchhülse und Thermometer

- 1 Messstrecke (besteht aus 2, 3, 4 und 5)
- 2 Wasser, Medium, Messgröße
- 3 Rohrleitung, Anlage
- 4 Tauchhülse
- 5 Übertragungsmittel
- 6 Messeinrichtung (besteht aus 7, 8 und 9)
- 7 Thermometer
- 8 Anzeigeskala
- 9 Messflüssigkeit, Fühlerenheit
- 10 Messsystem (besteht aus 1 und 6)

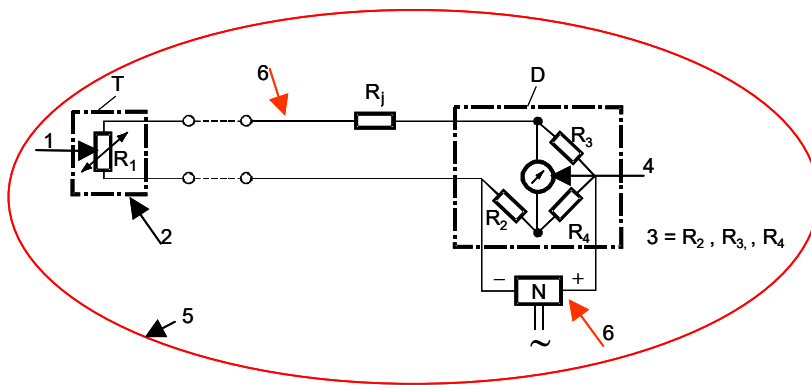


Fig. 1-8 Einfluss von Störgrößen auf das Messresultat

- 1 Messgröße
- 2 Messstrecke
- 3 Vergleichsgröße
- 4 Messwertausgabe
- 5 Messeinrichtung
- 6 Störgröße(n)
Leitungswiderstände, Spannungsschwankungen
aber auch bei der Behandlung des gemessenen Wertes z.B.
- Mensch (Auge)
- Interpretation
- Resultat der Messung

Messsignal-Verstärkung

Da oft eine Änderung der Messgröße nur eine geringe Änderung des Messwert-Aufnehmers bewirkt, muss das Messsignal verstärkt werden. Aus diesem Grund befindet sich meistens ein Verstärker nach dem Wandler oder unmittelbar nach dem Fühler. Die Verstärkung erfolgt dadurch, dass das Messsignal mit einem konstanten Faktor multipliziert wird. Anstelle eines Verstärkers kann auch ein Rechensystem angeordnet sein, in welchem mit dem Messsignal gewisse mathematische Operationen vorgenommen werden.

Fernübertragung

Sind die Elemente der Messeinrichtung voneinander entfernt, wird eine Fernübertragung der Signale notwendig. Diese Übertragung kann z.B. durch elektrische Leitungen, Druckleitungen oder auch drahtlos erfolgen.

Bei jeder Übertragung von Messwerten können Informationen verloren gehen oder (besonders bei analogen Signalen) verfälscht werden. Dieser Informationsverlust führt zu Fehlanzeigen und Fehlresultaten, ein Hauptproblem der Messeinrichtung.

Anzeige

Soll der Messwert dem menschlichen Beobachter vermittelt werden, muss die Anzeige durch ein Sinnesorgan erfasst werden können. In beinahe allen Fällen wird das Auge angesprochen. Die meistverwendeten Anzeigen sind:

- Stellung eines Zeigers auf einer Skala (analog)
- Direkte Zifferanzeige (digital)
- Geschriebene Anzeige auf Papier

Messwertverarbeitung

Fällt eine große Anzahl von Messwerten an, welche später in irgendeiner Weise verwendet werden müssen, werden die Werte gespeichert und durch ein Rechensystem ausgewertet.

Bezeichnung	Thermoelement	Widerstands-Thermometer	Bimetall-Thermometer	Flüssigkeitsglas-Thermometer	Kabelfühler	Kanalfühler (für Feuchte)
Material von Fühler oder Füllung	FE-Konstantan, PtRh-Pt, Cu-Konstantan, NiCr-Ni	Platin, Nickel, Cu, Halbleiter-Keramik	Fe-Legierungen	Quecksilber, Alkohol	Cu, Ms glanz-vernickelt	Leiterplatte mit Elektronik: Kapazität = f (Feuchtigkeit)
Messbereich	-20...2000 °C	-200...700 °C	-20...250 °C	-200...500 °C	-10...100 °C	10...90 %rH
Empfindlichkeit	30...60 µV	0,4...0,6 % $\Delta R/K$ Halbleiter: 3 %/K	0,15 % / 100 K	bis 10 mm/K		
erreichbare Genauigkeit	0,5 K	0,1 K Halbleiter: 0,5 K	1,5 % v. Bereich	0,02 K		± 5 %
Einstellzeit des Fühlers in Wasser	1 s	1...10 s	1...20 s	5...20 s	62,5 s	-
Skala-Einteilung	linear	linear	linear	linear	linear	linear
spezielle Anwendung	für hohe Temperaturen, für Temperatur-Differenz (sehr genau: 0,01 K)	für niedrige Temperaturen, Fernmessung (Erwärmungsfehler)	billiges Luftthermometer (ggf.m.Schalter)	Labor- und Kontrollmessung	für erschwerte Platzverhältnisse	zur Messung der rel. Feuchte in Kanälen

Tabelle 1.3 Beispiele von Messeinrichtungen

1.9. Gerätetechnische Begriffe

Einteilung der Messgeräte

Messgeräte können z.B. nach folgenden Gesichtspunkten eingeteilt werden:

1. Nach der zu messenden Größe:
Temperatur, Druck, Feuchte, Geschwindigkeit, Energie usw.
2. Nach der Bauart:
 - Anzeigegerät als Hilfsmittel für die Bedienung
 - Schreibgeräte als Hilfsmittel für die Überwachung der Bedienung und nachträgliche Verfolgung von Betriebsvorgängen
3. Nach der Funktion:
Zählgerät zur Feststellung von Raubelegung, Verbrauchszahlen und zur Verrechnung
4. ...

Bestandteile eines anzeigenden Messgerätes

Bestandteile eines anzeigenden Messgerätes sind grundsätzlich:

- Der Messwertaufnehmer, Fühler (=Sensor) oder Geber, z.B. bei einem Feuchtemessgerät die Haarharfe
- Das Mess- oder Rechensystem
- Das Anzeigesystem (Zeiger, Skala, Display)

Messeinrichtung

Jede Messeinrichtung kann als "Black Box" dargestellt werden, welche als Eingangssignal die Messgröße hat und als Ausgangssignal einen Messwert als Abbild der Messgröße liefert.

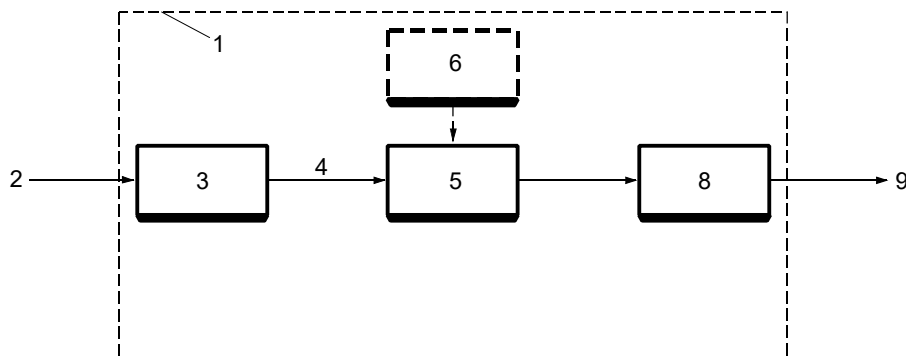


Fig. 1-9 Messeinrichtung bestehend aus mehreren Teilen

- 1 Messeinrichtung
- 2 Messgröße
- 3 Aufnehmer, Fühler
- 4 Messsignal
- 5 Anpasser, Messverstärker, Rechengerät
- 6/7 Hilfsgerät (z.B. Spannungsversorgung), Hilfsenergie
- 8 Ausgeber, Sicht-Ausgeber (Anzeiger, Schreiber, Zähler), Indirekte Ausgeber
- 9 Messwert

Die Messeinrichtung umfasst die Gesamtheit aller Geräte, die zum Aufnehmen einer Messgröße, zum Anpassen und Wiedergeben eines Messsignals sowie zum Ausgeben eines Messwertes erforderlich sind.

Messgeräte

Ein Messgerät kann im Normalfall aus einem einzigen Gerät bestehen (z.B. Flüssigkeits-Glasthermometer usw.). Im Allgemeinen jedoch sind Messgeräte nur Teile von Messeinrichtungen (z.B. Widerstandsthermometer, Messblende usw.).

Hilfsgeräte

Die Geräteteile einer Messeinrichtung, die für deren messtechnische Eigenschaften nicht so entscheidend sind, werden als Hilfsgeräte bezeichnet.

Hilfsenergie

Die Hilfsenergie ist die Energie, welche dem Messgerät zum Aufrechterhalten seiner Funktion zeitweise oder ständig zugeführt werden muss und nicht dem jeweiligen Eingangssignal entnommen wird.

Eingangs- und Ausgangssignal

Diese beiden Signalarten werden bei jedem Messgerät voneinander unterschieden. Das Eingangssignal kann die Messgröße selbst sein, man spricht dann von einem Messwert-Aufnehmer. Das Ausgangssignal kann eine Zeigerstellung sein, das Messgerät wird dann als Anzeiger (z.B. Thermometer) bezeichnet.

Messgeräte können auch mehrere Eingangs- oder Ausgangssignale haben.

Messbereich

Der Messbereich ist der Teil des Anzeigebereichs, für den der Fehler der Anzeige innerhalb vorgegebener Grenzen bleibt. Messbereich und Anzeigebereich können identisch sein. Es gibt auch Messgeräte mit mehreren Messbereichen mit unterschiedlichen Fehlergrenzen, z.B. Vielfachinstrument für Strom, Spannung und Widerstand. Der Messbereich ist gekennzeichnet durch den Messbereichsanfang und das Messbereichsende (Fig. 1-10. Messbereich 20 bis 140 °C). Der Messbereichsumfang, auch Messspanne genannt, ist die Differenz zwischen Messbereichsanfang und Messbereichsende (im vorgenannten Beispiel 120 K).

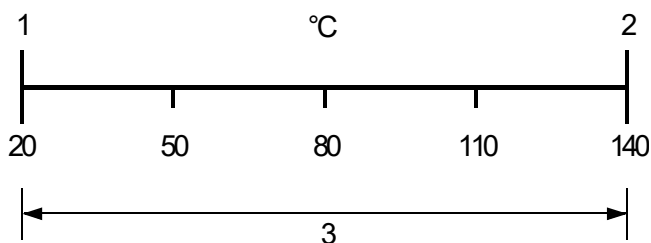


Fig. 1-10 Messbereich

- 1 Messbereichsanfang
- 2 Messbereichsende
- 3 Messbereichsumfang

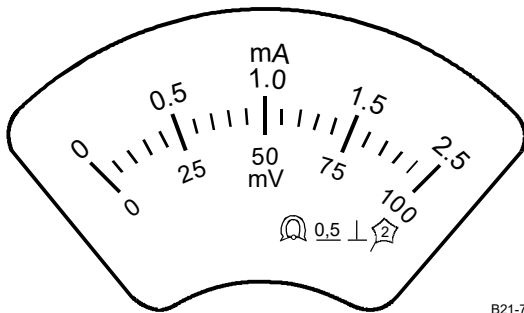
Anzeige und Genauigkeit

Bei anzeigenden und registrierenden Messgeräten kann man eine Unterscheidung treffen zwischen dem Messbereich (Bereich der Messgröße) und dem Signalbereich (Bereich des Messsignals). Ein Anzeiger zum Anschluss an ein NTC-Element hat beispielsweise den Messbereich 0 bis + 30 °C, was einem Signalbereich von 0 - 10 V entspricht.

Absolute und relative Fehler

Der Unterschied zwischen dem gemessenen und dem wahren Wert wird Fehler genannt und als absoluter Fehler in Einheiten der Messgröße oder als relativer Fehler in Prozent des Messbereich-Endwerts angegeben (siehe Kapitel 3, "Toleranzen und Messfehler").

Die Messgenauigkeit gibt die höchstzulässige positive und negative Abweichung des angezeigten Wertes an, bezogen auf den Skalen-Endwert; z.B. $\pm 1,5$ V vom Skalenendwert 150 V.



B21-7

Fig. 1-11 Beispiel Genauigkeit

Die Güteklasse oder Genauigkeitsklasse gibt den auf den Skalen-Endwert bezogenen plus-minus prozentualen, relativen Fehler an, den ein Messgerät haben darf, z.B. Güteklasse 0,5 = maximal erlaubter Fehler von $\pm 0,5 \%$ vom Skalen-Endwert (Fig. 1-11).

Damit der Messfehler in den auf dem Messgerät angegebenen Grenzen bleibt, ist die vorgeschriebene Anwendung zu beachten. Sinnbilder für die Anwendung von Messeinrichtungen sind in den Normen vorgegeben und auf den Messgeräten angebracht (vgl. Fig. 1-12).

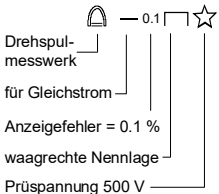
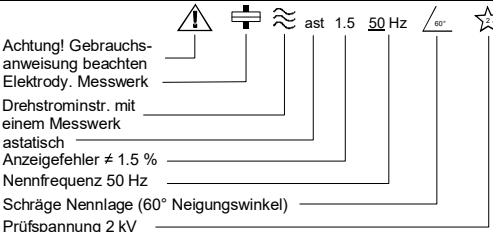
Beispiel		Nennlagen (Gebrauchslagen)		Stromart		Prüfspannungen				
	Drehspulmesswerk mit eingebautem Gleichrichter		Senkrechte Nennlage		Gleichstrom		Prüfspannung 500 V			
			Waagrechte Nennlage		Wechselstrom		Prüfspannung höher als 500 V (z.B. 2 kV)			
			Schräge Nennlage z.B. mit 60° Neigungswinkel		Gleich- und Wechselstrom		keine Spannungsprüfungen			
Besonderer Hinweis		Genauigkeitsklassen von Messinstrumenten						Nach VDE 0410		
	Achtung! Gebrauchsanweisung beachten!	Anzeigefehler in Prozent des Messbereich-Endwerts ergibt die Genauigkeitsklasse		Feinmessinstrumente			Betriebsmessinstrumente			
				0.1	0.2	0.5	1	1.5	2.5	5
Reihenfolge der Sinnbilder auf der Skala: 1. Achtung! Gebrauchsanweisung beachten! 2. Arbeitsweise des Messwerks 3. Art des gemessenen Stromes 4. Genauigkeitsklasse 5. Nennbedingungen und Einflussbereiche 6. Nennlage 7. Prüfspannung										

Fig. 1-12 Sinnbilder und Hinweise auf Messgeräten

Signalleitungen

Sie dienen zum Übertragen der Messsignale vom Messelement zum Messwerk, verbinden Messgeräte auf eine der physikalischen Natur des Messsignals entsprechende Weise (z.B. Zuleitungen zu Widerstandsthermometern). Über die Signalleitungen können auch Störungen an die Messeinrichtung gelangen und somit für Verfälschungen des Messergebnisses verantwortlich sein. Leitungswiderstände müssen gegebenenfalls kompensiert werden.

Messfehler, Fehlerquellen

Der von einem Messgerät ausgegebene Wert einer Messgröße ist grundsätzlich nicht fehlerfrei. Die Fehlergrenzen in der praktischen Messtechnik sind die vereinbarten oder garantierten äußersten Abweichungen nach oben oder nach unten von der Sollanzeige oder von einem sonst vorgeschriebenen Wert.

Jedes Messergebnis wird verfälscht durch Unvollkommenheit des Messgegenstandes, der Messgeräte und dem Messverfahren. Außerdem werden Messergebnisse verfälscht durch Einflüsse der Umwelt und der Beobachter. Verfälschende Umwelteinflüsse sind beispielsweise Temperatur, Luftdruck, Feuchte, fremde elektrische und magnetische Felder. Verfälschende persönliche Einflüsse sind abhängig von den Eigenschaften und Fähigkeiten der Beobachter, z.B.:

- Aufmerksamkeit
- Übung
- Sehschärfe
- Schätzungsvermögen
- Ausdauer

Im Kapitel 3 "Toleranzen und Messfehler" wird das Thema eingehend behandelt.

1.10. Bedienungsregeln für Messinstrumente

Damit Fehler durch falschen Einsatz und Anwendung der Messgeräte vermieden werden, ist es wichtig, die nachfolgenden Punkte zu beachten:

1. Gebrauchsanweisung beachten
2. Passendes Messgerät wählen
3. Passendes Zubehör verwenden
4. Nullstellung kontrollieren (justieren)
5. Betriebsgrenzen einhalten: Lage, Temperatur, usw.
6. Überlastung vermeiden
7. Mit dem grössten Messbereich beginnen
8. Passenden Messbereich wählen
9. Falls vorgesehen, Arretierung benutzen
10. Messgeräte schonend behandeln
11. Beim Aufbewahren von Vielfach-Messinstrumenten ist der größte Wechselspannungswert einzustellen

2 Übertragungsverhalten

2.1. Allgemein

Jedes Messsystem, die Messstrecke oder Messeinrichtung - oder Teile davon - übertragen physikalische Größen. Unter dem Begriff „übertragen“ versteht man das Beschreiben einer Reaktion. Diese zeigt z.B., wie sich bei einem Temperaturfühler der Ausgangswert (Widerstand) zum Eingangssignal (Temperatur) verhält.

Beim Übertragungsverhalten wird unterschieden zwischen dem statischen Verhalten und dem dynamischen Verhalten.

2.1.1. Statisches Verhalten

Beharrungszustand

Das statische Verhalten zeigt den Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße und der Ausgangsgröße im Beharrungszustand.

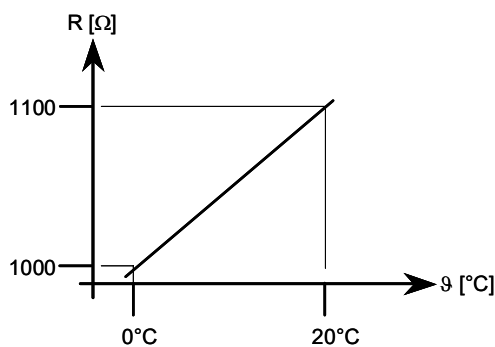


Fig. 2-1 Statische Kennlinie eines PTC-Temperaturfühlers

Aus Figur 2-1 ist ersichtlich, dass bei einer Temperatur von 0 °C der Fühlerwiderstand 1000 Ω und bei z.B. 20 °C ca. 1100 Ω beträgt. Eine Temperaturänderung von 20 K bewirkt also bei diesem Fühler eine Widerstandsänderung von 100 Ω. Aus diesen beiden Differenzen kann nun der Übertragungsbeiwert K_P (Steigung der Kennlinie) gemäß der folgenden Formel berechnet werden:

$$K_P = \frac{\Delta a}{\Delta e} = \frac{\Delta R}{\Delta \theta} = \frac{100 \, \Omega}{20 \, \text{K}} = 5 \, \frac{\Omega}{\text{K}}$$

2.2. Dynamisches Verhalten

Unter dem dynamischen Verhalten versteht man den Zusammenhang zwischen einer Eingangsgrößen-Änderung Δx_e und der Ausgangsgrößen-Änderung Δx_a in Abhängigkeit von der Zeit Δt .

Sprungantwort

Mittels einer sprungförmigen Änderung des Eingangssignals (Sprungfunktion) ist es möglich, das zu untersuchende System auf sein dynamisches Verhalten hin zu beurteilen. Das Ergebnis nennt man Sprungantwort.

Was geschieht in Fig. 2-2 mit der Ausgangsgröße x_a , wenn sich die Eingangsgröße x_e sprunghaft um einen beliebigen Wert Δx_e verändert?

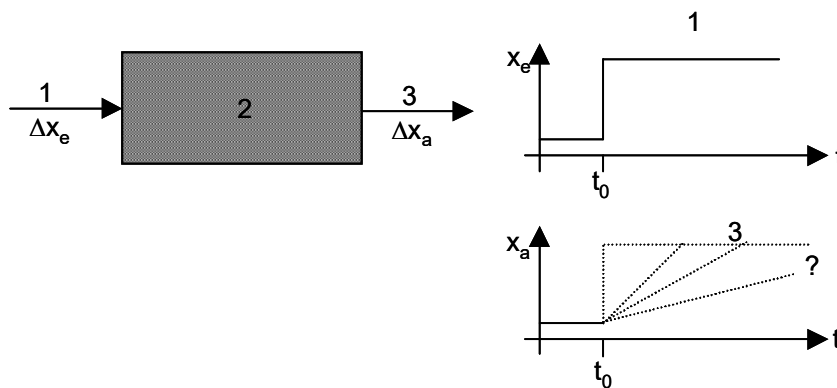


Fig. 2-2 Aufnahme des Zeitverhaltens mit der „Sprungfunktion“

- 1 Eingang, Messgröße, Aktion, Sprungfunktion
- 2 Messeinrichtung oder Messstrecke oder Messsystem
- 3 Ausgang, Messwert, Reaktion, Sprungantwort

In der Messtechnik gibt die Sprungantwort Auskunft darüber, warum und wie ein Messresultat sich verändert. Sie gewährt uns auch Einblick in die Art der Übermittlung und Übertragung von Größen und hilft uns bei der Beurteilung und Auswertung von Reaktionen.

Kriterium dieser Betrachtungen ist also immer der Zeitfaktor, d.h. die Größe der Verzögerung bis der Beharrungszustand erreicht ist. Diese Verzögerungen können durch sogenannte Masse- oder Zeit-Speicher entstehen.

Für die Praxis im HLK-Bereich genügt das Beschreiben der folgenden 4 typischen Übertragungen:

1. Ohne Zeitverzögerung (P-T₀-Strecke)
2. Mit Totzeitverhalten (P-T₀, T_I-Strecke)
3. Mit Verzögerung durch ein Speicherglied (P-T₁-Strecke)
4. Mit Verzögerung durch mehrere Speicher (P-T_n-Strecke)

2.2.1. Ohne Verzögerung

Wird in Fig. 2-3 das Stellorgan (y) plötzlich um einen bestimmten Hub geöffnet (Sprungfunktion), so ergibt dies beim Messfühler „Volumenstrom“ gleichzeitig eine Messgrößenänderung. Starten z.B. mit 10 % Öffnung.

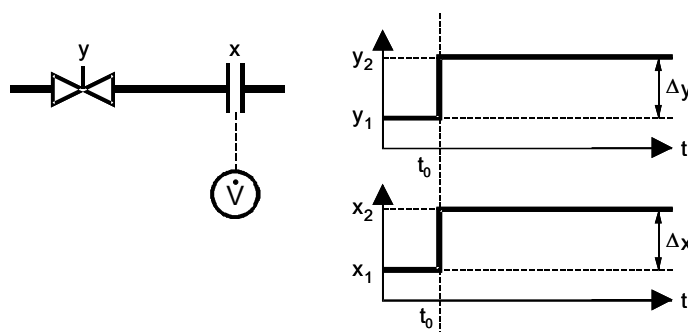


Fig. 2-3 Übertragung ohne Zeitverzögerung, z.B. Volumenstromänderung

2.2.2. Mit zeitlicher Verzögerung

Wird in das Stellorgan plötzlich um einen bestimmten Hub geändert, so verändert sich auch verzögerungsfrei die Mischwassertemperatur im Ventil. Zwischen Stellorgan und Messfühler „Temperatur“ besteht aber eine Distanz. Diese muss das Mischwasser zuerst zurücklegen, bis der Messfühler die Änderung erfasst. Diese Transportzeit wird als Totzeit T_t bezeichnet.

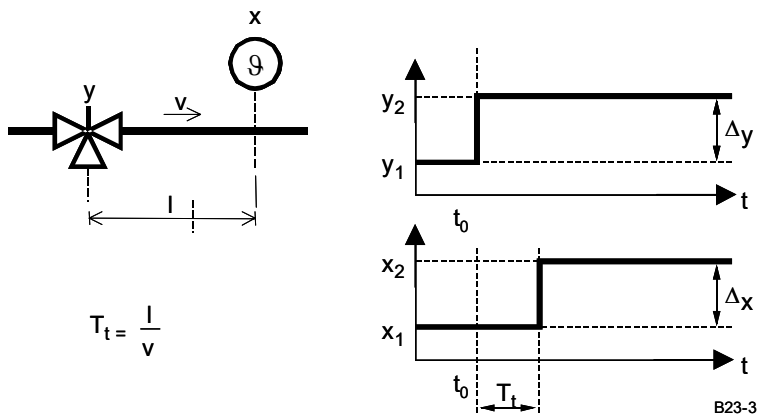


Fig. 2-4 Übertragung mit Totzeit (T_t), z.B. Mischwassertemperatur

2.2.3. Mit Verzögerung durch ein Speicherglied

Wird das Heizelement in Fig. 2-5 um eine Stufe höher geschaltet, so erhöht sich die Wassertemperatur im Behälter nach einer e-Funktion.

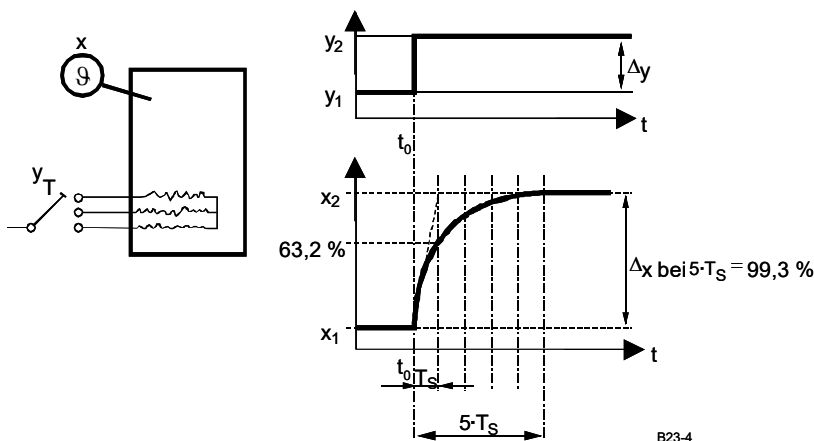


Fig. 2-5 Übertragung durch Verzögerung mit nur einem Speicherglied, z.B. Erwärmung von Wasser in einem Behälter

Durch die anfänglich große Temperaturdifferenz zwischen dem Wärme abgebenden und dem Wärme aufnehmenden Medium ist der Temperaturanstieg anfänglich ziemlich steil. (Die Anfangs-Änderungsgeschwindigkeit des Übertragungssprungs in diesem Beispiel ist abhängig von Masse und Heizleistung). Durch die fortlaufende Erwärmung des Mediums wird die Temperaturdifferenz aber immer geringer, wodurch sich die Anstiegsgeschwindigkeit laufend vermindert. Durch das Anlegen einer Tangente am steilsten Kurventeil, gezogen bis zum maximal erreichbaren Wert der Wassertemperatur, erhält man die Zeitkonstante T_s (oder T oder $\tau = \text{tau}$)

Zeitkonstante T_s (oft auch T oder τ)

Die Zeitkonstante T_s ist jene Zeit, welche die Ausgangsgröße x_a für 100 % Änderung bei gleichbleibender anfänglicher Änderungsgeschwindigkeit brauchen würde.

Oder vereinfacht: $1 T_s$ ist der Zeitabschnitt, der vergeht, bis die Messgröße x einen Wert von 63.2 % der ganzen Änderung Δx erreicht hat.

Die weiteren Änderungen nach T_s verhalten sich wieder gleich, d.h. sie erfolgen in jeweils gleichen Zeitabständen immer wieder um den gleichen prozentualen Anteil vom verbliebenen Rest, bis nach 5 Zeitkonstanten 99.3 % des Endwertes erreicht sind. Dies muss bei jeder Messung berücksichtigt werden.

2.2.4. Mit Verzögerung durch mehrere Speicherglieder

Eine plötzliche Änderung des Stellorgans in Fig. 2-6 um den Betrag Δy bewirkt am Messfühler x (Raumlufttemperatur ϑ) vorerst nur einen flachen Anstieg mit kleiner Änderungsgeschwindigkeit. Im Bereich der Wendetangente ist die Anstiegsgeschwindigkeit der Raumlufttemperatur größer. Anschliessend verringert sie sich wieder bis der Endwert erreicht ist.

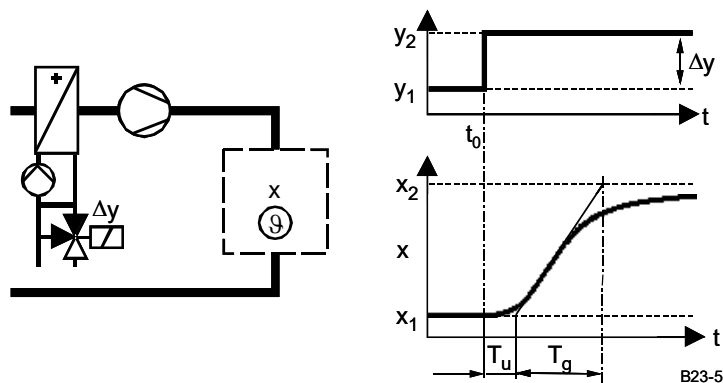


Fig. 2-6 Übertragungsverhalten mit zwei oder mehr Speichergliedern, z.B Erwärmung des Raumes

Der erste Zeitabschnitt wird als Verzugszeit T_u , der zweite als Ausgleichszeit T_g bezeichnet.

Je Größer die Anzahl der Speicherglieder (Raumluftvolumen, Zuluftrohrlänge, Wärmespeicherkapazität des Wärmetauschers, Wasserleitungslängen, ..), desto flacher verläuft der Anstieg der Temperaturänderung. Enthalten die Beispiele gem. Fig. 2-4 und Fig. 2-5 noch gleichzeitig Totzeitglieder, müssen diese selbstverständlich mitberücksichtigt werden.

Die Kenntnisse des Übertragungsverhaltens der einzelnen Komponenten der Messeinrichtung wie auch der Messstrecke erlauben es zu beurteilen, warum sich Messergebnisse nicht gleich wie die Eingangsgröße ändern und vor allem, was für Ursachen massgebend sind.

2.3. Zeitkonstanten von Temperaturfühler

Bei der Messung und Erfassung von Flüssigkeitstemperaturen in Rohrleitungen werden häufig Fühler mit Tauchhüllen eingebaut.

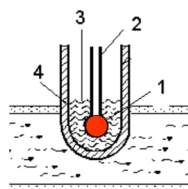
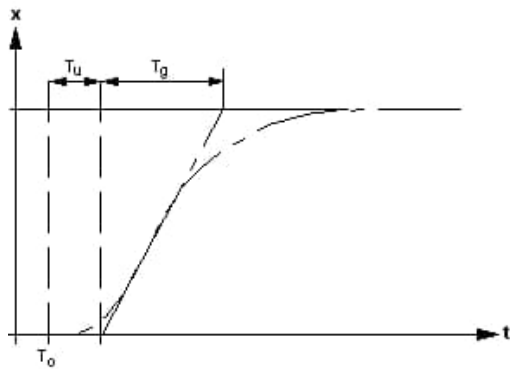


Fig. 2-7 Messfühler in der Tauchhülle

- | | |
|------------------------------|------------------------|
| 1 Messelement (NTC oder PTC) | 3 Öl- Glyzerinfüllung) |
| 2 Anschlussdrähte | 4 Tauchrohr |

Die Tauchhüllen bilden das erste Verzögerungsglied, der Luftspalt zwischen Tauchhülle und Messelement das zweite und die Zeitkonstante des Fühlers bildet das dritte Verzögerungsglied. Von diesen drei in Serie liegenden Verzögerungsgliedern ist jene des Luftspaltes am größten, da die Luft ein schlechter Wärmeleiter ist. Dieses schlechte Übertragungsverhalten lässt sich mit Öl oder Glyzerin stark verbessern (Fig. 2-7 (3)).



Anhaltswerte für die Kenngröße eines Temperaturfühlers:

Thermoelement:

$T_u = 1$ bis 5 s

$T_g = 5$ bis 25 s

Widerstandsthermometer:

$T_u = 2$ bis 5 s

$T_g = 40$ bis 100 s

Fig. 2-8 Übertragungsverhalten eines Temperaturfühlers

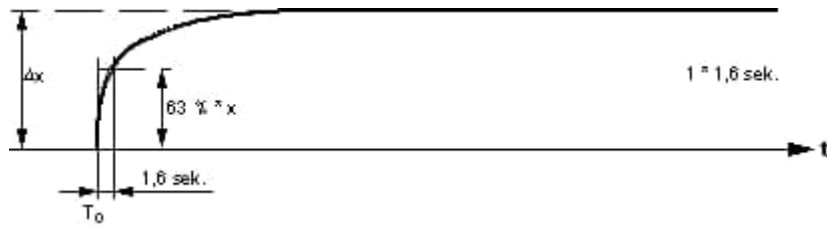


Fig. 2-9 Fühler im Wasser ohne Tauchhülle

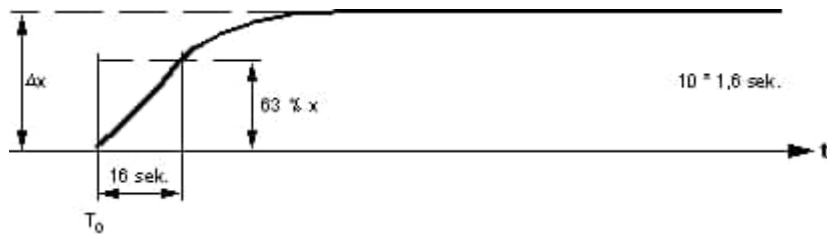


Fig. 2-10 Fühler in der Tauchhülle mit Ölfüllung

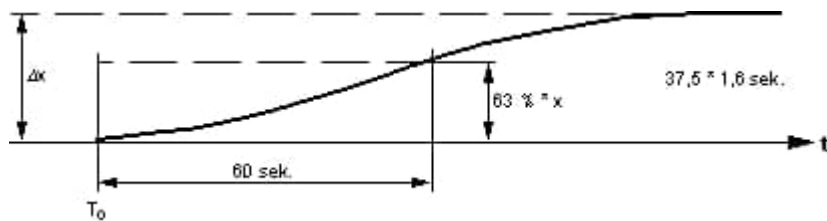


Fig. 2-11 Fühler in der Tauchhülle ohne Ölfüllung

3 Toleranzen und Messfehler

3.1. Die Toleranz

Eine Toleranz ist kein Fehler, sondern sie ist eine Grenze für die zulässige Abweichung einer Messung vom vorgeschriebenen Wert. Über- oder unterschreitet die Abweichung die Toleranzgrenze, so wird die Abweichung als fehlerhaft klassifiziert.

Toleranzen können als absolute Werte ($^{\circ}\text{C}$, bar, usw.) oder als relative Werte (in % des Messbereiches), asymmetrisch als plus-Toleranz (+) und minus-Toleranz (-), oder symmetrisch als plus-minus-Toleranz ($\pm$) angegeben werden. Beispiel: Bei einem Sollwert von $+ 20^{\circ}\text{C}$ und einer Toleranz von $\pm 1\text{ K}$ liegt der zulässige Messwert zwischen 19°C und 21°C , hat also ein Toleranzband von 2 K .

In der Mess- und Regeltechnik werden zwei Arten von Toleranzen unterschieden, nämlich die statische und die dynamische Toleranz.

3.1.1. Statische Toleranz

Die statische Toleranz ist die Abweichung vom gegebenen Wert (Sollwert) während des Beharrungszustandes einer Regelung (stabiler Zustand).

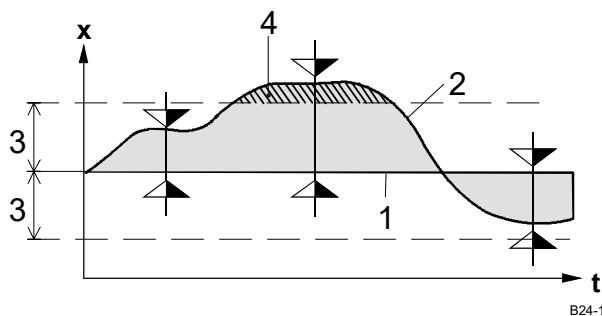


Fig. 3-1 Statische Toleranz
1 gewünschter Wert
2 fortlaufend gemessener Wert
3 Toleranz ($\pm$)
4 Fehler

3.1.2. Dynamische Toleranz

Die dynamische Toleranz ist die Abweichungsgröße, welche durch Bewegungsvorgänge entsteht. Es wird also nur die Abweichung während des nicht stabilen Zustands der Regelung, d.h. während des Ausregelvorgangs betrachtet.

Statische und dynamische Toleranz

Eine Toleranzangabe kann auch gleichzeitig beide Arten der zulässigen Abweichung enthalten, z.B.: Die zulässige statische Abweichung vom Sollwert ist $\pm 1\text{ K}$ und die zulässige dynamische Abweichung ist $\pm 0,5\text{ K}$. Solche Toleranzangaben sind bei hochempfindlichen thermodynamischen Prozessen oder Verfahren üblich, so bei Prüfräumen oder Prüfstrecken.

3.2. Messfehler

Meistens wird ein nicht erwartetes Messresultat als Messfehler ausgelegt, oder eine Differenz zu einer Kontrollmessung wird als Messfehler interpretiert. Ein falsches Messresultat muss aber nicht auch ein Messfehler sein.

Man unterscheidet zwischen systematischen Fehlern und zufälligen Fehlern:

- Systematische Fehler haben einen bestimmten Betrag und ein bestimmtes Vorzeichen, z.B. + 0,5 °C oder 0,1 bar und sind reproduzierbar. Erfassbare systematische Fehler können daher durch Korrekturen ausgeglichen werden.
- Zufällige Fehler schwanken ungleich nach Betrag und Vorzeichen; sie sind meist nicht erfassbar und machen das Ergebnis unsicher. Zufällige Fehler sind nicht reproduzierbar und können in einer Fehlerkurve wiedergegeben werden (häufig Normalenverteilung/gauss'sche Glockenkurve).

Was ist ein Messfehler?

Der Messfehler ist der Unterschied zwischen dem gemessenen Ist-Wert einer Messgröße (Messwert) und dem wahren Wert der Messgröße, wenn dessen Ursprung in der Messeinrichtung liegt.

$\text{Fehler} = \text{Messwert} - \text{wahrer Wert} = \text{absolute Fehlergröße}$.

Meistens wird ein nicht erwartetes Messresultat als Messfehler ausgelegt, oder eine Differenz zu einer Kontrollmessung wird als Messfehler interpretiert. Ein unerwartetes Messresultat muss aber nicht unbedingt ein Messfehler sein.

Falsche Messergebnisse, deren Ursprung in der Messstrecke oder in der Interpretation (Ablesung, Auswertung) liegen, sind keine Messfehler, sondern:

- Messkonzeptfehler, Planungsfehler, Montagefehler, Anlagenfehler
- Verhaltensfehler (Mensch), Interpretationsfehler, Auswertungsfehler

Messfehler lassen sich nicht immer im Voraus planmäßig erkennen und beheben. Sie treten in vielen Fällen nicht regelmäßig, sondern ungeordnet in Erscheinung. Messfehler lassen sich aber durch sorgfältige Planung verringern.

Eine Messung kann nie ideal, d.h. ohne Messfehler und ohne Messzeit realisiert werden. Es sind im Wesentlichen zwei Punkte, in denen die Messung vom idealen Verhalten abweicht. Diese werden nachfolgend erläutert.

3.2.1. Statische Fehler

Eine Messeinrichtung kann mit vernünftigem Aufwand nur begrenzt genau gebaut werden. Sie weist statische Fehler auf, die vom Messprinzip und von der gerätetechnischen Ausführung abhängen. Der Zusammenhang zwischen Messgröße und Ausgangssignal ist zudem oft nicht linear, d.h. der Übertragungsbeiwert ist nicht konstant. Dies kann sich im Laufe der Zeit auch ändern, wie z.B. durch Alterung.

Der statische Fehler ist eine Abweichung außerhalb der zulässigen Toleranz (Abweichung vom wahren Wert) während des Beharrungszustandes (stabiler Zustand - konstante Abweichung).

Empfehlungen

- Die Genauigkeit der Messeinrichtung muss der Regelaufgabe angepasst sein.
- Damit keine Verfälschungen der Messwerte durch Fremdeinflüsse stattfinden (z.B. am Tauchrohr oder am Rohr des Kanalfühlers), müssen die Einbauhinweise des Herstellers beachtet werden.
- Hinweise für die Fühlerplatzierung beachten (repräsentativer Ort, siehe Kapitel 5.12).

3.2.2. Dynamische Fehler

Auch die Messeinrichtung verfügt, wie alle anderen Regelkreisglieder, über ein bestimmtes Zeitverhalten, welches durch die Angabe einer Totzeit und Zeitkonstante oder durch die Verzugs- und Ausgleichszeit ausgedrückt wird. Fig. 3-2 zeigt einen grundsätzlichen Verlauf. In der Tabelle sind Anhaltswerte für die Kenngrößen von gebräuchlichen Temperaturfühlern angegeben.

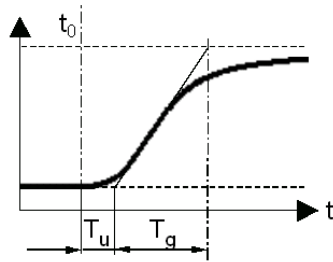


Fig. 3-2 Übertragungsfunktion eines Temperaturfühlers

T_u Verzugszeit

T_g Ausgleichszeit

Richtwerte der Kenngrößen eines Fühlers			
	Thermo-Element	Widerstands-Thermometer	Halbleiter
T_u	1 ... 5 s	2 ... 5 s	1 ... 5 s
T_g	5 ... 25 s	40 ... 100 s	5 ... 25 s

Natürlich sind die tatsächlichen Werte nicht nur vom verwendeten Messelement allein, sondern sehr stark von der Konstruktion des Gebers und seiner Einbauweise abhängig. Massig gebaute Fühler mit grosser Masse sind beispielsweise träge, sowie am Messort thermisch stark angekoppelte Einrichtungen (z.B. Tauchhülse am Rohr).

Der dynamische Fehler ist eine Abweichung außerhalb der zulässigen Toleranz (vom wahren Wert). Es wird nur die Abweichung während des instabilen Zustands beurteilt. Der dynamische Fehler gibt die Abweichung innerhalb eines bestimmten Zeitabschnittes an.

Während der Änderung einer Messgröße kann sich im Vergleich Eingang zum Ausgang das Resultat durch zwei Arten verfälschen:

1. Es gibt eine zeitliche Verschiebung.
2. Es gibt eine zeitliche Verschiebung und eine Veränderung der Ausgangsgröße.

Zeitliche Verschiebung

Wird einem System ohne Speicher, mit Totzeit, eine sinusförmige Eingangsgröße x_e zugeführt, so ergibt dies bei einem zeitlich linearen System eine Ausgangsgröße x_a mit derselben Frequenz wie diejenige der Eingangsschwingung, jedoch mit einer Phasenverschiebung (Zeitdifferenz).

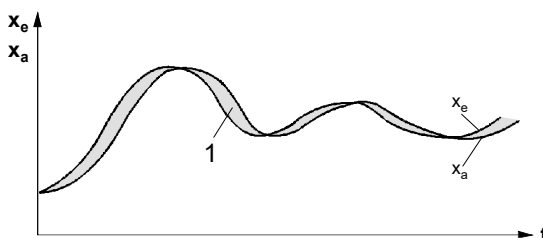


Fig. 3-3 Dynamischer Fehler an einer Strecke ohne Speicher, mit Totzeit

1 Dynamischer Fehler

Dieses Erscheinungsbild ist nur in einer P- T_0 , T_1 -Strecke möglich (Strecke nur mit Totzeit, siehe Abschnitt Übertragungsverhalten).

System mit Speicher

Hat das System einen oder mehrere Speicher (Massen), tritt ein weiterer Effekt hinzu Fig. 3-4. Der Wert des Ausgangs x_a entspricht nicht mehr dem effektiven Wert des Einganges x_e . Es erfolgt nicht nur eine Phasenverschiebung, sondern auch eine Verkleinerung der Amplitude (Größe).

Ändert sich die Eingangsgröße z.B. um $\Delta T = 10$ K, wird die Ausgangsgrößen-Änderung kleiner, z.B. $\Delta T = 5$ K.

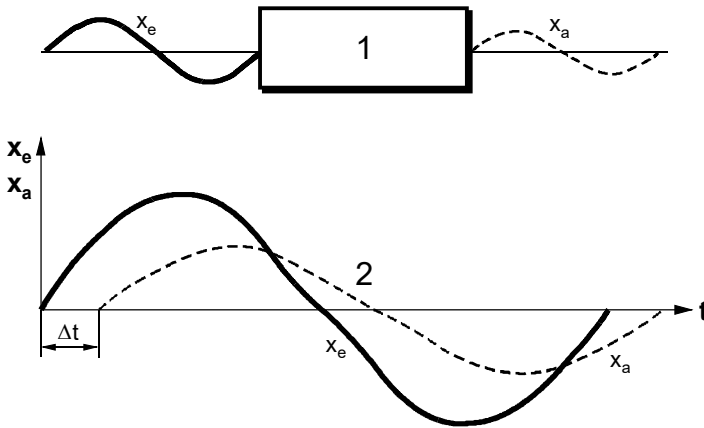


Fig. 3-4 Verschiebung der Amplitude durch einen Speicher

- 1 Messstrecke
- 2 Messresultat

Dieses Erscheinungsbild ist in P-T₁-Strecken (Strecken erster Ordnung) und P-T_n-Strecken (Strecken höherer Ordnung) möglich und kann zusätzlich mit Totzeit behaftet sein (siehe Kapitel 2, Übertragungsverhalten).

Da das ganze Messsystem eine Kette bildet, werden die Veränderungen auch in Reihe bis zum Resultat übertragen. Jeder Messsystemteil kann zusätzlich durch Störgrößen beeinflusst werden, welche ebenfalls das Messergebnis beeinflussen. Solche Gegebenheiten sind bei der Fehlerbestimmung zu berücksichtigen. Wenn solche Verzerrungen des Messergebnisses (Ablesung) in der Messeinrichtung passieren, also auf der Instrumentenseite, so ist es ein Messfehler, hervorgerufen durch die Wahl einer zu trägen Messeinrichtung.

Fehler entstehen auch bei Messungen, bei denen mehrere Messgrößen zur Bildung eines gemeinsamen Resultates notwendig sind. Wird auch nur eine der beteiligten Messgrößen in ihrem Wert oder zeitlich falsch auf die gemeinsame Recheneinheit übertragen, führt das mit dem im Rechner integrierten Multiplikationsfaktor zur proportionalen Vergrößerung des Fehlers.

Empfehlungen:

- Die Zeitkonstante der Messeinrichtung muss dem Übertragungsverhalten der Messstrecke entsprechen. Messgeräte mit relativ langsamer Reaktion können sehr gut geeignet sein für die Messung einer trägen Messstrecke. Für die Messung von schnellen veränderlichen Vorgängen aber muss die Messreaktion (Zeitkonstante) auch mindestens gleich schnell sein.
- Einbauvorschriften der Hersteller beachten, welche eine möglichst verzugsfreie Erfassung der Messgröße anstreben.
- Falsche Fühlerplatzierung in dem Sinne, dass die erfasste Messgröße für die beabsichtigte Regelaufgabe nicht repräsentativ ist. Z.B. ist die an einem gewissen Punkt gemessene Luftgeschwindigkeit nicht immer aussagekräftig für die mittlere Geschwindigkeit im Kanal.
- Distanz Stellort - Messort nur so groß wählen, wie sie für eine gute Durchmischung des Mediums erforderlich ist. Besteht zwischen dem Stellort und dem Messort eine zu große Distanz, so schlägt sich dies in einer gewissen Totzeit nieder. Je größer die Distanz und je kleiner die Mediumsgeschwindigkeit, desto größer ist die Totzeit.
- Mit vernünftigen Mediumsgeschwindigkeiten arbeiten (keine überdimensionierten Rohre und Kanäle).

3.3. Zeitpunkt von Messungen

Bei periodisch durchzuführenden Messungen müssen die Ablese-Intervalle regelmäßig sein. Bei unregelmäßigen Ablesungen entstehen Unklarheiten und Verzerrungen in Bezug auf die Interpretationen. Wie Fig. 3-5 zeigt, kann sonst ein momentan abgelesenes Resultat unter gewissen Umständen nicht richtig sein, da die Messgröße zum Zeitpunkt der Ablesung nicht im Beharrungszustand war. Die Messgröße erreicht zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt einen höheren oder tieferen Messwert.

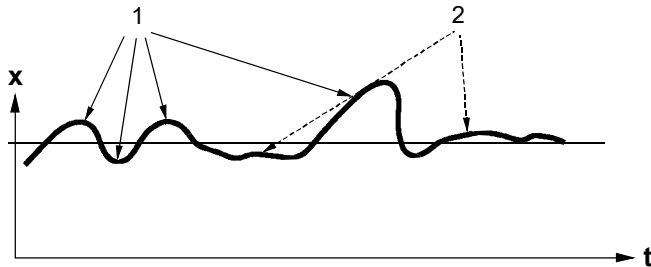


Fig. 3-5 Wann ist der richtige Zeitpunkt zum Ablesen?

- | | | |
|---|----------|---|
| 1 | Falsch: | Zeitpunkt der Ablesung nicht im Beharrungszustand |
| 2 | Richtig: | Zeitpunkt der Ablesung im Beharrungszustand |

3.4. Fehlersuche

Im Suchen des Fehlers liegt der Kern der Behebung. Hier wird auch der größte Zeitaufwand benötigt. Nebst der technisch-fachlichen Problematik kommt das ordnungsmäßige Aneinanderreihen von Arbeitsabläufen hinzu.

Unerlässlich ist der erste Schritt: Sich vergewissern, wie ein Fehler entsteht und wo sein Ursprung liegt. Es muss gedanklich versucht werden, den Werdegang des Fehlers nachzuvollziehen. So werden dem Entstehen von Fehlern Annahmen zugrunde gelegt. Diese Annahmen müssen durch einen Vergleich mit den technischen Unterlagen (Messplan - Daten - Anlagenschema) jedoch erst überprüft werden.

Solche Annahmen (auch Hypothesen genannt) haben immer ihren Anfang bei der Ausgangssituation des Fehlers (Hypothese ist eine Annahme ohne Beweis).

Vorgehensweise

Zur Beurteilung eines Messresultats müssen alle Faktoren aus der gesamten Messung berücksichtigt werden. Daher kann für das schnelle Auffinden eines Fehlers die folgende Fragestellung dienen:

- Welche Aufgabe hat die Messung?
- Wie sind die Messbedingungen (zulässige Abweichung, Toleranz-Garantie)?
- Wie ist das Prinzip der Messstrecke?
- Wie ist der Funktionsablauf Messstrecke zu Messeinrichtung?
- Wie ist das Prinzip der Messeinrichtung?

Diese Ausgangssituation ist der wichtigste Teil der Fehlersuche. Sie bildet die Grundlage jedes weiteren Vorgehens. Weiteres Vorgehen ist unzulässig, bevor der Ursprung eines Fehlers klar erkannt ist. Durch das Gedankenspiel - Beobachten, Annahmen, Überprüfen der Annahmen und Rekonstruktion des Fehlerherganges - muss ein klares Fehlerbild entstehen.

Bei der Suche nach der Ursache des falschen Messergebnisses drängen sich folgenden Fragen auf. Liegt die Ursache des falschen Messergebnisses:

- In der Messeinrichtung?
- In der Messstrecke?
- Beim menschlichen Verhalten?

4 Messgrößen in der HLK-Technik

4.1. Allgemeines

Die wichtigsten Messgrößen in HLK-Anlagen sind:

- Temperaturen von Wasser, Luft, ...
- Relative Luftfeuchte
- Luftqualität
- Druck
- Strömungsgeschwindigkeiten
- Volumenstrom

Messort

In der HLK-Technik geht es im Wesentlichen darum, in einem Raum ein definiertes Klima bereitzustellen. Dabei müssen die vorgenannten Größen in entsprechenden Toleranzen gehalten werden, damit z.B. die Behaglichkeit des Menschen nicht gestört wird oder die Raumluftbedingungen für einen Fabrikationsprozess eingehalten werden.

In diesem Zusammenhang kann man vier Messbereiche mit prinzipiell unterschiedlichen Randbedingungen unterscheiden:

- 1) Die Außenluft mit Extremzuständen:
 - Winter kalt, hohe relative Feuchte und geringe absolute Feuchte
 - Sommer heiß, in der Regel mittlere relative Feuchte, zeitweise hohe absolute Feuchte
- 2) Die Versorgungszentrale:
Hier befindet sich die Anlagentechnik zur Behandlung der Energieträger „Wasser und Luft“
- 3) Transportwege:
Sie bestehen aus Rohrleitungen (Vorlauf - Rücklauf), Luftkanälen (Zuluft - Abluft) mit entsprechenden Verzweigungen (Verteilen)
- 4) Räume:
Räume mit unterschiedlichen Einrichtungen, Kontaktflächen nach außen oder zu Nebenräumen mit/ohne Fensterflächen

An all diesen Stellen oder Anlagenteilen werden zur Kontrolle oder für die Regelung Messorte festgelegt, d.h. Messstellen für die jeweilige Messgröße.

Für alle Messstellen besteht grundsätzlich die Forderung, zu verschiedenen Messzeiten unter gleichen Randbedingungen dieselben Messergebnisse zu erhalten. Dies setzt absolut genaue Messgeräte voraus und der Messtechniker muss sich am Messort jeweils die Frage nach dem richtigen Messverfahren - dem richtigen Fühler - sowie dem Ablauf der Messung stellen.

4.2. Temperatur

Die Temperatur ist ein Maß für den Wärmezustand eines homogenen Stoffes, genauer ein Maß für die mittlere Bewegungsenergie seiner Moleküle.

Die bekanntesten Temperaturmessverfahren beruhen auf einer Reihe von Körper- oder Stoffeigenschaften, die sich mit der Temperatur ändern, z.B.:

- Die Ausdehnung fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe (Flüssigkeitsthermometer)
- Die elektrische Widerstandsänderung, beispielsweise eines Nickel- oder Platindrahtes (Widerstandsthermometer, Temperaturfühler)
- Die Thermospannung, Licht- und Wärmestrahlung

4.2.1. Material-Ausdehnung

Aufgrund der Eigenschaft, bei einer Temperaturänderung eine spezifische, proportionale Längenänderung zu erfahren, könnte beinahe jedes Material zur Temperaturmessung herangezogen werden.

Bei den Flüssigkeitsthermometern wird die Ausdehnung der Flüssigkeit ausgenutzt, um direkt wie beim Fieberthermometer die Temperatur anzuzeigen.

Werden zwei Metalle mit sehr unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten miteinander fest verbunden (Bimetall), kommt es zu einer der Temperatur entsprechenden Krümmung der beiden Metallstreifen (Fig. 4-1). Die Differenz der Längendehnung kann nun mittels eines geeigneten Hebelsystems für die Erfassung einer Temperatur ausgenutzt werden, oder auch als temperaturabhängiger Schalter (Thermostat).

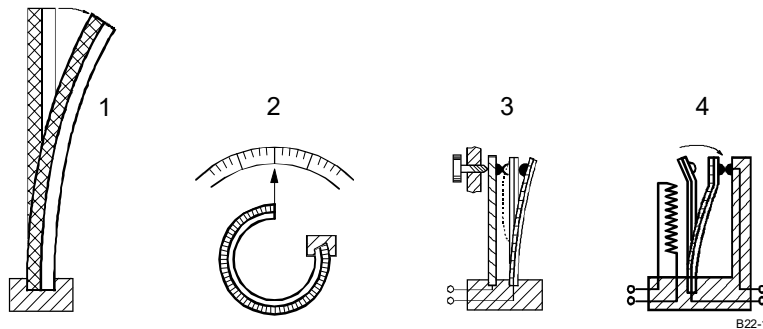


Fig. 4-1 Anwendung durch Bimetall-Biegung

- 1 Arbeitsweise
- 2 Bimetall-Thermometer
- 3 Bimetall-Schalter
- 4 Verzögertes Relais (mit Heizwiderstand), z.B. für thermische Rückführung

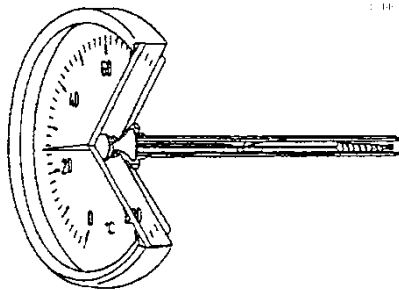


Fig. 4-2 Anwendung durch Drehung eines spiralförmigen Bimetall-Streifens

4.2.2. Widerstandsänderung

Ähnlich der Volumen- oder Längenänderung der Stoffe infolge Temperaturänderung besteht bei den elektrisch leitenden Materialien eine temperaturabhängige Leitfähigkeit, das heißt, sie ändern ihren elektrischen Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur. Dabei besitzen die meisten dieser Materialien einen positiven Temperatur-Koeffizienten (positive temperature coefficient, PTC). Der PTC bewirkt eine Zunahme des elektrischen Widerstands bei einer Temperaturerhöhung (Kaltleiter). Die gebräuchlichsten Materialien dieser Art sind Platindraht (Pt-Messelement) und Nickeldraht (Ni-Messelement).

Pt 100 bedeutet: Dieses Platin-Element hat bei 0 °C einen Widerstand von 100 Ohm.

Pt 1000 bedeutet: Dieses Platin-Element hat bei 0 °C einen Widerstand von 1000 Ohm

Normmesswiderstand Pt 100 (DIN EN 60751).

Widerstandsänderung bei Platin $\approx 0,4 \text{ } \%/K$. Die Leitungslänge hat demzufolge einen Einfluss auf das Messergebnis, daher werden zur Messung Messeinrichtungen mit Drei- oder Vierleiterschaltungen angewendet.

Ni 1000 bedeutet: dieses Nickel-Element hat bei 0 °C einen Widerstand von 1000 Ohm.

Andere Substanzen, beispielsweise die Kohle, haben einen negativen Temperatur-Koeffizienten (negative temperature coefficient, NTC); bei ihnen verringert sich der elektrische Widerstand bei einer Temperaturerhöhung (Heissleiter).

Diese NTC-Elemente bestehen aus pulverisierten und gesinterten Metalloxiden (Eisen-, Nickel- und Kobaltoxide) Titanverbindungen und Füllstoffen. Sie werden in Perlen-, Stäbchen- und Scheibenform hergestellt. Die Widerstandsänderung ist etwa 10 Mal größer als bei den metallischen Widerständen, etwa 5 %/K. Bei Temperaturänderungen von 1 K sind Widerstandsänderungen von 1000 Ohm möglich. Die Leitungslängen haben einen vernachlässigbaren Einfluss.



Fig. 4-3 Temperaturabhängige Widerstandskurven, links: PTC-Element, rechts: NTC Element

Wheatstone'sche Brücke

Zur Erfassung und Verarbeitung wird der temperaturabhängige Widerstand in den Diagonalzweig einer "Wheatstone'schen Brücke" gelegt.

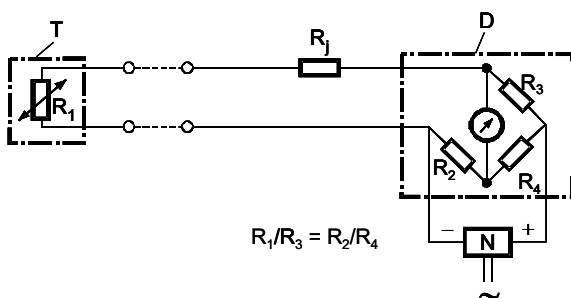


Fig. 4-4 Wheatstone'sche-Brückenschaltung, Zweileiterschaltung mit Leitungsabgleich-Widerstand R_j

T	Temperaturfühler	R_1	Messelement
R_j	Abgleichwiderstand	D	Messgerät (Messeinrichtung)
N	Spannungsquelle		

Die Brücke wird auf den Widerstandswert des Messfühlers am Messbereichsanfang abgeglichen, damit ist die Anzeige am Messinstrument = Null.

Der Strom im Diagonalzweig der Brückenschaltung dient also als Maß für den Widerstand des Widerstandsthermometers, oder der Sollwert/Istwert-Vergleichsschaltung im Temperaturregler. Voraussetzung für eine exakte Messung ist eine Konstantspannungsquelle, da die Anzeige außer dem Strom auch der Speisespannung proportional ist.

Zweileiterschaltung

In bestimmten Fällen muss auch die Leitungslänge beachtet werden denn der Leitungswiderstand verfälscht das Messergebnis, daher eher für kurze Distanzen geeignet.

Mögliche Lösung: Mit dem Widerstand R_j wird der Leitungswiderstand auf einen festen Wert z.B. 10 Ohm justiert.

Dreileiterschaltung

Durch die Verwendung einer „Dreileiterschaltung“ wirken die Temperaturschwankungen auf alle drei Leitungen und bewirken eine gleichmäßige Widerstandsänderung in allen Brückenpfaden und rufen somit keine Änderung der Ausgangsspannung hervor. Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Fernleitung wird kompensiert.

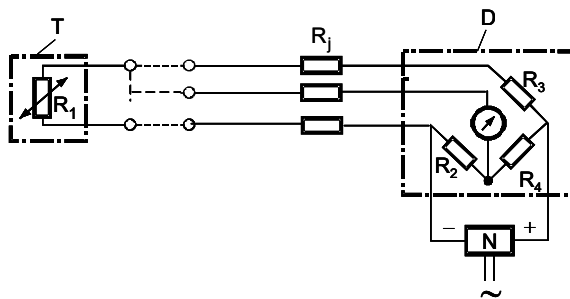


Fig. 4-5 Wheatstone'sche-Brückenschaltung, Dreileiterschaltung mit Leitungsabgleich-Widerständen R_j

Vierleiterschaltung

Hier erfolgt die Speisung des Messfühlers durch eine im Messgerät enthaltene Konstantstromquelle. Der durch den Fühler fließende Strom wird dadurch auch bei Widerstandsänderungen durch unterschiedliche Leitungslängen oder durch Umgebungseinflüsse entlang der Fernleitung immer konstant gehalten. Über ein zweites Leitungspaar wird der über dem Messelement auftretende Spannungsabfall leistungslos gemessen. Diese Schaltung ermöglicht eine sehr hohe Messgenauigkeit ohne Leitungsabgleich und ohne Umgebungseinflüsse entlang der Fernleitung.

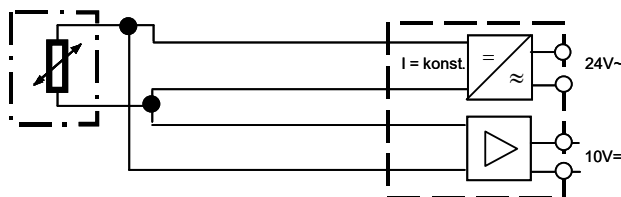


Fig. 4-6 Vierleiterschaltung mit Konstantstromquelle

4.3. Luftfeuchte

Mit Feuchte oder Feuchtigkeit bezeichnet man den Wassergehalt eines Stoffes. Im Falle der Luftfeuchtigkeit ist das Wasser in gasförmigem Zustand homogen mit der Luft vermischt.

Wie jeder andere Stoff hat Luft nur eine begrenzte Aufnahmefähigkeit für Wasser. Diese Grenze wird als Sättigung bezeichnet. Unterhalb der Sättigung ist "feuchte Luft" für das Auge nicht von "trockener Luft" zu unterscheiden, also völlig farblos und durchsichtig. Oberhalb der Sättigung fällt der überschüssige Wasseranteil in Form von feinsten Wassertröpfchen als Nebel oder Wolken aus. Die im Maximum aufnehmbare Wassermenge bei Sättigung ist vom Luftdruck und von der Lufttemperatur abhängig. Sie steigt stark progressiv mit der Lufttemperatur an. Bei einer Höhe von 0 m.ü.M. und 0 °C beträgt sie beispielsweise 3,8 g/kg Luft, bei 20 °C bereits 14,7 g/kg.

Für die zahlenmäßige Angabe der Luftfeuchtigkeit bestehen die Größen absolute Feuchte und relative Feuchte.

Absolute Feuchte

Unter dem Begriff absolute Feuchte versteht man das Gewicht des in der Luft enthaltenen Wassers, im Verhältnis zum Gewicht der trockenen Luft. Angabe in [g/kg].

Relative Feuchte

Der Ausdruck relative Feuchte bedeutet: Vorhandene Wassermenge in der Luft im Verhältnis zur maximal möglichen Wassermenge (Angabe in % relative Feuchte, % r.F.).

Beispiel:

Luft von 20 °C (1) kann maximal 14,7 g Wasser pro kg Luft (14,7 g/kg) (2) aufnehmen. Bei einem momentanen Wassergehalt von 7,35 g/kg, beträgt die relative Feuchte 50 % r.F.. (3)

Im h,x-Diagramm sind diese Zusammenhänge visualisiert und die unterschiedlichsten Zustände können grafisch dargestellt werden. Dabei bezeichnet h die Enthalpie der feuchten Luft bei einer gegebenen Temperatur in kJ pro kg feuchte Luft. x ist der absolute Wassergehalt in g pro kg feuchte Luft.

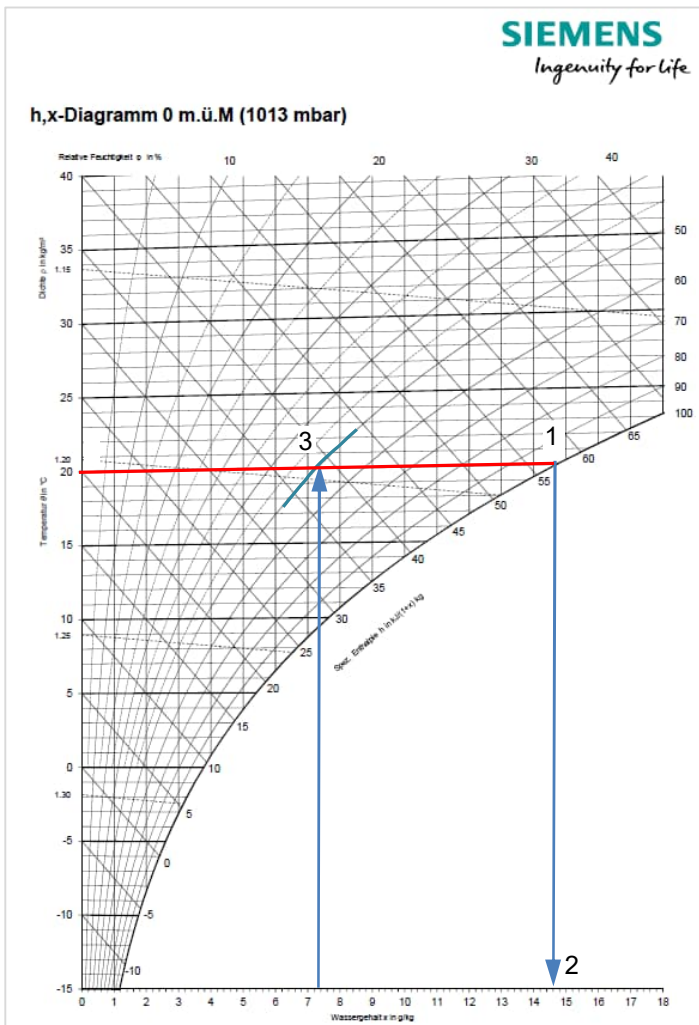


Fig. 4-7 h,x-Diagramm

4.3.1. Messprinzipien für die relative Feuchte [% r.F.]

Temperaturänderung

Beim Aspirations-Psychrometer (Fig. 4-8) wird die durch die Verdunstung von Wasser erzeugte Abkühlung zur Feuchtigkeitsmessung verwendet. Es enthält zwei Glasthermometer, wobei eines mit Stoff umhüllt ist und unmittelbar vor der Messung befeuchtet wird (Feuchtkugelthermometer). Mit einem eingebauten Ventilator (Federwerkantrieb) wird ein Luftstrom von ca. 2 m/s erzeugt. Dieser bewirkt, dass beim befeuchteten Thermometer Verdunstungskälte entsteht. Es resultieren zwei Temperaturwerte, nämlich die Trocken- und die Feuchtkugeltemperatur (Temperatur bei 100 % Sättigung der Luft). In Abhängigkeit der Ortshöhe lässt sich nun mit Hilfe der gemessenen Temperaturen und dem h,x-Diagramm die relative Feuchtigkeit in % ermitteln.

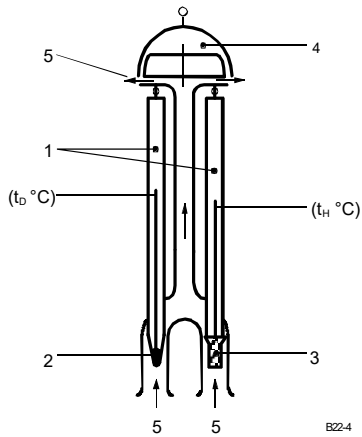


Fig. 4-8 Das Aspirations-Psychrometer

- | | | | |
|---|-----------------------|---|------------------------|
| 1 | Thermometer | 4 | Uhrwerk mit Ventilator |
| 2 | Trockenes Thermometer | 5 | Luftströmung |
| 3 | Feuchtes Thermometer | | |

Längenänderung

Das Messprinzip des Haar-Hygrometers (Fig. 4-9) beruht auf der Eigenschaft, dass entfettete Haare ihre Länge unter dem Einfluss von Feuchtigkeit relativ stark verändern (ca. 1,5 - 2,5 % bei einer Änderung der relativen Feuchte von 0 - 100 %).

Vorteil:

Die Längenänderung wird durch Temperaturänderungen nur vernachlässigbar gering beeinflusst.

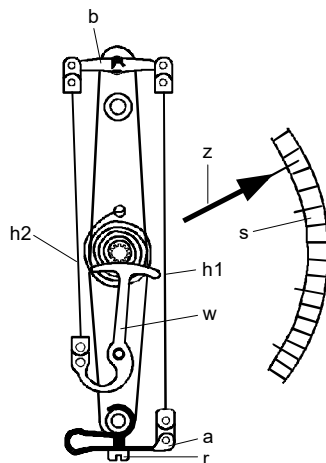


Fig. 4-9 Haar-Hygrometer

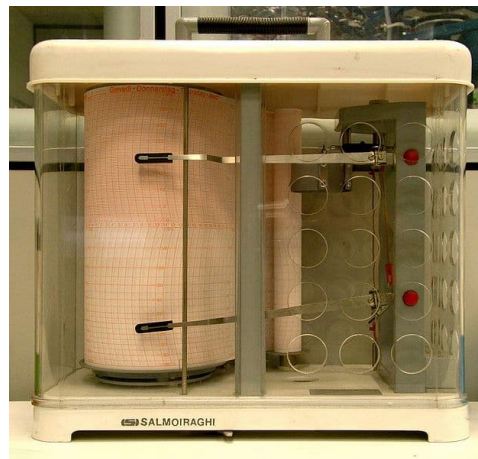


Fig. 4-10 Thermo-Hygrograph (Messwertaufzeichnung) Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Termoigrografo_01.jpg

Funktion

Ein im Punkt (a) befestigtes Haarbündel (h1) ist zwecks Verlängerung des wirksamen Teiles über einen zweiarmigen Hebel (b) mit einem Haarbündel (h2) verbunden. Dieses ist in Verbindung mit dem Zeigerwerk (w), das die Längenänderung der Haare, als Funktion der relativen Feuchtigkeit, auf den Zeiger (z) und die Skala überträgt. Dabei ist wichtig, dass das Messelement dauernd einer gewissen Feuchtigkeit ausgesetzt ist und die Umgebungsluft ungehindert zirkulieren kann.

Die Anwendung erfolgt häufig in Messgeräten mit integriertem Temperaturmesselement, siehe Fig. 4-10.

Bei einem registrierenden Gerät wird anstelle des Zeigers vom anzeigenden Gerät das Messelement mit einem Faserschreiber oder einer Schreibfeder verbunden. Ein Federwerkmotor lässt einen Diagrammstreifen in einer bestimmten Zeit (z.B. 24 Stunden oder 1 Woche) ablaufen, wobei die ermittelten Werte in Form einer Kurve aufgezeichnet werden.

4.3.2. Messprinzip der kapazitiven Feuchtemessung

Das Messelement des Fühlers (Fig. 4-11) besteht aus einem Kondensator mit polymerem Dielektrikum und ganz dünnen Goldelektroden. Durch die poröse Deckelektrode hindurch gelangt die Feuchte ins Dielektrikum und verändert die Kapazität des Kondensators. Diese Kapazitätsänderung wird elektronisch verarbeitet, verstärkt und z.B. als Gleichspannungssignal von 0 - 10 V DC ausgegeben. Ihm entspricht z.B. eine relative Feuchte von 0 - 100 % (Fig. 4-12).

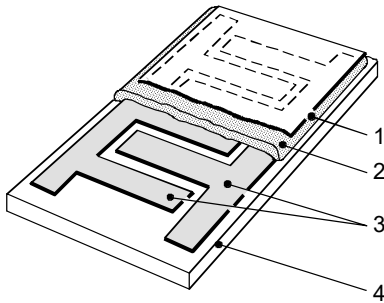


Fig. 4-11 Kapazitives Feuchte-Messelement

- 1 Poröse Deck-Elektrode
- 2 Feuchte-absorbierendes Polymer
- 3 Grundelektroden
- 4 Substrat

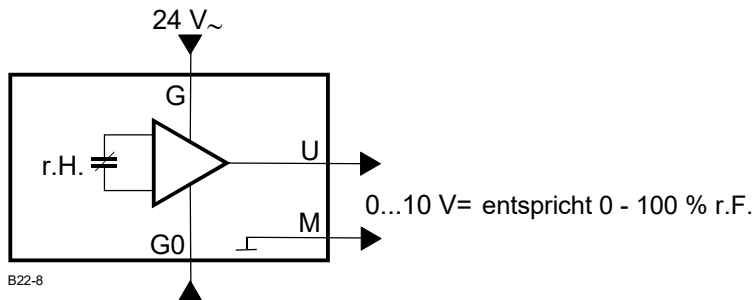


Fig. 4-12 Prinzipschaltbild eines kapazitiven Feuchtefühlers

4.3.3. Messprinzip für die absolute Feuchtigkeit (x)

Die Messung der absoluten Feuchte x ist in allen Fällen interessant, in denen die in der Luft oder im Gas enthaltene Wassermenge bekannt sein soll bzw. geregelt werden muss.

Ermittlung der absoluten Feuchte aus Temperatur und rel. Feuchte

Heute wird in HLK-Anlagen in den meisten Fällen durch die Messung von Temperatur (1) und relativer Feuchte (2) als Messgröße, die absolute Feuchte x (3) mit Hilfe des im Regler abgelegten Rechenalgorithmus (Rechenformel) ermittelt.

In HLK-Anlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) kommt dieses Messprinzip zur Anwendung, da man auf diese Weise den tatsächlichen Energiegehalt der Luft (thermische Energie und Enthalpie des Wasserdampfs) erfasst (Beispiel tx -geführte Regelung).

Zusammenhänge:

Bei einer Temperatur T von 20 °C, und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % r.F. lässt sich die absolute Luftfeuchtigkeit x von 7,3 g/kg im h,x -Diagramm ablesen (für 1013 mbar resp. 0 m.ü.M).

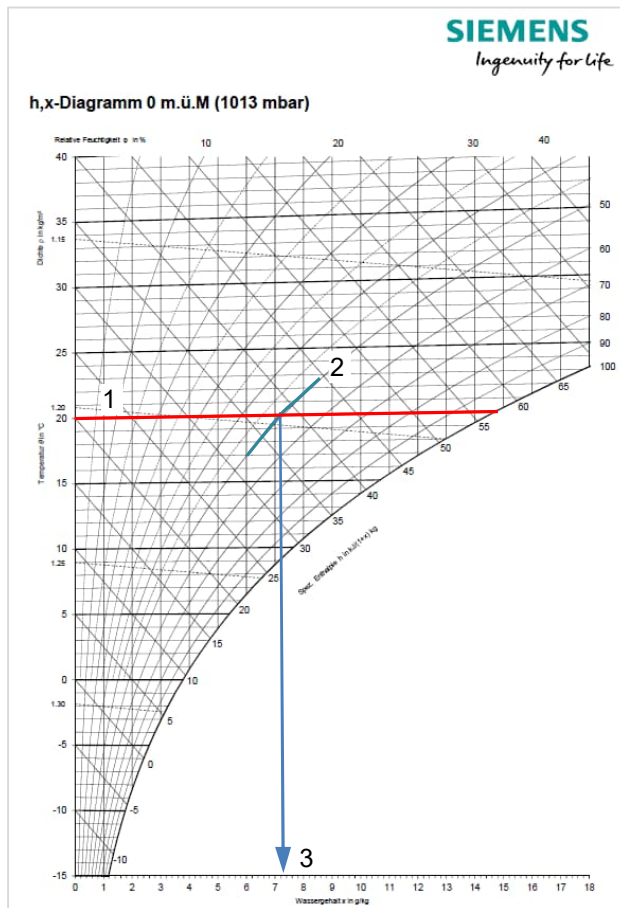


Fig. 4-13 h,x-Diagramm zeigt unter anderen die Zusammenhänge von Feuchte und Temperatur

4.4. Luftqualität

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf unsere Behaglichkeit in Räumen bilden Gerüche und Düfte. Unliebsame Gerüche können nicht nur physiologisches Unwohlsein hervorrufen, sondern auch körperliche Symptome wie Kopfschmerzen, Übelkeit und Appetitlosigkeit, selbst ohne eine toxische Wirkung der Geruchsstoffe.

Aufgrund dieser Tatsachen bestehen für den Betrieb von Lüftungs-/Klimaanlagen gesetzliche Vorschriften, wonach Räume entsprechend der anwesenden (oder geplanten) Personenzahl mit einem mindest Außenluftanteil versorgt werden müssen.

Die technische Beurteilung der Raumluftqualität durch Sensoren kann nicht mit der menschlichen Nase verglichen werden. Trotzdem liefern diese für die Ermittlung des Außenluftbedarfs bei einer Luftqualitätsregelung erstaunliche Resultate. Dabei sind die Mischgase oder VOC (Volatile Organic Compounds = flüchtige organische Verbindungen) und das Kohlendioxid (CO_2) von besonderem Interesse.

4.4.1. CO_2 -Fühler

Kohlendioxid (CO_2) entsteht bei der Atmung sowie bei jeder Verbrennung bzw. Oxidation. CO_2 ist ein geruchloses Gas und in geringen Mengen sind keine Auswirkungen auf den Menschen bekannt.

- ⇒ CO_2 Konzentration im Raum ist ein Mass für die Anzahl Personen in Räumen.
- ⇒ CO_2 hat auch gesundheitliche Auswirkungen (Atmung des Menschen durch CO_2 Gehalt gesteuert) und somit Einfluss auf das Wohlbefinden, Konzentration etc., falls gewisse Grenzwerte (Masseinheit ppm, parts per million¹) Zahlen überschritten werden.
- ⇒ CO_2 wird in Volumen-% oder in ppm (parts per million) gemessen.
Normale Außenluft enthält heute rund 0,040 Volumen-% CO_2 . resp. 400 ppm.

¹ 1 ppm (part per million) entspricht einem Millionstel Teil der Luft (Volumenverhältnisse).
1000 ppm CO_2 entsprechen 0,1 % des Luftvolumens.

Konzentration [ppm]	
350...400	Konzentration in normaler Außenluft
1'000	20 % der in einen Raum eintretenden Personen sind mit der herrschenden Luftqualität unzufrieden
1'500	Grenzwert gemäß DIN 1946
2'000	Sensible Personen klagen über Kopfwahl
4'000	Maximalwerte im Klassenzimmer nach Unterricht
5'000	MAK Wert (zulässige maximale Arbeitsplatzkonzentration)
100'000	Erlöschen einer Kerze im Raum, Bewusstseinsverlust

Tabelle 4.1 CO₂-Konzentrationen und Grenzwerte

Erst ab 1000 bis 2000 ppm (parts per million = Anzahl cm³ pro m³) verschiebt sich der Blut-pH-Wert zur sauren Seite hin (Verminderung des Sauerstofftransports). Durch CO₂ kann die Luftqualität nicht direkt bestimmt werden. Als interessantes Leitgas gibt es jedoch über Luftverbrauch oder Belegung eines Raumes wertvolle Informationen.

Der CO₂ Anteil kann mit einem CO₂ Messelement als Vergleichsgröße nachgewiesen werden.

Messprinzip

Beim CO₂-Messprinzip mit optischer Infrarot-Absorptionsmessung, wird die Veränderung der Wellenlänge einer Infrarot-Lichtquelle durch die CO₂-Konzentration gemessen (vgl. Fig. 4-14).

Diese Infrarot-Lichtquelle altert, wodurch sich die ausgesandte Wellenlänge verändert. Damit die Messung über die Lebensdauer des Sensors stabil und zuverlässig bleibt, wird mit einer zweiten Infrarot-Lichtquelle sporadisch eine Vergleichsmessung gemacht. Dadurch kann die Messung nachkalibriert und der Alterungseffekt der Infrarot-Lichtquelle kompensiert werden.

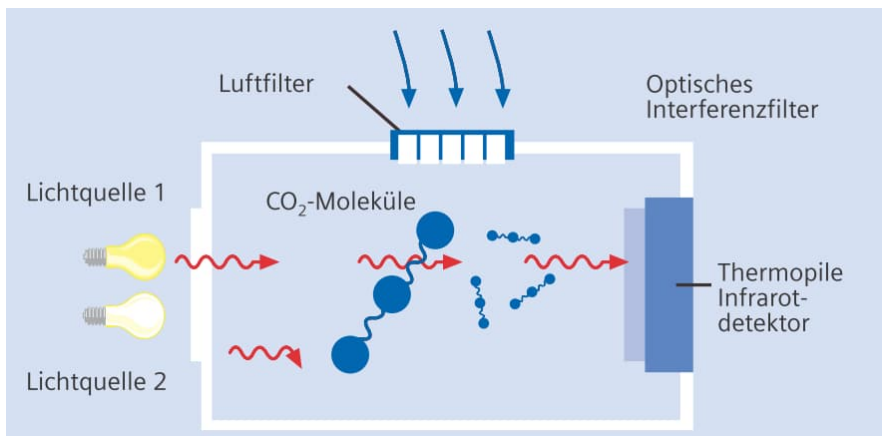


Fig. 4-14 CO₂-Messung mit optischer Infrarot-Absorptionsmessung

4.4.2. Mischgas-Fühler

Für die schlechte Luft, wie sie die Nase riecht und was als abgestandene Luft bezeichnet wird, sind vor allem Mischgase, sog. VOC (Volatile Organic Compounds = flüchtige organische Verbindungen) verantwortlich.

VOC sind enthalten in Lösungsmittelhaltigen Produkten wie Klebstoffen, Farben und Lacken, Verdünnern sowie in Reinigungs- und Pflegemitteln. Allen organischen Lösungsmitteln ist eine alkoholartige, narkoseähnliche Wirkung gemeinsam. Je nach Verbindung treten bei unterschiedlichen Konzentrationen Müdigkeit und Benommenheit, bei höherer Dosis auch Übelkeit und Kopfschmerzen auf. Auch der Mensch gibt geringe Mengen an VOC-Bestandteilen an die Raumluft ab:

- Durch die Atmung
- Durch Schweiß und andere Körperausdünstungen
- Tabakrauch

Ohne zusätzliche Signalbearbeitung sind die handelsüblichen VOC-Sensoren für Anwendungen in der Klimatechnik allerdings nicht genügend genau und zuverlässig, da hier schon kleinste VOC-Konzentrationen gemessen werden müssen. Mit einem intelligenten Algorithmus lässt sich das VOC-Signal an die aktuelle Zuluftqualität adaptieren und auch sehr kleine VOC-Konzentrationen zuverlässig und stabil messen.

Messprinzip

Die VOC-Erfassung erfolgt mit einem Gassensor nach dem Taguchi-Prinzip (Fig. 4-15) Dieser besteht im wesentlichen aus einem gesinterten Keramikrohr mit innenliegendem Heizwendel. Neuere Ausführungen werden auch in Flachbauweise in Dickfilmtechnologie ausgeführt. Das Sensorröhrchen ist hochporös und hat dadurch eine sehr grosse Oberfläche. Es besteht aus dotiertem Zinndioxid (SnO_2). Das sensitive Material arbeitet nach einem Redox-Vorgang.

Durch Aufheizen des Sensor-Röhrchens auf 400 °C bilden sich freie Elektronen an der Sensoroberfläche. Gase oder Dämpfe, die mit der Sensoroberfläche in Berührung kommen werden im Idealfall zu CO_2 und Wasserdampf oxidiert. Der zur Oxidation benötigte Sauerstoff wird dabei der Sensoroberfläche entzogen. Dabei werden Elektronen frei, was den Widerstand des Halbleiters verändert. Diese Widerstandsänderung kann als Spannungsänderung gemessen werden.

Der verbrannte Sauerstoff wird durch Luftsauerstoff wieder ersetzt. Alle oxidierbaren Gase können somit durch den Mischgassensor proportional zur Konzentration und ihrem Redoxpotential erfasst werden.

Das Taguchi-Messprinzip wird für Gas-Leckmessungen seit langem erfolgreich eingesetzt. Für Luftqualitäts-Messungen in HLK-Anlagen wurde das Messprinzip wenig eingesetzt. Ein Grund ist sicher, dass der nötige Messbereich in die unterste sensitive Zone des Taguchi-Sensors fällt, wo der Grundwert des Sensorsignals relativ stark streut und driftet. Außerdem existieren über Geruch und Luftqualität ausser für CO_2 keine verbindlichen, messbaren Aussagen in der Literatur.

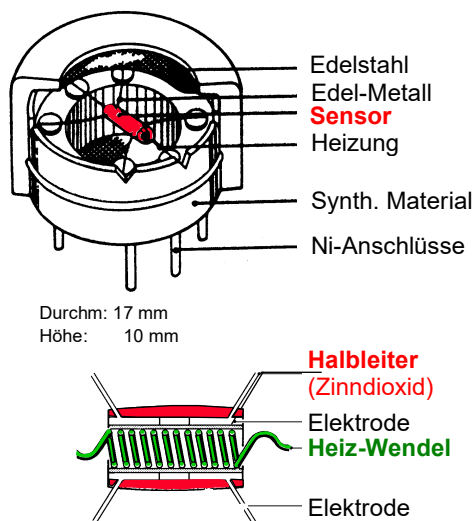


Fig. 4-15 VOC-Messung mit Gassensor nach dem Taguchi-Prinzip

Kombinierte CO_2 /VOC Messung üblich

Mittlerweile gilt die kombinierte CO_2 /VOC-Messung als Optimum der Luftqualitätsregelung.



Fig. 4-16 Kanal-Luftqualitätsfühler
CO₂ + VOC mit Display
(Quelle: Siemens)



Fig. 4-17 Luftqualitätsfühler
CO₂ + VOC mit Anzeige
(Quelle: Siemens)



Fig. 4-18 Feinstaubfühler
mit Anzeige
(Quelle: Siemens)

4.4.3. Feinstaub

Seit einiger Zeit wird vermehrt auch der Feinstaub-Belastung in Räumen Beachtung geschenkt und deshalb wird diese auch mit speziellen Fühlern in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Partikelgröße PM 2.5 gemessen.

Werden hier Grenzwerte überschritten, dann hilft es meistens nicht, zusätzliche Aussenluft in die Räume zu bringen (den oft ist diese der Grund für die erhöhte Belastung), sondern es müssen zusätzliche Filter in Betrieb genommen werden.

4.4.4. Andere Indikatoren

Im Zusammenhang mit Gerüchen wird oft über olf, decipol und Prozentzahl Unzufriedene (PD) gesprochen (Theorie Fanger). Diese Größen sind keine messbaren Größen wie CO₂, zeigen aber den Zusammenhang zwischen Geruch, Luftwechsel und Zufriedenheit der Personen. Sie können deshalb nicht zu Regelzwecken eingesetzt werden, wohl aber um z.B. Sollwerte festzulegen (Tabelle 4.1, Wert für 1000 ppm CO₂).

olf

1 olf = Verunreinigungslast einer Standardperson.

Eine Standardperson heißt eine erwachsene Person bei sitzender Tätigkeit mit einem Hygienezustand von 0,7 Bädern pro Tag. Die Einheit "olf" gibt die jeweilige Verunreinigungslast von Gegenständen wie von Menschen an. Sie ist als Größe nicht direkt messbar, sondern nur über die empfundene Luftqualität bestimmbar.

decipol

1 decipol = empfundene Luftqualität in einem Raum mit einer Verunreinigungslast von 1 olf und einer Lüftung mit einem Volumenstrom von 10 l/s resp. 36 m³/h. Decipol ist die Masseinheit für die empfundene Luftqualität.

PD = Percentage Dissatisfied

Die empfundene Luftqualität wird mit Hilfe von Testpersonen ermittelt und dabei wird festgelegt, wie viele Personen mit der Luftqualität nicht zufrieden sind (Percentage Dissatisfied, resp. Prozentzahl Unzufriedener). Diese Werte werden in Abhängigkeit der personenbezogenen Außenluftrate festgehalten.

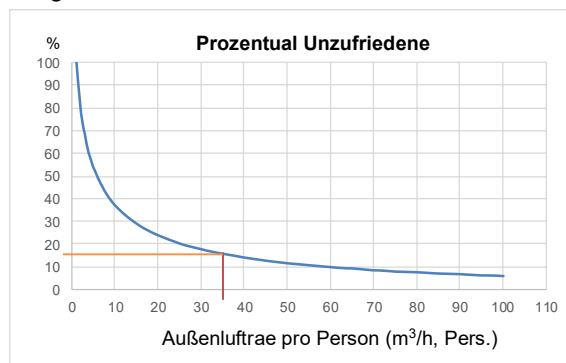


Fig. 4-19 Abhängigkeit der Prozentzahl Unzufriedener (PD) von der personenbezogenen Außenluftrate

4.5. Druck, Volumenstrom und Geschwindigkeit

Der Druck ist der Quotient aus der gleichmäßig auf eine Fläche wirkenden Kraft und der belasteten Fläche: $\text{Druck} = \text{Kraft}/\text{Fläche}$ in $[\text{N}/\text{m}^2]$.

Die Methoden zur Druckmessung lassen sich in direkte und indirekte einteilen. Zu den ersten zählen vor allem jene Geräte, welche die Messgröße mit dem Bodendruck einer Flüssigkeitssäule vergleichen und Druckwaagen, bei denen der Druck auf einen Kolben oder eine Glocke durch bekannte Gewichte kompensiert wird. Indirekt arbeitende Druckmessgeräte verwenden direkt wirkende Messelemente zur Umsetzung der Druckmesswerte in andere analoge physikalische Größen, wie beispielsweise in Wege, elektrische Spannungen oder elektrische Kapazitäten.

4.5.1. Messverfahren zur Volumenstromermittlung

Wir unterscheiden grundsätzlich vier Messverfahren:

- Wirkdruckmessung
- Geschwindigkeitsmessung
- Bypassmessung
- Durchflussmessung

Jedes dieser Verfahren hat seine technischen und ökonomischen Vorteile, die im Bedarfsfalle gegen einander abzuwägen sind. Siehe dazu die Matrix am Ende dieses Kapitels.

Nachstehend finden Sie jeweils Definition und Kurzerklärung zu jedem Verfahren. Anschließend werden die Grundlagen erläutert und jedes Verfahren ausführlich erklärt.

Wirkdruckmessung

Das Verfahren stellt den direkten Zusammenhang zwischen dem Druckabfall über einem Strömungswiderstand und dem Volumenstrom her.

Grundlage ist die mit empirischen Korrekturfaktoren ergänzte Bernoulli-Gleichung (siehe 4.5.3), die den Zusammenhang der Strömungsgeschwindigkeit (prop. Volumenstrom) mit dem Druck beschreibt.

Geschwindigkeitsmessung

Die Geschwindigkeit wird in einem oder mehreren Punkten in einem definierten Strömungsquerschnitt gemessen und daraus zusammen mit dem Leitungsquerschnitt der Volumenstrom berechnet. Die Geschwindigkeit wird z.B. mit Flügelrad resp. seiner Drehzahl gemessen oder in Luftströmungen abgeleitet aus der Abkühlung eines Heizdrahtes.

Bypassmessung:

Bei dieser Messung wird mit Hilfe z.B. einer Blende ein Druckabfall im Leitungsquerschnitt hergestellt. Die Strömungsmessung erfolgt nicht direkt über diese Blende, sondern in einem kleineren, parallel zur Hauptleitung geführten Leitungsteil (Bypass). Dieser Bypassteil ist weniger direkt den Veränderungen der Strömung im Haupt-Leitungsteil ausgesetzt und auch weniger anfällig auf Verschmutzung.

Durchflussmessung:

Bei dieser Messung wird meist basierend auf den Umdrehungen von Elementen im Medienstrom (z.B. Flügelrad) die Strömungsgeschwindigkeit, und daraus abgeleitet, der Durchfluss gemessen.

4.5.2. Grundlagen

Nachfolgend werden einige Definitionen unterschiedlicher Druckarten, sowie Formeln aus der Strömungslehre kurz repetiert.

4.5.2.1. Druck

»Druck« ist ein Überbegriff und bezeichnet eine ganze Familie von Druckarten. Mit »Druck« wird also noch nichts über die Art des Druckes ausgesagt.

Allgemein formuliert: Der »Druck« p ist die Kraft F , die senkrecht auf eine Fläche A wirkt:

$$p = \frac{F}{A}$$

p	Druck
F	Kraft
A	Fläche

Bei Flüssigkeiten oder Gassäulen von der Höhe h ist:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

p	Druck
ρ	Dichte
h	Höhe
g	Erdbeschleunigung

Druckarten

Bei allen Druckmessungen müssen wir zwischen den folgenden verschiedenen Druckarten unterscheiden:

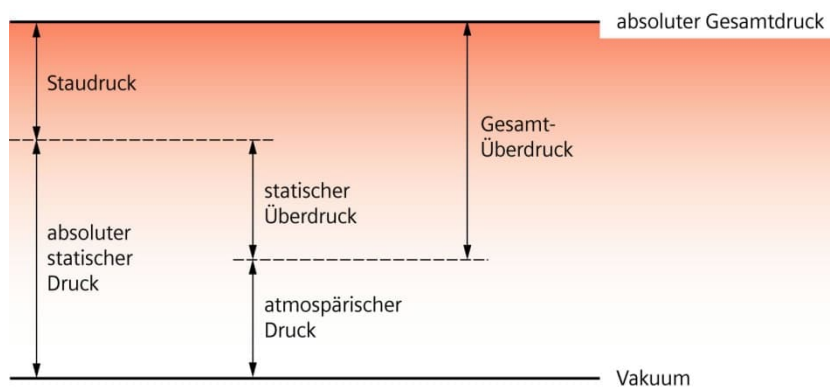


Fig. 4-20 Druckverhältnisse in einer Strömung

Statischer Druck

Druck, der auf ein in der Strömung mitgeführtes Teilchen wirkt. Der statische Druck wird senkrecht zum Geschwindigkeitsvektor gemessen.

Absoluter statischer Druck

Statischer Druck eines Fluids, bezogen auf das absolute Vakuum.

Statischer Überdruck

Absoluter statischer Druck eines Fluids minus atmosphärischer Druck.

Staudruck

Druck, der sich aus der kinetischen Energie (Bewegungsenergie) eines Fluids ergibt. Bei einem Fluid im Ruhezustand ist der Staudruck Null.

Gesamtdruck

Statischer Überdruck plus Staudruck.

Absoluter Gesamtdruck

Der absolute Gesamtdruck charakterisiert den Energiezustand eines Fluids nach völligem Umwandeln seiner Strömungsenergie in Druckenergie. Er entspricht der Summe aus absolutem statischen Druck und Staudruck.

Wirkdruck

Durch einen Strömungswiderstand hervorgerufener Differenzdruck, der zur Messung des Durchflusses oder der Strömungsgeschwindigkeit dient.

4.5.3. Bernoulli-Gleichung

Die Bernoulli-Gleichung sagt aus, dass in reibungsfreien, stationären Strömungen die Summe aus kinetischer und potentieller Energie und des Druckes längs einer Stromlinie konstant ist (Energieerhaltungssatz). Sie lautet für inkompressible Strömungen:

$$\frac{\rho}{2} \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h + p = \text{konstant}$$

v	Geschwindigkeit
h	Ortshöhe
p	Betriebsdruck (statischer Überdruck)
ρ	Dichte
g	Erdbeschleunigung

Reibungsfrei bedeutet, dass man von einem idealisierten Fluid ohne innere Reibung, d.h. keine Schubspannungen in Strömungsrichtung ausgeht (nicht-viskoses Fluid).

Stationär bedeutet, dass die Strömungsgeschwindigkeit an einem Punkt über die Zeit nicht ändert.

Inkompressibel bedeutet, dass die Dichte der Strömung unabhängig ist vom Druck (dies ist für Flüssigkeiten meistens der Fall, für Gase jedoch nicht).

4.5.3.1. Korrekturfaktor ϵ

Die Bernoulli-Gleichung setzt eine reibungsfreie Strömung voraus, die in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Deshalb muss die hier vorgeführte ideale Rechnung mit den empirisch ermittelten Durchflusszahl und Korrekturfaktor an die tatsächlichen Verhältnisse (z.B. Messblende) angepasst werden.

$$\dot{V} = \alpha \cdot \epsilon \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)}$$

$\dot{V}$	Volumenstrom
α	Durchflusszahl (empirisch)
ϵ	Korrekturfaktor (empirisch)
A_0	Querschnittsfläche
ρ	Dichte
p_1	Druck vor Messstelle
p_2	Druck nach Messstelle

4.5.4. Ausflussgeschwindigkeit und Massenstrom

Ausflussgeschwindigkeit

Die Ausflussgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

$$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

v	Geschwindigkeit
ρ	Dichte
p_1	Druck vor Messstelle
p_2	Druck nach Messstelle

Massenstrom

Der ausfließende Massenstrom $\dot{m}$ rechnet sich bei Querschnitt A aus:

$$\dot{m} = A_0 \cdot v \cdot \rho = A \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

$$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

A_0	Querschnitt	$[\text{m}^2]$
v	Ausflussgeschwindigkeit	$[\text{m/s}]$
Δp	$(p_1 - p_2)$ Wirkdruck	$[\text{N}/(\text{m}^2)]$

4.5.5. Wirkdruckverfahren

4.5.5.1. Prinzip

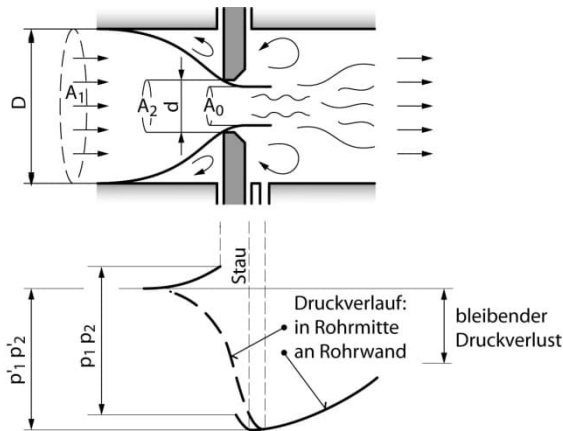


Fig. 4-21 Druck- und Stromverlauf in einer Blende

Bei der Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren wird der Querschnitt der Rohrleitung an einer Stelle verengt, wodurch bei gleichem Volumendurchfluss die Strömungsgeschwindigkeit erhöht wird. Dadurch sinkt der statische Druck nach der Blende. Aus der Differenz der Wirkdrücke kann die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden.

4.5.5.2. Strömungswiderstände

In Fig. 4-21 wurde die einfachste Illustrationsmöglichkeit eines Strömungswiderstands verwendet. Tatsächlich ist das Wirkdruckverfahren aber nicht an einen bestimmten Strömungswiderstand gebunden.

Terminologie

„Strömungswiderstand“ wird gerne für theoretische Betrachtungen verwendet.

In der Praxis häufig anzutreffen ist der Ausdruck „Drosselgerät“.

Praxis

Als Strömungswiderstände eignen sich in der Praxis vor allem:

- Blende
- Düse
- Venturidüse

Auf die Besonderheiten dieser drei Strömungswiderstände gehen wir nachfolgend ein.

Blende

Einfachste Art eines, für Wirkdruckmessung verwendbaren, Strömungswiderstandes.

Anwendung

Normblenden können verwendet werden für

- Rohrdurchmesser D im Bereich von 50...1000 mm
- Öffnungsverhältnisse β (d/D) im Bereich von 0,05...0,64

Eigenschaften

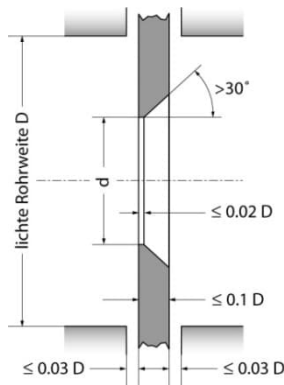


Fig. 4-22 Normblende (vgl. DIN 1952)

Typisch für die Blende ist die Einschnürung (sogenannte Kontraktion) des Luftstromes in der Blende. Das Maß der Einschnürung - durch die Kontraktionszahl β (Durchmesser Verhältnis d/D) ausgedrückt - hat einen entscheidenden Einfluss auf die empirisch ermittelte Durchflusszahl α , welche auch noch von der Reynolds-Zahl Re abhängig ist.

Durchschnittsmessung ("Annubar-Durchflussmessung")

Die „Annubar-Durchflussmessung“ arbeitet mit einer Messeinrichtung, welche über den ganzen Leitungsquerschnitt führt und eine gemittelte (durchschnittliche) Differenzdruckmessung macht. Diese dient als Basis für die Geschwindigkeitsmessung resp. daraus abgeleitete Volumenstrom-Messung.

4.5.6. Geschwindigkeits-Messprinzip

Punktmessung

Alle Geschwindigkeits-Messprinzipien haben eine Gemeinsamkeit: Sie messen die Geschwindigkeit nur in einem Punkt des Leitungsquerschnitts.

Mittlere Geschwindigkeit

Wie aus der Theorie bekannt, ist die Geschwindigkeit aber nicht überall gleich. Werden die Gesetze der Strömungslehre befolgt, d.h. eine genügend lange Ein- und Auslaufstrecke vorgesehen, so kann mit folgendem Ansatz die mittlere Geschwindigkeit ermittelt werden.

$$v_{\text{mittel}} = v_{\text{gemessen}} \cdot (0,8 \dots 0,85)$$

Wahl des Messortes

Ein weiterer Ansatz ist die Wahl des Messortes im Querschnitt. Dieser kann wie folgt bestimmt werden. Aber auch hier muss auf die Gesetze der Strömungslehre geachtet werden.

$$\text{Messort} \approx 0,119 \cdot D$$

D: Rohrdurchmesser

Soll der Volumenstrom genauer bestimmt werden, oder ist keine voll ausgebildete Strömung vorhanden, so wird der Messaufwand erheblich größer.

Beachte:

Genaue Messungen kann man dann nur mit einer Netzmessung erreichen, welche die unterschiedlichen Geschwindigkeiten im ganzen Querschnitt erfasst.

Netzmessungen

Geschwindigkeitsmessungen mit der Netzmethode in einem definierten Leitungsquerschnitt sind mit einem der folgende Verfahren durchzuführen. Sie kommen speziell dort zur Anwendung, wo eine ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung und damit auch eine kürzere Einlaufstrecke vorhanden sind.

Trivialverfahren

Als Trivialverfahren werden alle Messverfahren bezeichnet, bei denen keine besonderen Annahmen über das Geschwindigkeitsprofil getroffen werden können.

Das Geschwindigkeitsprofil wird auf beliebig vielen Messgeraden punktweise ausgemessen. Die Anzahl der Messpunkte ist von der Größe des Querschnitts und dem zu erwartenden Geschwindigkeitsprofil abhängig.

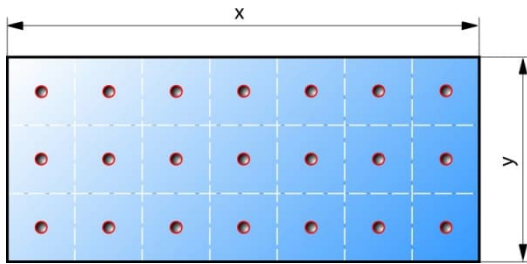


Fig. 4-23 Einteilung eines Rechteckquerschnitts in gleich große Messflächen (o: Messpunkte)

In rechteckigen Querschnitten kann der Messquerschnitt in gleich große Flächenelemente aufgeteilt werden, wobei deren Seitenlänge < 25 cm sein sollte.

Für Kreis- und Kreisringquerschnitte ist das Schwerelinien-Verfahren (nächster Abschnitt) anzuwenden.

Schwerelinien-Verfahren

Das Schwerelinien-Verfahren ist für Kreis- und Kreisringquerschnitte anzuwenden. Bei dieser Methode werden die Messorte so gewählt, dass sie auf den Schwerelinien von flächengleichen Kreissegmenten liegen.

Durch Bildung des arithmetischen Mittels der einzelnen Messwerte wird die mittlere Geschwindigkeit erhalten.

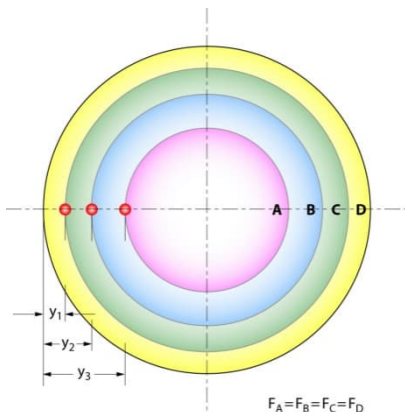


Fig. 4-24 Einteilung eines Kreisquerschnitts in flächengleiche Kreissegmente

- | | |
|---------|---|
| A | Kreis der Fläche F_A |
| B, C, D | Konzentrische, flächengleiche Kreissegmente |
| y_n | Wandabstand |

Der Grund, weshalb auf den Schwerelinien und nicht in der Kreisringmitte gemessen wird: Jeder Kreissegmentfläche wird die gemessene Geschwindigkeit zugeordnet, welche der mittleren Geschwindigkeit dieses Segmentabschnittes entspricht.

Der Schwerelinienradius ist größer als der der Kreisringmitte. Wird nun die äußere und die innere Fläche mit der Geschwindigkeit multipliziert, so ist der Volumenanteil für beide Abschnitte gleich groß.

4.5.7. Durchflussmessung

Neben Temperatur, Feuchte und Druck ist der Durchfluss eine wichtige Zustandsgröße, deren messtechnische Erfassung in der HLK-Technik von entscheidender Bedeutung ist.

Unterschieden wird hierbei zwischen:

- Volumenstrom $\dot{V}$ je Zeiteinheit mit der SI-Einheit m^3/s
- Massenstrom $\dot{m}$ je Zeiteinheit mit der SI-Einheit kg/s

Kontinuitätsgleichung

Der Kontinuitätsgleichung liegt die angenommene Inkompressibilität des strömenden Mediums zugrunde (Unveränderlichkeit der Dichte ρ):

$$\dot{V} = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{konstant}$$

$\dot{V}$	Volumenstrom	$[\text{m}^3/\text{s}]$
A	Querschnittsfläche	$[\text{m}^2]$
v	Geschwindigkeit	$[\text{m/s}]$

Ändert sich die Dichte ρ während der Strömung, so muss mit dem Massenstrom $\dot{m}$ gerechnet werden:

$$\dot{m} = A_1 \cdot v_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot v_2 \cdot \rho_2 = \text{konstant}$$

$\dot{m}$	Massenstrom	$[\text{kg/s}]$
A	Querschnittsfläche	$[\text{m}^2]$
v	Geschwindigkeit	$[\text{m/s}]$
ρ	Dichte	$[\text{kg/m}^3]$

4.6. Messung in Gasen / Luft und Flüssigkeiten

4.6.1. Prandtl'sches Staurohr

Das Staurohr misst den Gesamtdruck und den statischen Druck. Die Differenz ist der dynamische Druck, aus dem sich die Geschwindigkeit v nach folgender Formel berechnet:

$$p_{\text{dyn}} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

p_{dyn}	Dynamischer Druck
ρ	Dichte
v	Geschwindigkeit

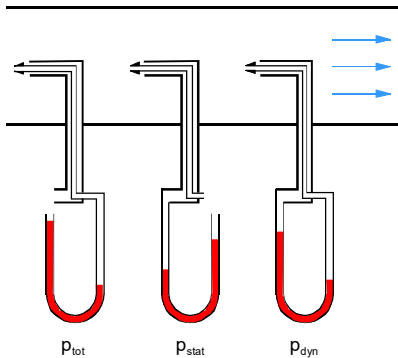


Fig. 4-25 Druckmessung mit dem Staurohr

Das Staurohr misst den Gesamtdruck und den statischen Druck. Die Differenz ist der dynamische Druck, woraus Sie die Geschwindigkeit v nach folgender Formel errechnen können:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{\text{dyn}}}{\rho}}$$

v	Geschwindigkeit
p_{dyn}	Dynamischer Druck
ρ	Luftdichte

Beachte

Mit dem Staurohr wird die Geschwindigkeit also indirekt bestimmt (siehe Hinweise unter „Durchflussmessung“).

Bernoulli-Gleichung

Tritt im Kanal eine Querschnittsänderung auf, so steigt oder sinkt der statische Druck. Umgekehrt verändert sich der dynamische Druck, weil die Geschwindigkeit dem neuen Querschnitt entsprechend variiert. Längs einem Stromfaden gilt bei Vernachlässigung der Reibung die Bernoulli-Gleichung:

$$p_{\text{ges}} = p_{\text{stat}} + p_{\text{dyn}} = \text{konstant}$$

Mit den Bezeichnungen $p_{\text{stat } 1}$, v_1 und $p_{\text{stat } 2}$, v_2 lautet die Gleichung:

$$p_{\text{stat } 1} + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_{\text{stat } 2} + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

p_{stat}	Statischer Druck
ρ	Dichte
v	Geschwindigkeit

Daraus folgt der Wirkdruck Δp :

$$\Delta p = p_{\text{stat } 1} - p_{\text{stat } 2} = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} - \frac{\rho \cdot v_1^2}{2}$$

Δp	$(p_{\text{stat } 1} - p_{\text{stat } 2})$ Wirkdruck
------------	---

Aus dem Druckunterschied lässt sich die Geschwindigkeit und damit die durchfließende Menge bestimmen (siehe Kontinuitätsgleichung).

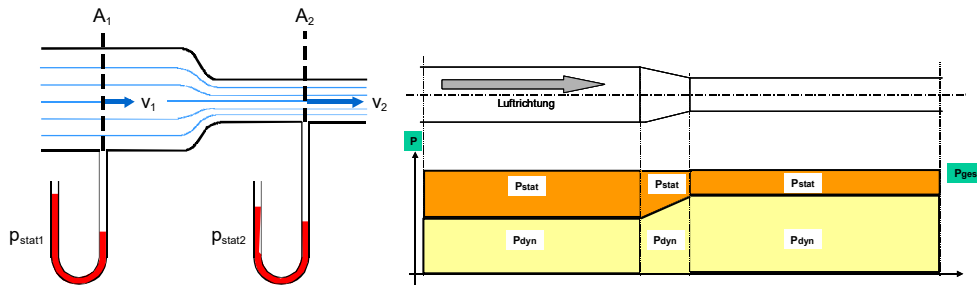


Fig. 4-26 Abnahme des statischen Druckes bei einer Querschnittsverengung

Druckverluste durch Reibung

Bei Lüftungsanlagen mit ihren Hindernissen, Umlenkungen usw. ergeben sich infolge der Reibung Druckverluste, welche der Ventilator durch die von ihm bewirkte Erhöhung des statischen Druckes überwinden muss. Das Bild unten zeigt einen typischen Druckverlauf in einer solchen Anlage.

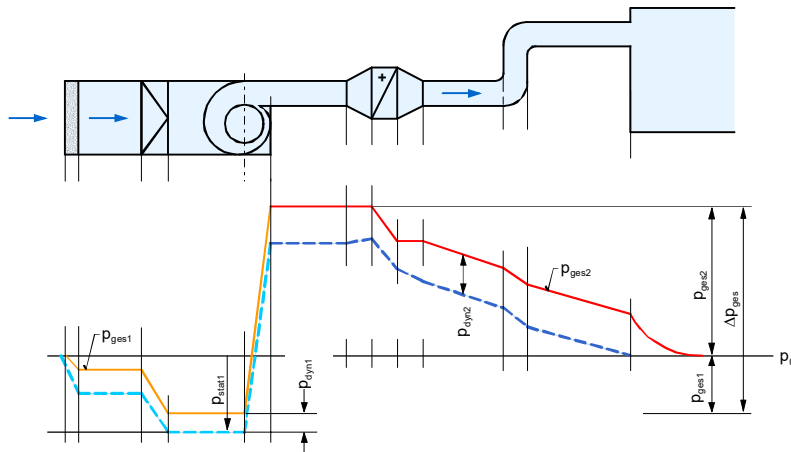


Fig. 4-27 Druckverlauf in einer Lüftungsanlage

4.6.2. Schrägrohr-Manometer

Schrägrohr-Manometer werden als vergleichsweise günstige Geräte zur Messung von Drücken im HLK-Bereich eingesetzt. Vorteile sind ihre kompakte Bauweise, relativ hohe Genauigkeit und Betriebssicherheit.

Prinzip

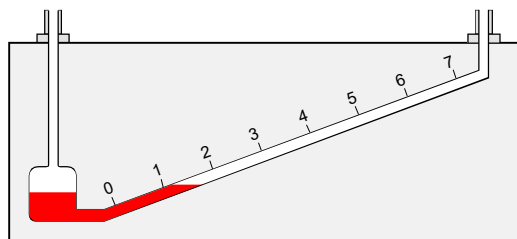


Fig. 4-28 Prinzip des Schrägrohr-Manometers

Wichtigste Werte handelsüblicher Schrägrohr-Manometer:

Druckbereich 0...750 Pa

Ablesegenauigkeit 3...10 %

Die Druckdifferenz wird bestimmt durch den hydrostatischen Druck der Flüssigkeit.

$$P = \rho \cdot h \cdot g$$

P	Hydrostatischer Druck
g	Erdbeschleunigung

Achtung: Dichte des Mediums beachten.

4.6.3. U-Rohrmanometer

Das U-Rohrmanometer besteht aus einem U-förmig gebogenen Glasrohr, das mit einer gefärbten Flüssigkeit bekannter Dichte gefüllt wird (Fig. 4-29). Für die Messung schließen wir einen oder beide Schenkel an die betreffenden Messstellen an. Entsprechend dem Druck oder der Druckdifferenz stellt sich in den beiden Schenkeln des U-Rohres eine Höhendifferenz der Flüssigkeit ein.

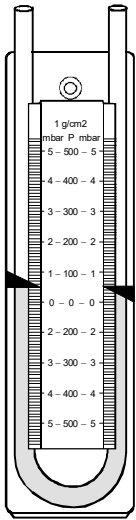


Fig. 4-29 U-Rohr-Manometer

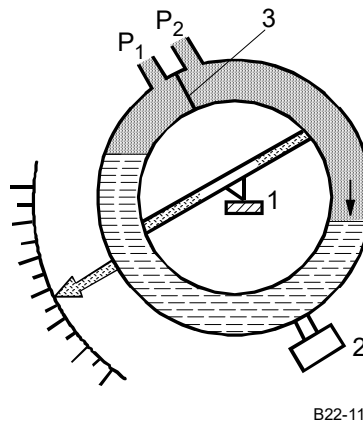


Fig. 4-30 Ringrohrmanometer
1 Lagerung (Nadellager)
2 Gegengewicht
3 Trennwand
 $P_{1,2}$ Druckanschlüsse ($P_2 > P_1$)

Praktische Anwendung des U-Rohrmanometers:

Messung niedriger Drücke oder Druckdifferenzen (0 - 1000 Pa, z.B. für die Filterüberwachung)

4.6.4. Ringrohrmanometer

Beim Ringrohr-Manometer (Ringwaage) (Fig. 4-30) ist der zur Hälfte mit Sperrflüssigkeit gefüllte Ring drehbar gelagert. Die Druckdifferenz auf die Trennwand (T) bewirkt eine Auslenkung des Rings, der nun so weit dreht, bis das angehobene Gewicht (G) ein entsprechendes Gegendrehmoment bewirkt.

Praktische Anwendung des Ringrohrmanometers:

Messung sehr niedriger Drücke oder Druckdifferenzen, z.B. für die Überwachung von Operationsräumen (z.B. 20 Pa.)

4.6.5. Elastische Druckmesser

Die Druckmessgeräte enthalten Messglieder, die sich unter dem Einfluss eines Druckes elastisch verformen. Diese Bewegung wird auf ein Zeigerwerk übertragen.

Je nach Anwendungsfall eignen sich Geräte mit Rohr-, Platten- oder Kapselfedermesssystem.

Rohrfeder-Messsystem

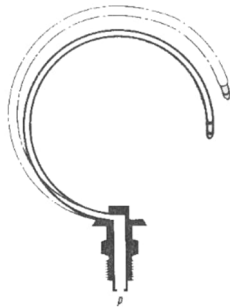


Fig. 4-31 Rohrfedermess-System Rohrfederanometer MAN-R (Fa. Kobold)
 Quelle: Wikimedia Commons,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bourdon_tube_pressure_gauge_glass_front.jpg
 Messbereich: z.B. 0 ... 4 bar

Das Messelement besteht aus einem flachgewalzten Rohr, welche am Ende geschlossen ist und zu einem Kreisbogen von ca. 270° gekrümmt wird. Wird der Innenraum unter Druck gesetzt, so strebt sein ovaler Querschnitt der Kreisform zu und biegt dabei den Kreisbogen zu einem vergrößerten Krümmungsradius. Da die Rohrfeder mit dem offenen Ende fest verankert ist, bewirkt die Veränderungen im Krümmungsradius eine Lageverschiebung des Rohrendes. Diese Veränderung wird über ein Hebel- und Drehsystem zur Anzeige gebracht.

Plattenfeder-Messsystem

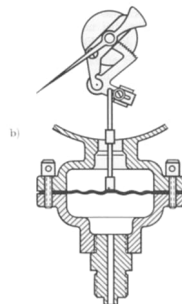
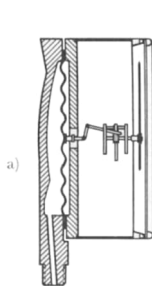


Fig. 4-32 Plattenfedermess-System Plattenfederanometer MAN-R (Quelle: Kobold)
 Messbereich: z.B. 0 ... 100 mbar

Bei diesen Messgeräten besteht das Messelement aus einer federnden Metallplatte, welche am Umfang zwischen Flanschen gehalten wird. Sind die Drücke zu beiden Seiten der Plattenfeder unterschiedlich, so wölbt sie sich entsprechend der Druckdifferenz nach einer Seite.

In Fig. 4-32 sind zwei Schnittbilder dargestellt:

- a) Mit senkrechter Plattenfeder
- b) Mit liegender Plattenfeder und einseitigem Druckanschluss.

Erhält auch die zweite Seite einen Druckanschluss und wird dieser Druckraum gegen die Atmosphäre abgedichtet, erhält man ein Plattenfeder-Differenzdruckmessgerät. Bei Messgeräten mit senkrecht angeordneter Plattenfeder ergeben sich bessere Übertragungsmöglichkeiten und sie sind auch für den Einbau in eine Instrumententafel besser geeignet. Für Messbereiche unter 1000 Pa reicht der Hub der Plattenfeder nicht mehr aus und man verwendet das Kapselfedermess-System.

Kapselfedermess-System

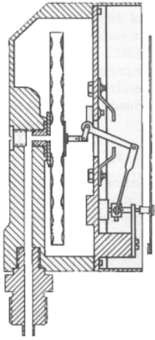


Fig. 4-33 Kapselfedermess-System Kapselfedermanometer MAN-R (Quelle: Kobold)
Messbereich: z.B. 0 250 mbar

Das Messsystem besteht aus zwei Plattenfedern die, wie in Fig. 4-33 dargestellt, miteinander verbunden sind. Eine Platte ist fixiert und somit macht bei einer Druckänderung die andere den doppelten Hub.

4.6.6. Federbelastete Membranen und Bälge

Bei diesem Messsystem wird der zu messende Druck über eine schlappe Membrane oder über einen metallischen Balg in eine Kraft umgesetzt, welche auf eine Schraubenfeder wirkt (Fig. 4-34). Als Werkstoffe für schlappe Membranen eignen sich beispielsweise Gummi, Leder und Kunststoffe mit möglichst großer Flexibilität.

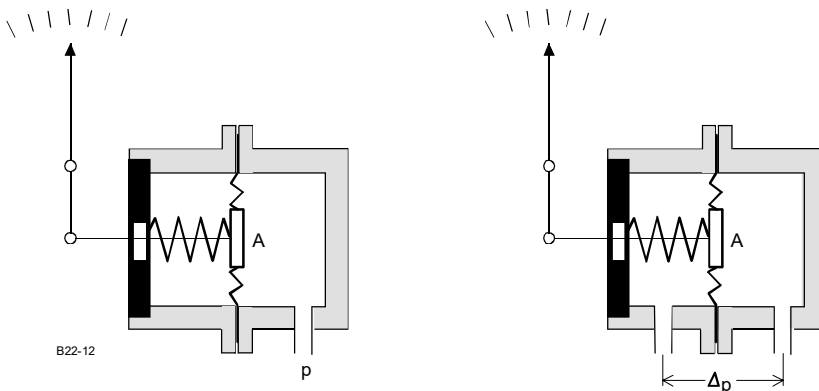


Fig. 4-34 Messprinzip von Druckmessgeräten mit schlapper Membrane

Wirkt der Druck p auf die Membranfläche A , so drückt dieser die Feder zusammen, bis die Federkraft der Kraft aus $p \cdot A$ das Gleichgewicht hält. Der Hub der Schraubenfeder ist zum Druck bzw. zur Messkraft proportional. D.h. es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Druck und Federweg. Der Federweg wird über ein Hebelsystem auf einen Zeiger, eine Schreibfeder, Tauchspule oder auf einen Spannungsteiler übertragen.

Bei doppelseitiger Beaufschlagung der schlappen Membrane lassen sich mit dieser Methode auch Differenzdrücke erfassen.

Messbereiche

Im Allgemeinen eignen sich Druckmesser mit schlappen Membranen für Messbereiche von 0...50 Pa oder 0...3000 Pa und zwar für Über-, Unter- und Differenzdruckmessung.

Das Anwendungsgebiet im Bereich der HLK- Technik ist sehr groß und reicht von der Filter- und Keilriemenüberwachung bis hin zur Messeinrichtung für Druckregelungen im Lüftungssystem.

4.6.7. Nutzung elektrischer Effekte (in Gas und Flüssigkeit)

Es sind verschiedene Methoden zur elektrischen Druckmessung bekannt. Ein Draht verändert z.B. seinen elektrischen Widerstand durch Druckeinfluss. Der Zusammenhang zwischen Druck und Widerstand ist linear und bei geeignetem Widerstandsmaterial auch temperaturunabhängig. Diese Messmethode wird eher zur Messung höherer Drücke 300 bis 3000 kPa angewendet.

Eine weitere Methode beruht auf der Druckabhängigkeit des Oberflächenwiderstandes von Leitern. Zur Vergrößerung der Leiteroberfläche (meist Kohle in Plättchenform) werden die Plättchen zu einer Säule aufgeformt. Bei sehr genauer Fertigung können Messfehler in Grenzen von $\pm 1 - 3 \%$ erreicht werden. Messgeräte, welche nach dieser Methode arbeiten, eignen sich wegen der hohen Eigenfrequenz besonders zur Aufzeichnung schnell ändernder Drücke.

Piezoelektrisches Verfahren

Diese Methode nutzt den Effekt aus, dass Kristalle wie Quarz, Turmalin, Rochellesalz und andere die Eigenschaft haben, die Oberfläche dem Druck proportional elektrisch aufzuladen, was praktisch trägheitsfrei geschieht. Mit dieser Methode lassen sich schnell veränderliche Drücke und Druckschwingungen sehr gut erfassen. Da die Ladung sehr gering ist, muss die entstehende Potentialdifferenz über elektrische Verstärker angehoben werden. Auch bei dieser Methode werden mehrere Plättchen übereinander geschichtet um somit über eine größere Oberfläche eine höhere Ladung zu erzielen.



- Piezoresistives Messsystem
- Ausgangssignal DC 0 ... 10 V
- Ganzer Fühler mit Kunststoffmasse vergossen
- Sehr geringe Temperaturempfindlichkeit
- Hohe Temperaturbeständigkeit
- Kein mechanisches Altern, kein mechanisches Kriechen

Fig. 4-35 Druckfühler zur Messung von Über- und Unterdrücken in HLK-Anwendungen mit kalten Flüssigkeiten oder Gasen
(Quelle: Siemens)

Anwendung

Diese Druckfühler eignen sich zur Messung von statischen und dynamischen Über- oder Unterdrücken in HLK-Anwendungen, insbesondere in Hydraulik- und Kältesystemen mit Flüssigkeiten oder Gasen. Sie arbeiten im piezoresistiven Messprinzip.

Mit der Keramikmembrane (Dickschicht-Hybridtechnik) wird der zu messende Druck durch direkten Medienkontakt erfasst. Der erfasste Druckwert wird elektronisch in ein lineares Ausgangssignal von DC 0...10 V umgewandelt.

4.6.8. Flügelradanemometer

In Lüftungs-/Klimaanlagen erfolgt die Volumenstrommessung meist wie unter Fig. 4-25 beschrieben, über den dynamischen Druck, oder mittels Hitzdraht- bzw. Flügelrad-Anemometer.

Beim Flügelradanemometer besteht im Idealfall zwischen der Umfangsgeschwindigkeit v_U und der Luftgeschwindigkeit v die Beziehung:

$$v_U = v \cdot \tan \alpha$$

α	Anstellwinkel zwischen Flügelblatt und Strömungsrichtung
----------	--

Eigenschaften

Mit Flügelradanemometern wird bei rasch veränderlichen Geschwindigkeiten ein zu hoher Mittelwert gemessen. Im Weiteren ist bei großen Veränderungen der Dichte eine Korrektur erforderlich. Etwa 10 % Dichteänderung verursachen eine Abweichung der Geschwindigkeitsmessung von ca. 5 %.

Wenn mit einem Flügelrad in kleinen Leitungsquerschnitten A_k gemessen wird und das Verhältnis von effektivem Anemometerquerschnitt A_g zu Leitungsquerschnitt größer als 0.01 ist, muss dies nach folgender Formel korrigiert werden:

(Korrektur-Formel)

$$v_{\text{eff}} = \frac{A_k - A_g}{A_k} \cdot v_{\text{displ}}$$

v_{eff}	Effektive Geschwindigkeit
A_k	Leitungsquerschnitt
A_g	Effektiver Anemometerquerschnitt
v_{displ}	Geschwindigkeit angezeigt

Flügelradanemometer eignen sich besonders gut zur schnellen Überprüfung der Luftmengen auf Anlagen und Geschwindigkeits-Messungen über 1 m/s.



Fig. 4-36 Flügelradanemometer mit verschiedenen Messelementen (Quelle: Schiltknecht)

4.6.9. Hitzdrahtanemometer

Der an einem elektrisch beheizten Messfühler vorbeigeführte Luftstrom kühlt diesen ab, so dass bei konstanter Heizleistung die Temperatur des Fühlers oder bei konstanter Temperatur die Heizleistung ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit ist.

Eigenschaften

Hitzdrahtanemometer haben eine kurze Ansprechzeit und eignen sich besonders für kleine Geschwindigkeiten ab 0,1 m/s. Thermosonden haben eine robustere Bauart und deshalb eine größere Ansprechzeit, ansonsten gelten die gleichen Bedingungen wie beim Hitzdraht. Ein besonderes Problem stellt die Temperaturkompensation und die Verschmutzung durch Staub dar. Hitzdrahtanemometer sind sehr empfindliche Messgeräte und sollten dementsprechend behandelt werden.



Fig. 4-37 Hitzdrahtanemometer (links) mit ausziehbarer Universalmesssonde und spezieller Messsonde für Raumströmungen (rechts) (Quelle: testo)

Wichtig

- Bei turbulenzarmer Strömung (z.B. in Reinräumen) sind höhere Raumluft-Geschwindigkeiten zulässig als bei sehr turbulenter Strömung.
- Allgemein sind bei höherer Raumluft-Temperatur höhere Raumluft-Geschwindigkeiten zulässig als bei tieferen Raumluft-Temperaturen.

4.7. Messung in Flüssigkeiten

Bei der Volumenmessung in Flüssigkeiten unterscheidet man zwei Möglichkeiten:

- Ruhendes Medium
- Fließendes Medium

Ruhendes Medium

Flüssigkeitsmengen in Behältern lassen sich messtechnisch auf indirektem Wege bestimmen. Dazu wird die Füllstandshöhe ermittelt und über den bekannten maximalen Behälterinhalt auf den momentan vorhandenen Flüssigkeitsinhalt zurückgeschlossen.

Mögliche Verfahren sind:

- Schauglasmethode
- Schwimmermethode
- Leitfähigkeitsmethode

Fließendes Medium

In der Mehrzahl aller Fälle steht jedoch das zeitabhängig strömende Volumen eines bewegten Mediums d.h. die Durchflussmenge, im Vordergrund.

Mögliche Verfahren sind:

- Füllkammerzähler
- Verdrängungszähler
- Durchfluss-Geschwindigkeitsmesseinrichtungen

4.7.1. Füllkammerzähler

Das Messprinzip besteht darin, dass das zu messende Medium in eine Messkammer fließt. Ist diese gefüllt, wird das Medium weitertransportiert, währenddessen sich die nächste Messkammer füllt.

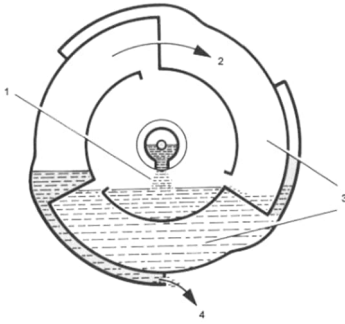


Fig. 4-38 Trommelzähler

- 1 Einlauf
- 2 Drehrichtung
- 3 Messkammern
- 4 Auslauf

4.7.2. Verdrängungszähler

Die Messeinrichtung hat eine bewegliche Kammer, welche allein vom strömenden Medium angetrieben wird und die Umdrehungen gezählt werden.

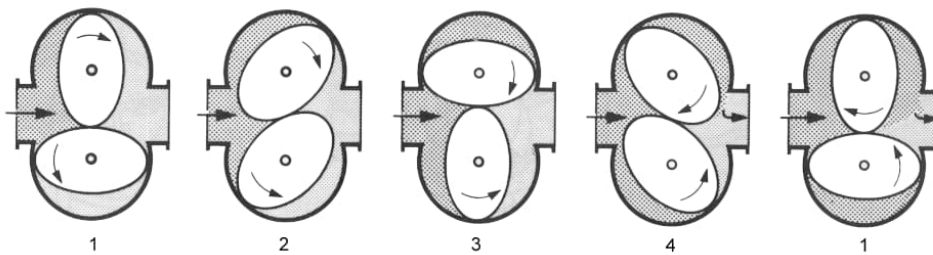


Fig. 4-39 Ovalradzähler (Funktionsablauf)

Durchfluss-Geschwindigkeitsmesseinrichtungen

Dieses Messverfahren besteht darin, dass die Durchflussmenge über die Durchflussgeschwindigkeit und dem gegebenen Durchflussquerschnitt ermittelt wird.

Beim Messen von Geschwindigkeiten sind ggf. die Gesetzmäßigkeiten von laminaren und turbulenten Strömungsformen zu beachten, da das Geschwindigkeitsprofil in Stromröhren unterschiedlich ist. Ebenso müssen auch die beim Messvorgang in der Flüssigkeit auftretenden Druckverluste berücksichtigt werden.

Die Möglichkeiten auf diese Art das Durchsatzvolumen zu bestimmen sind sehr vielfältig.

4.7.3. Flügelradzähler

Das Medium strömt tangential ein senkrecht zur Strömung gelagertes Flügelrad an, dessen Zahl der Umdrehungen über ein Zahnradgetriebe direkt (oder indirekt über Magnetkupplung) auf ein Messwerk übertragen wird.

Die Anzeige erfolgt dann in Volumen- oder Geschwindigkeitseinheiten.

Man unterscheidet Einstrahl- oder Mehrstrahlzähler.

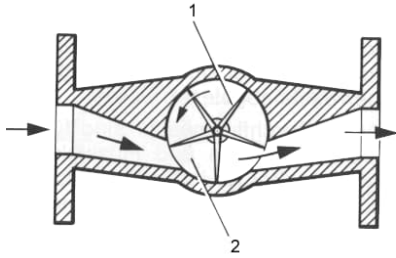


Fig. 4-40 Flügelradzähler
1 Flügelrad
2 Messkammer



Fig. 4-41 Flügelrad Wasserzähler (Quelle: Siemens)

4.8. Wärme-Mengenmessung

Da Energieverbrauch und Energieeinsparung auch gesetzlichen Bestimmungen unterworfen sind, ist das Messen von Wärmemengen eine wichtige Funktion in der Gebäudeautomation.

Die Wärmemenge $\dot{Q}$ ist indirekt über das Produkt aus Durchflussmenge und Temperaturdifferenz messbar, wobei c die spezifische Wärmekapazität ist. Es gilt die Formel:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

$\dot{Q}$	J/s = W
$\dot{m}$	kg/s
c	J/(kgK)
ΔT	K

Elektronische Zähler ermitteln den Volumenstrom mit elektrischen Spannungsimpulsgebern, z.B. Flügelradzähler, mit Induktionsdurchflussmesser oder Ultraschallmessgeräten. Die Vor- und Rücklauftemperaturen werden mit Widerstandsthermometern erfasst. Ein elektronisches Rechenwerk verarbeitet dann die Signale zur Produktbildung und digitalen Anzeige mit eventueller Datenerfassung.

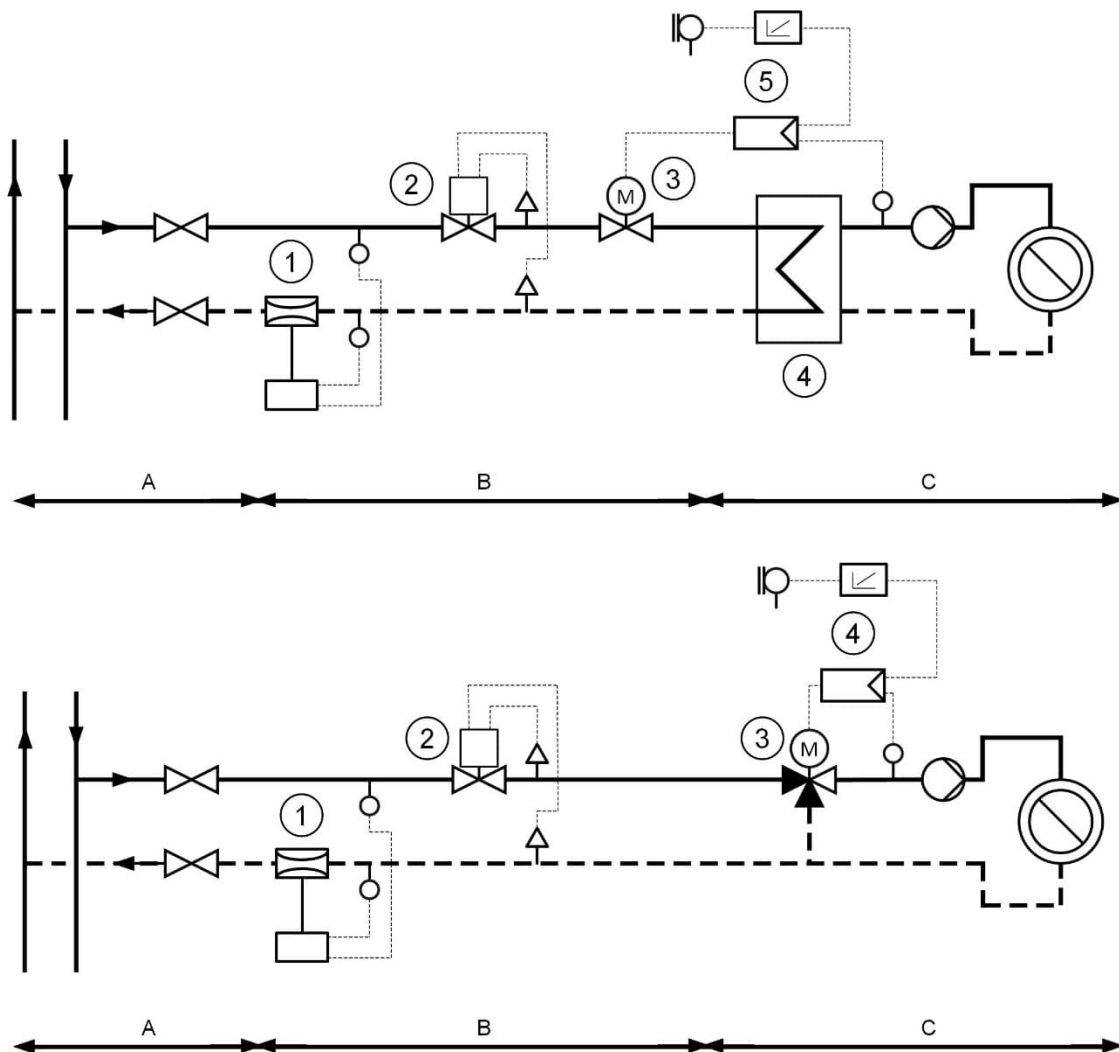


Fig. 4-42 Fernwärme-Übergabestation
oben: indirekte Einspeisung

unten: direkte Einspeisung (ohne Wärmeübertrager)

- A Verteilnetz
- B Übergabestation
- C Abnehmeranlage

- 1 Wärmezähler
- 2 Differenzdruckregler
- 3 Regelventil (Temperaturregelung)
- 4 Wärmeübertrager



Fig. 4-43 Elektronischer Wärmezähler (Quelle: Siemens)

4.9. Sonnenstrahlungsfühler

Wirkungsweise

Zur Bestimmung der Sonneneinstrahlung arbeitet der Fühler mit zwei Messelementen, welche beide die Umgebungstemperatur messen. Ein Messelement ist der Sonne ausgesetzt, das andere ist abgedeckt. Die Differenz zwischen den beiden Messwerten verhält sich direkt proportional zur Sonneneinstrahlung. Sie wird als DC 0...10 V-Signal abgegeben.

Der Fühler ist in einer Höhe von mindestens 3 m über dem Boden an einem geeigneten Montageort anzubringen.



Fig. 4-44 Fühler zum Messen der Sonneneinstrahlung (Quelle: Siemens)

Anwendungsbereich

Der Sonnenfühler wird als Führungsfühler in Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage eingesetzt, in denen eine Kompensation der Sonneneinstrahlung vorgesehen ist. Das ist dort erforderlich, wo Gebäude oder Gebäudeteile mit großen Fensterflächen stark der Sonne ausgesetzt sind, besonders dann, wenn keine thermostatischen Heizkörperventile eingesetzt werden können.

4.10. Windfühler



Fig. 4-45 Fühler zum Messen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung (Quelle: Vaisala)

Anwendungsbereich

Der Windfühler wird z.B. als Führungsfühler in Heizungsanlagen eingesetzt, oder allgemein als Information für windabhängige Funktionen wie z.B. Schutz der Beschattungseinrichtungen.

5 Fühlerplatzierung

Die folgenden Ausführungen wollen Ihnen helfen, die häufigsten Fehler bei der Fühlerplatzierung erkennen und vermeiden zu können. Nach einer Allgemeinbetrachtung über Strömungen, Druckverhältnisse und Messmethoden folgen Hinweise mit Schwerpunkt auf der Platzierung und der Montage von Messeinrichtungen wie Geschwindigkeits- und Druckfühler in Kanälen.

Dieses Kapitel zeigt:

- Das professionelle Platzieren von Fühlern - hauptsächlich bezüglich der Geschwindigkeits- und Druckmessung.
- Die häufigsten Fehler beim Platzieren von Fühlern.

Hochpräzise Anzeige für oft ungenaue Daten

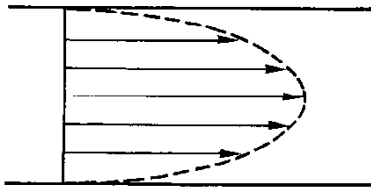
Im Rahmen moderner Regeleinrichtungen ist es unter anderem zu einer Selbstverständlichkeit geworden, Ist-Werte unterschiedlicher physikalischer Größen mit mindestens einem Dezimalwert nach dem Komma anzuzeigen (z.B. Temperatur, Feuchte, Druck und andere). Mit dieser hochentwickelten Gerätetechnik scheint die richtige Erfassung der Messwerte eine automatische, selbstverständliche Begleiterscheinung zu sein.

Tatsächlich sieht aber die Realität häufig anders aus. Die Platzierung von Fühlern ist unverändert ein kritischer Schwachpunkt innerhalb eines Regelkreises. Nachfolgend soll versucht werden, aus den praktischen Erfahrungen heraus häufig vorkommende Schwachstellen aufzuzeigen, um eben Betriebsstörungen, schlechtes Betriebsverhalten, ineffiziente Funktionen, erhöhten Energieverbrauch oder ein nicht voll ausgeschöpftes Energiesparpotential zu vermeiden.

5.1. Strömungsbilder, Geschwindigkeitsprofile

Flüssigkeiten und Gase zeigen grundsätzlich zwei verschiedene Strömungsbilder:

Laminare Strömung

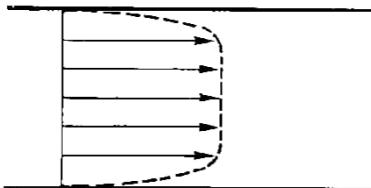


Bei der laminaren Strömung (auch „Schichtströmung“) bleiben die Strömungsfäden erhalten.

Die einzelnen Schichten gleiten übereinander und bewirken ein parabelförmiges Geschwindigkeitsprofil.

Fig. 5-1 Geschwindigkeitsprofil bei laminarer Strömung

Turbulente Strömung



Bei der turbulenten Strömung zerfallen die Strömungsfäden und verlieren sich. Quer- und Mischbewegungen entstehen. Die mittleren Partien führen den äußeren Schichten Energie zu. Die langsameren äußeren Teilchen wandern nach innen und wirken dort bremsend. Dadurch wird das Geschwindigkeitsprofil ausgeglichener.

Fig. 5-2 Geschwindigkeitsprofil bei turbulenter Strömung

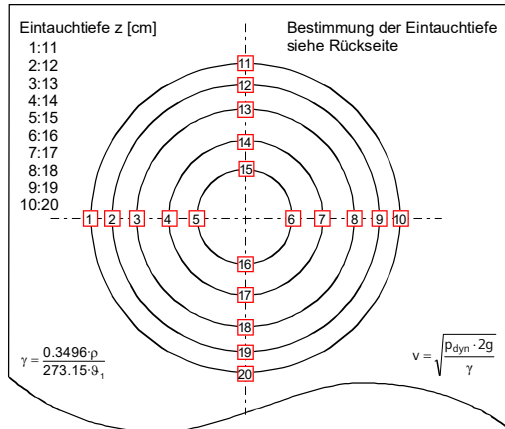
Kritische Geschwindigkeit

Für ein gegebenes Rohr erfolgt der Übergang von der laminaren zur turbulenten Strömung bei einer bestimmten kritischen Geschwindigkeit („kritische Reynolds-Zahl“) vgl. z.B. „Recknagel - Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 78. Ausgabe 2017/2018“.

Die laminare Strömung tritt in der HLK-Technik verhältnismäßig selten auf. Sie ist erwünscht bei Lüftungsanlagen, weil sie geräuscharm ist, und unerwünscht in Wärmeaustauschern, da der Wärmeübergang schlechter wird.

Volumenstrom-Messung

Die aus den Geschwindigkeitsprofilen bestimmte mittlere Geschwindigkeit, multipliziert mit der Querschnittsfläche, ergibt den Volumenstrom. Soll ein Geschwindigkeitsfühler den Volumenstrom messen, so muss das zugehörige Geschwindigkeitsprofil ermittelt werden. Dies erfolgt mit Staurohren, Flügelrad-Anemometern, thermoelektrischen Anemometern und anderen Geräten, die an einer Reihe von Messpunkten über dem ganzen Rohr- oder Kanalquerschnitt angebracht werden.



Das Bild zeigt den Ausschnitt aus einem Messblatt für einen runden Querschnitt. Mindestens 10 Messpunkte sind erforderlich.

Ein rechteckiger oder anderer Querschnitt wird in eine Anzahl gleich großer Teilflächen unterteilt.

Die Messung erfolgt im Schwerpunkt der betreffenden Teilfläche.

Fig. 5-3 Messblatt für runden Querschnitt (Ausschnitt)

5.2. Die Zeitkonstante bei Fühlern in Flüssigkeiten

Bei Messungen in Rohrleitungen werden Fühler mit Tauchhülsen eingebaut.

Die Tauchhülsen bilden das erste Verzögerungsglied, der Luftinhalt zwischen Tauchhülse und Messelement das zweite. Das dritte Verzögerungsglied bildet die Zeitkonstante des Fühlers.

Von diesen drei in Serie ablaufenden Verzögerungen ist jene des Luftspaltes zwischen Tauchhülse und Fühler die größte, da Luft eine schlechte Wärmeleitfähigkeit hat. Dieses schlechte Übertragungsverhalten lässt sich durch Ausfüllen des Luftspaltes mit Wärmeleitpaste stark verbessern.

5.3. Platzieren eines Fühlers

Für die Platzierung des Fühlers muss ein Ort gewählt werden, der folgende Kriterien erfüllt:

- Regeltechnisch optimaler Messort
- Zugänglichkeit für das Elektrik-Personal
- Zugänglichkeit für die Inbetriebnahme
- Zugänglichkeit für Kontrollen und Service

Fig. 5-4 bis Fig. 5-6 geben Hinweise für die richtige Platzierung verschiedener Fühler.

5.4. Fremdeinflüsse

Fühler müssen so montiert und angeschlossen werden, dass das Fühlersignal nicht dauernd oder zeitweise durch Fremdeinflüsse verfälscht wird. Fremdeinflüsse können so in die Messung eingebracht werden:

- Elektrisch: Durch die Fühlerzuleitung, und/oder
- Physikalisch: Durch falsche Messgrößen

Verbindungen

Fühlerzuleitungen müssen nach Vorschrift der Regelfirma ausgewählt und montiert werden.

Dichtigkeit

Durch die Leitungsrohre für die Fühlerleitungen (Kunststoffrohre / Panzerrohre) kann eine Luftströmung zum Messort entstehen, die den Messwert verfälscht (z.B. den Temperaturfühler abkühlt). Daher müssen diese Rohre abgedichtet werden.

Anforderung an die Regelung

Die Anforderungen an die Regelung (Stabilität, Toleranz usw.) bestimmen, ob eine punktförmige Messung (mit den entsprechenden Fühlern) genügt oder ob eine durchschnittsbildende Messung erforderlich ist.

Beachte:

Durchschnittsbildende Messungen sind immer dann nötig, wenn in Schichtungen gemessen werden muss.

5.5. Messprobleme

Schichtungen

Die häufigsten Messprobleme werden durch Temperatur-Schichtungen ausgelöst. Bei jeder Luftbehandlung entstehen Temperatur-Schichtungen (Heizen/Kühlen, Befeuchten/Entfeuchten, Zusammenführen von zwei Luftströmen). Schichtungen sind auch bei anderen physikalischen Größen zu finden (z.B. Feuchte, Strömung, Druck usw.).

Schichtungen werden auch durch die Ventilatoren nur sehr bedingt abgebaut, ebenso wenig ist das Kanalnetz in der Lage, Schichtungen zu vermischen (z.B. Winkel/T-Stücke mit Leitblechen). Aus solchen Schichtungen resultieren:

- Ungleiche Filterbeaufschlagung (partielle Vereisung oder Verschmutzung einzelner Filterzellen)
- Ungleiche Ausnützung der Wärmetauscheroberfläche, ungleichmäßige Luftaustritts-temperaturen
- Schlechtes Regelverhalten, Einfriergefahr, Frostalarm
- Bei doppelseitig saugenden Radialventilatoren Temperaturschichtungen im druckseitigen Netz teilweise bis zu den Luftauslässen (eine Raumseite kalt, eine warm)

5.6. Beispiele zum Platzieren von Fühlern

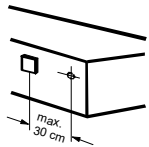
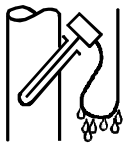
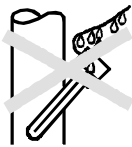
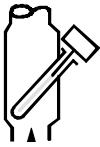
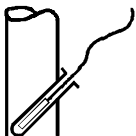
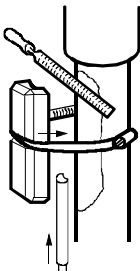
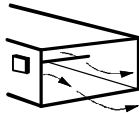
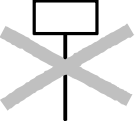
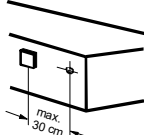
 Zu jedem Fühler gehört eine dicht verschliessbare Messöffnung	 Kabelanschluss von unten, so dass kein Wasser in das Fühlergehäuse gelangen kann	
 Fühler mit der ganzen aktiven Länge im Medium eintauchen	 Falscher Einbau.	
 Gegen die Flussrichtung einbauen	 Falscher Einbau	 Neigung beachten
 Das Fühlerelement ist lageunabhängig, muss aber in seiner ganzen Länge vom zu messenden Medium (Wasser-Luft) umspült sein.	 Kontaktfläche blank feilen und Hohlraum zwischen Fühler und Rohr mit Wärmeleitpaste ausfüllen, um Wärmeleitung zu verbessern.	 Stabfühler muss auf der ganzen Länge von Luft umströmt werden.
 Wo Schichtungen möglich sind (z.B. nach Mischklappen, Luftheritzer, Kühler oder WRG) keine Stabfühler verwenden (siehe Mittelwertfühler)		 Zu jedem Fühler gehört ein Kontroll-Messloch.

Fig. 5-4 Fühlerplatzierungen

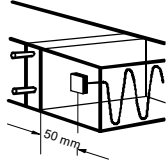
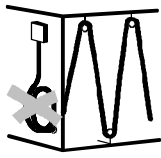
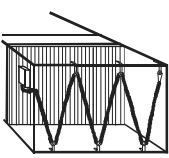
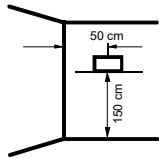
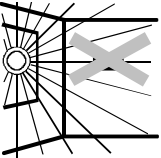
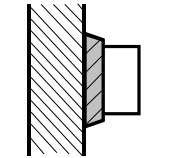
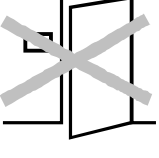
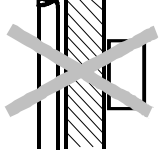
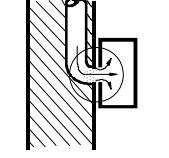
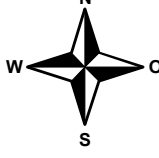
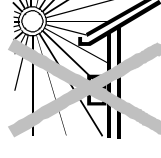
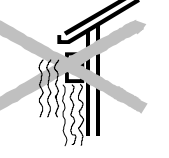
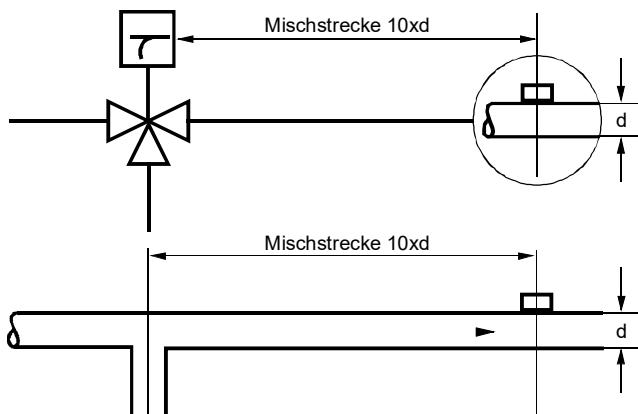
 Distanz zwischen Wärmetauscher und Fühler mindestens 50 mm.	 Beim Mittelwert-Fühler muss die ganze Fühlerlänge in den Luftkanal.	 Fühlerelement gleichmässig über den gesamten Querschnitt verteilen.
 Fühler auf ca. 1,5 m Höhe in der Aufenthaltszone und min. 50 cm von der nächsten Wand entfernt montieren.	 Nicht da, wo die Sonne den Fühler anstrahlen kann!	 Bei Massivwänden (Stahl, Beton, usw.) ist wärmedämmende Unterlage zwingend.
 Nicht in unmittelbarer Nähe der Türe!	 Nicht an Wänden, hinter denen sich Warmwasserleitungen befinden!	 Kunststoffschläuche/Panzerrohre abdichten! (In diesen Rohren entsteht Zugluft.)
 Der Montageort, bezogen auf die Himmelsrichtung, wird durch das Anlagekonzept bestimmt	 Nicht der direkten Sonnenbestrahlung aussetzen!	 Nicht auf Fassaden mit grosser Auftriebswärme (Metall) montieren! Nicht auf Fassaden, die durch Sonneneinstrahlung aufgeheizt werden!

Fig. 5-5 Fühlerplatzierungen



Nach der Mischung zweier Wasserströme mit unterschiedlichen Temperaturen (wegen der Schichtungen) eine genügend grosse Distanz Mischer-Fühler einhalten.

Fig. 5-6 Fühlerplatzierungen - Mischstrecke

5.7. Temperaturmessung in Wasser

Durchmischen

Für die Qualität einer Messeinrichtung in strömenden Medien ist in erster Linie eine ausreichende Durchmischung am Messort entscheidend. Erst in zweiter Linie kommt die Unterscheidung, ob Tauch- oder Anlegefühler.

Kriterien zur Ermittlung des Messortes

Zur Ermittlung des Messortes sind nachfolgend einige Kriterien zusammengestellt:

- Mindestens 1 m nach dem Mischpunkt, z. B. Ventil/-Mischer
- Immer der Umwälzpumpe nachgeschaltet (Die Verwirbelung in einer Umwälzpumpe ist jedoch keine automatische Garantie für gute Durchmischung.)

Für Tauchfühler

- Tauchtiefe mindestens bis Rohrmitte
- Montage des Tauchfühlers möglichst in einem Bogen mit der Strömungsrichtung gegen den Fühler

Für Anlegefühler

- Metallisch blanke Rohrfläche für optimalen Wärmeübergang am Messelement
- Feste mechanische Verbindung durch Spannband
- Wärmeleitpaste nur nach Empfehlung des Herstellers der Messeinrichtung
- Gerades Rohrstück einem Krümmer vorziehen.
- Möglichst in die Rohrisolation integriert oder mindestens direkt eingefasst.



Fig. 5-7 Anlege-temperaturfühler



Tauch-temperaturfühler (Quelle: Siemens)

Stolpersteine

- Rohrisolationsstärke und elektrischer Anschluss (Zugluft durch das Rohr)
- Speicher- oder speicherähnliche Rohrnennweiten

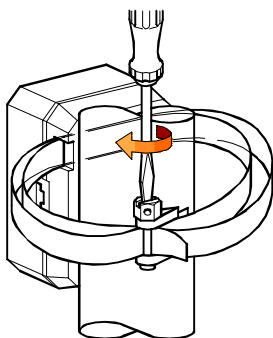
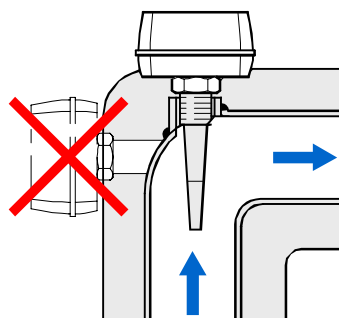


Fig. 5-8 a: Zur Montage von Anlegefühlern



b: Zur Montage von Tauchfühlern

5.8. Temperaturmessung in Luft

Mit Luft ist es schwieriger

Temperaturmessungen im Medium Luft gelten grundsätzlich dieselben Grundsatz-Anforderungen wie beim Wasser. Nur: Die Luft kommt diesen Anforderungen um ein Vielfaches schwieriger nach als das Wasser - im Kanal bedingt durch die größeren Abmessungen und isothermischen Strömungsverhältnisse, in der frei strömenden Luft (Außentemperatur, Raumtemperatur) durch zusätzliche Störungen der Strömung.

Zusammenfassung

Temperaturfühler für das Medium Luft lassen sich nach Technik und Bauart grob in die folgenden Bereiche aufteilen:

- Stabfühler
- Patronenfühler mit Kapillarrohr - Mittelwertfühler
- Raumfühler - Außenfühler
- Windfühler - Sonnenfühler

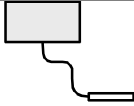
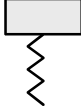
Montage-Eigenschaften

- Im Gegensatz zu Flüssigkeits-Fühlern können Lufttemperatur-Fühler auf Grund ihrer Technik lageunabhängig montiert werden.
- Da die Sonden bei einem Teil der Fühler einsatzbedingt wesentlich extensiver ausgebildet sind, müssen die entsprechenden Kriterien besonders beachtet werden.

Kriterien zur Ermittlung des Montageortes (Übersicht)

Unterschiedliche Typen und Techniken verlangen ebenso unterschiedliche Montageorte. Beachten Sie die folgenden Kriterien zu den wichtigsten Lufttemperatur-Fühlern:

Tabelle 5.1 Luftfühler

Typ	Symbol	Bei der Montage beachten
Stabfühler		• Vollständige Umströmung des Fühler-Elementes mit dem zu messenden Medium • 1 Kontroll-Messloch je Fühler • Keine Stabfühler verwenden bei möglichen Schichtungen (z.B. nach Mischklappen, Luft-erhitzern, Kühlern)
Kapillarrohrfühler		• Gerätekopf stets höher als Fühlerpatrone installieren • Fühlerpatrone nach unten neigen • Umgebungstemperatur am Apparatkopf muss größer sein als jede der Fühlerpatrone
Mittelwertfühler		• Distanz Wärmetauscher – Fühler min. 50 mm • Gesamte Fühlerlänge muss in den Luftkanal • Fühlerelement gleichmäßig auf den gesamten Querschnitt verteilen!
Raumfühler		Raumfühler montieren Sie • Auf ~1.5 m Höhe in der Aufenthaltszone • Min. 50 cm von der nächsten Wand • Nicht der Sonnenbestrahlung ausgesetzt • Bei Massivwänden wärmegeklämmt • Nicht an Außenwände, Nischen oder Gestelle • In der Nähe von Zuleitungsrohren (z.B. Elektro-leitungen) nur montieren, wenn diese vollständig abgedichtet sind.

Außenfühler		• Nie direkter Sonnenbestrahlung aussetzen • Nie auf Fassaden mit großer Auftriebswärme montieren • Nicht über Lüftungs-Austrittsöffnungen montieren
Anlegefühler		• Montage-Oberfläche muss blank sein • Fühler muss fest anliegen • Immer Wärmeleitpaste zwischen Fühler und Montage-Oberfläche verwenden

5.9. Messen der Außentemperatur bzw. der Witterung

Gute alte Zeit...

Die früher allgemein gültige pauschale Aussage innerhalb der Heizungstechnik „Immer Nordseite für den Außenfühler“ ist heute mit Sicherheit so nicht mehr gültig, sondern ist zu differenzieren. Beachten Sie die folgenden Kriterien:

Kriterien für einen günstigen Montageort

- Repräsentativ für das Gebäudeinnere bzw. für den Anwendungsbereich im Gebäudeinneren (z. B. Zonenteilungen - Südzone - bzw. Grundlastverfahren).
- Bei Einzelraum- bzw. Zonenregelungen ohne klare Zonenzuordnung: N-O (Grundversorgung)
- bis und mit drei Geschosse: 2/3 Gebäudehöhe
- Über drei Geschosse zwischen 2. und 3. Geschoss
- Für Wandmontage sind die herstellerspezifischen Angaben zu berücksichtigen (z.B. auf der Wand, an der Wand aufliegend, in der Wand).
- Strömungstechnische Hindernisse dringend vermeiden (z.B. Mauervorsprünge, Balkone usw.)
- Fremdwärme-Beeinflussung durch Fenster und Fortluftöffnungen beachten.
- Nicht im Außenluftkanal (hinter Außenluftklappen) bzw.
- Anfahrverhalten ist zu berücksichtigen.

Stolpersteine

Dynamische Schattenwirkungen, Warm- oder Fehlströmungen.

Korrekte Montage

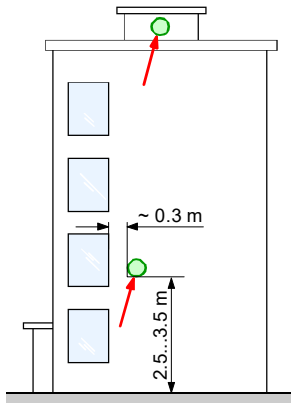


Fig. 5-9 Zur Montage von Außentemperatur-Fühlern



Fig. 5-10 Außentemperaturfühler (Quelle: Siemens)

Falsche Montage

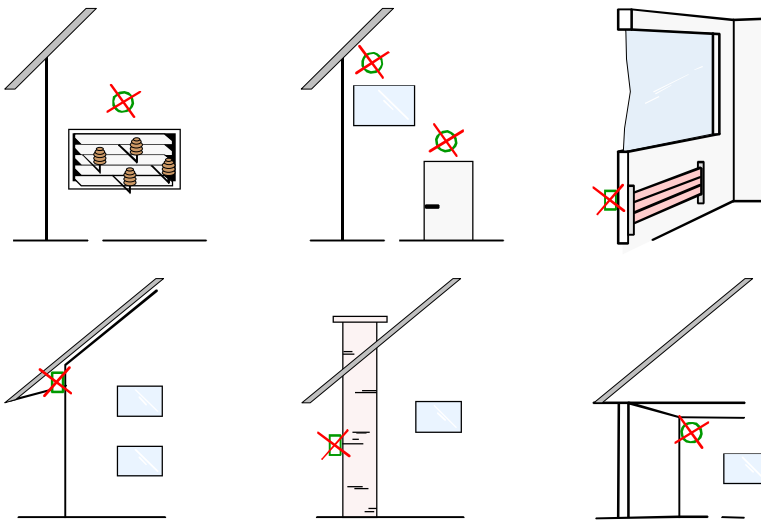


Fig. 5-11 Zur Montage von Außentemperatur-Fühlern – Wie es nicht sein sollte

5.10. Temperaturmessung im Luftkanal

Durchmischen

Die beim Wassertemperaturfühler bereits ausgeführte grundsätzliche Forderung einer guten Durchmischung gilt für den Kanaltemperaturfühler in absolut gleicher Weise.

Inversion

Je nach Betriebsweise und Jahreszeit sind unterschiedliche isothermische Verhältnisse besonders bei der zentralen Luftaufbereitung anzutreffen. Dabei sind die Mischkammer und jeder Wärmetauscher die Hauptverursacher: Die sich aus der Mischkammer ergebende Schichtung kann sich zwar stromabwärts abbauen, durch die Temperaturverhältnisse eines Lufterhitzers bzw. eines Kühlers können sich jedoch weitere Überlagerungen ergeben. Der Ventilator ist dabei häufig nicht in der Lage, abhängig auch von der Größe der Temperaturspreizung, durch seine Drehbewegung die Spreizung abzubauen. Man kennt diese Erscheinung auch in der Meteorologie unter dem Namen »Inversion« und weiß, dass sich dabei sehr stabile Verhältnisse einstellen können. Bei nicht eindeutigen Verhältnissen ist der Messort durch mehrere Temperaturmessungen mit einer beweglichen Sonde über einen oder mehrere Kanalquerschnitte zu bestimmen.

Stolpersteine

- Ungünstige Mischkammeranordnungen
- Stabfühlerlänge

Nicht-isotherme Strömung

Ist es unumgänglich, einen Fühler in einer nicht-isothermen Strömung zu platzieren, z.B. wegen beschränkter Raumverhältnisse in einem Luftaufbereitungsgerät, so sollte ein durchschnittsbildender Fühler verwendet werden. Dabei ist aber zu beachten, dass dieser Fühler zwar den Temperaturdurchschnitt misst, nicht aber die Schichtung aufhebt. Wird diese geschichtete Strömung aufgeteilt, muss man auch in den einzelnen Teilströmungen weiterhin mit unterschiedlichen Temperaturen rechnen.

Fühler in der Nähe lufttechnischer Aggregate

Fühler in der Nähe von lufttechnischen Aggregate (z.B. Fühler in unmittelbarer Nähe von Wärmetauschern) werden stärker durch Strahlung beeinflusst. Dies ist bei Durchschnittsfühlern sehr oft der Fall. Aber auch bei Elektrolufterhitzern (hohe Oberflächentemperaturen) kann die Strahlungswärme die Temperaturmessung wesentlich beeinflussen.

Temperaturverteilung

Die Temperaturverteilung nach einem Lufterhitzer wird im Wesentlichen durch die wasserseitige Temperaturspreizung bestimmt. Entsprechende Rohrschaltungen innerhalb des Wärmetauschers und einer Mischtemperaturregelung verringern die Gefahr einer Schichtung.

Stolpersteine

- Durchschnittsfühler bei Schichtungen.
- Fühler in der Nähe lufttechnischer Aggregate.

Montageort eines Kanaltemperaturfühlers:

- Gerader Luftkanal, ohne Temperaturschichtung bzw. Strahlungseinflüssen
- Nach Luftwäschern Mindestabstand 1 m bei guten Tropfenabscheidern, sonst entsprechend länger.
- Nach Dampfbefeuchtung Abstand abhängig von Befeuchtungsgrad und Luftgeschwindigkeit (Herstellerangaben berücksichtigen).

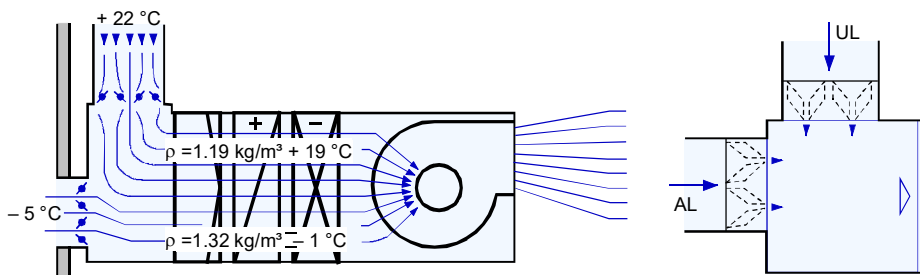


Fig. 5-12 Mischung von Außen- und Umluft

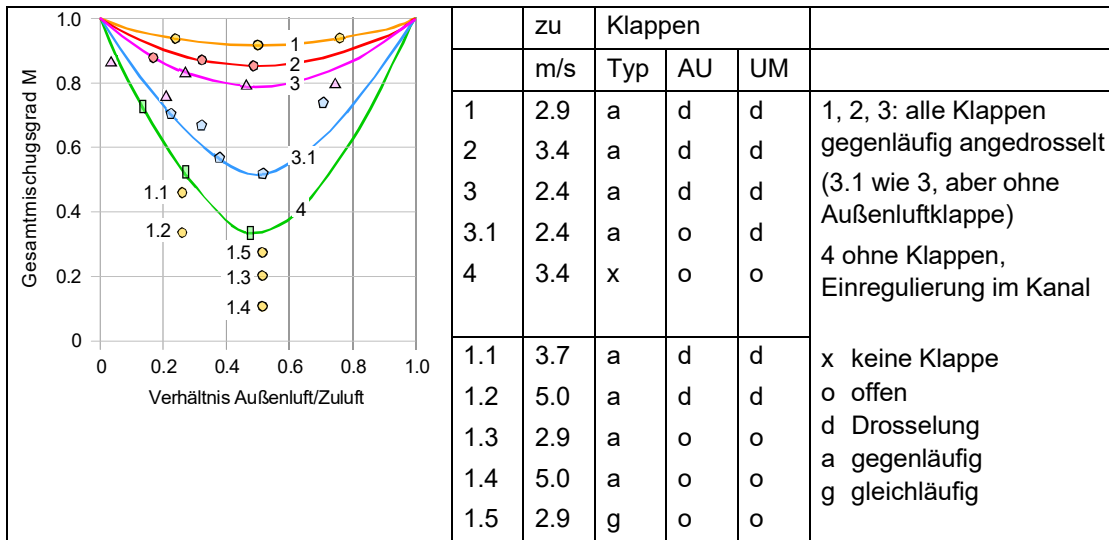


Fig. 5-13 Mischungsgrad bei unterschiedlichen Mischkammer-Konstruktionen



Fig. 5-14 Kanaltemperaturfühler (Quelle: Siemens)

Platzieren

- Bei Zuluft-Temperaturregelung
 - Falls ein Ventilator nach dem letzten Luftbehandlungs-Element eingebaut ist:
Nach dem Ventilator.
 - Falls kein Ventilator, oder ein Ventilator an anderer Stelle als nach dem letzten Luftbehandlungselement eingebaut ist:
Nach dem letzten Luftbehandlungselement; Abstand mindestens 0.5 m!
- Bei Ablufttemperaturregelung immer vor dem Abluftventilator.
- Als Begrenzungsfühler für die Zuluft möglichst nahe beim Lufteintritt in den Raum.
- Bei Taupunktregelung unmittelbar nach dem Tropfenabscheider des Wäschers.

Beachte:

- Fühlerrute von Hand so biegen, dass sie diagonal durch den Kanal läuft,
oder
- Fühlerrute in Windungen mit gleichmäßigem Abstand über den ganzen Kanalquerschnitt ziehen.
- Die Fühlerrute darf die Kanalwand nicht berühren.

5.12. Geschwindigkeitsmessung

5.12.1. Geräte zur Geschwindigkeitsmessung

Flügelrad-Anemometern

Bei den Flügelrad-Anemometern hat man die Wahl zwischen mehreren Fabrikaten. Diese sind heute sehr handlich und bedienungsfreundlich.

- + Der Vorteil gegenüber dem Staurohr ist die direkte Ablesung der Geschwindigkeit.

Mittelwert der Geschwindigkeit

Des Weiteren sind Geräte im Handel, mit denen der Mittelwert der Geschwindigkeit bestimmt werden kann.

- + Günstig ist auch die Umschaltbarkeit der Messbereiche, durch welche Geschwindigkeiten im unteren Bereich, also $< 1 \text{ m/s}$ noch gut abgelesen werden können.

Thermo-elektrisches Anemometer

Das thermoelektrische Anemometer ist vor allem für niedrige Geschwindigkeiten unter 5 m/s geeignet.

- + Es können selbst Werte bis hinunter auf wenige cm/s gemessen werden.
- + Dieses Gerät ist vor allem als Ergänzung zu den Messgeräten für höhere Geschwindigkeiten geeignet.

Digitalanzeige und Momentanwerte

Geräte mit Digitalanzeige für Momentanwerte sind vor allem für konstante Geschwindigkeiten geeignet. Bei wechselnden Geschwindigkeiten ist allerdings das Ablesen der Werte nicht einfach. Konventionelle Geräte mit Zeigern ermöglichen im allgemeinen eine bessere Abschätzung des Mittelwertes als bei den rasch wechselnden Zahlen der Digitalanzeige.

Messungen im Windkanal

Das folgende Strömungsbild zeigt die Geschwindigkeitsprofile im idealen Kanal/Rohr hinter einer 90° -Umlenkung mit turbulenter Strömung beim Eintritt an. Es zeigt sich, dass direkt hinter dem Knie ein stark verzerrtes Geschwindigkeitsprofil auftritt, so dass partiell sogar Rückströmungen zu beobachten sind. Mit angegeben ist die Faustformel für die Kanal-/Rohr-Mindestlänge bis zum Wiedererreichen des Eintrittsprofils.

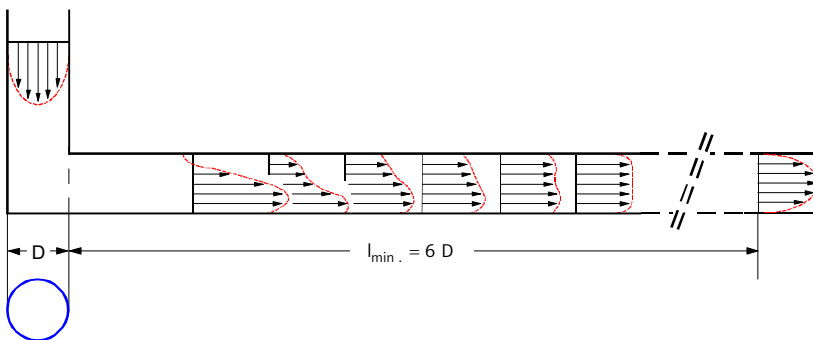


Fig. 5-17 Geschwindigkeitsprofile im idealen (reibungsfreien) Rohr

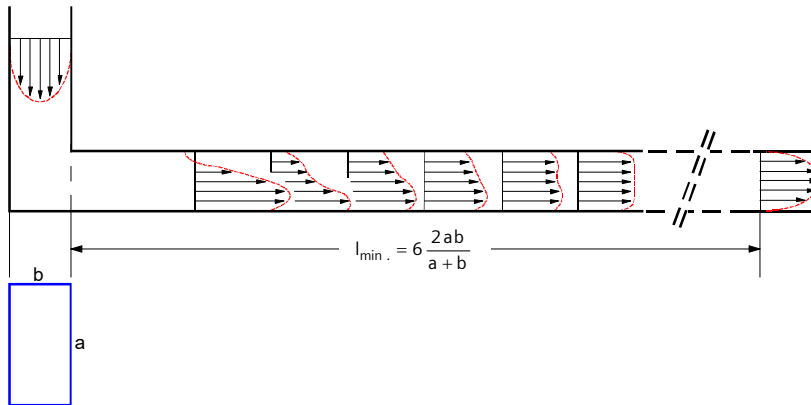


Fig. 5-18 Geschwindigkeitsprofile im idealen (rechteckigen, reibungsfreien) Kanal

5.12.2. Geschwindigkeitsfühler

Beruhigungsstrecken

Ausreichende Beruhigungsstrecken sind eine wesentliche Forderung beim Messen der Geschwindigkeit von Strömungen. Ansonsten gelten die gleichen Bedingungen wie bei der Druckmessung.

Aus dem vorherigen Bild ist ersichtlich, dass eindeutige Messungen von Geschwindigkeiten nur dann möglich sind, wenn ausreichende Beruhigungsstrecken vorhanden sind:

- Vor oder hinter Krümmern, Abzweigungen
 - Hinter einteiligen Klappen, Ventilatoren
- oder
- Querschnittsveränderungen

Querschnittsveränderungen werden in der Regel in Vielfachen des Rohrdurchmessers angegeben. Bei rechteckigen Kanälen mit den Seiten a und b berechnet sich der gleichwertige Durchmesser D_{gl} nach folgender Formel:

$$D_{gl} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}$$

D_{gl}	Gleichwertiger Durchmesser (= Hydraulischer Durchmesser)
a	Länge
b	Breite

Die Darstellungen auf dem Bild unten machen auf mögliche Fehlplatzierungen aufmerksam (links) und geben die erforderlichen Beruhigungsstrecken (rechts) an.

Wichtig

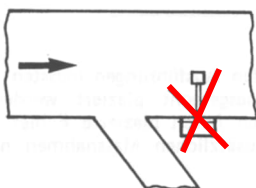
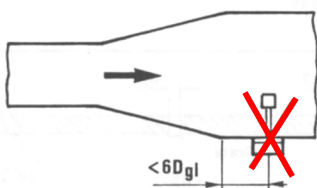
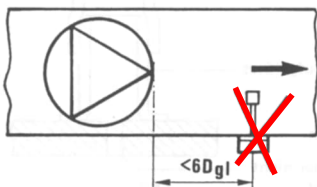
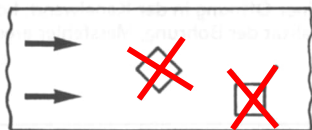
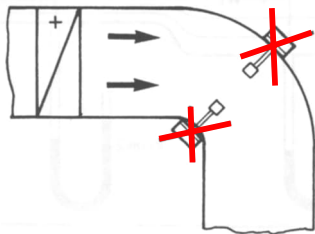
Die Fühler müssen so eingebaut werden, dass durch sie ein vernachlässigbar kleiner Teil des Gesamtquerschnittes versperrt wird.

- Gut messbar ist die Geschwindigkeit hinter Widerständen wie Lufterhitzern, Kühlern und Filtern, da hier das Strömungsprofil ziemlich gleichmäßig ausgebildet ist.
- Nach Wärmetauschern ist aber für die Beruhigung der Strömung noch ein gewisser Abstand erforderlich.

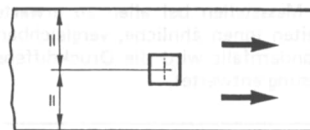
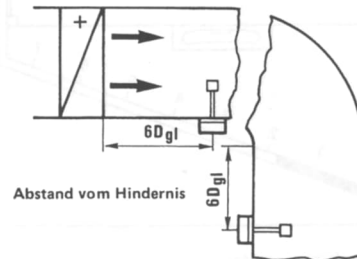
Platzierungsbeispiele

Links sehen Sie ungünstige oder falsche Platzierungen, rechts günstige/richtige.

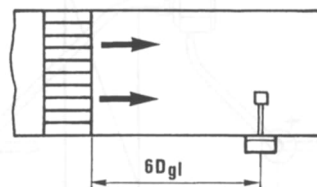
Falsch



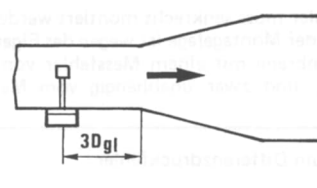
Richtig



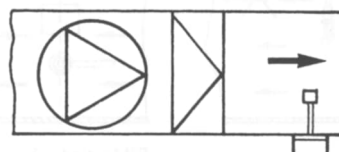
Fühler in der Mitte des Kanals



Gut ist die Platzierung hinter Filtern und Gleichrichtern weil hier kein Drall herrscht



Fühler vor Diffusoren und Konfusoren platzieren



Filter beruhigen die Strömung

Fig. 5-19 Platzierung von Geschwindigkeitsfühlern



Fig. 5-20 Geschwindigkeitsfühler (Quelle: Siemens)

5.12.3. Platzieren des Druckfühlers

Wichtig

Für den exakten Einbau eines Druckfühlers sind Kenntnisse der Strömungsverhältnisse im Kanal erforderlich. Bei Richtungsänderungen (z.B. nach Kanalbögen), oder auch nach Querschnittsveränderungen steigt die Luftgeschwindigkeit w , und damit im Quadrat der dynamische Druck p_{dyn} . Damit verändern sich natürlich auch die Messergebnisse.

Jede Störung der Luftströmung ist vor allem bei der statischen Druckmessung zu vermeiden.

Achten Sie darauf

- Mindestabstand hinter einer Strömungsveränderung ca. $6 D_{GL}$
- Da gemäß Bernoulli der Gesamtdruck konstant bleibt, sinkt der statische Druck im Kanal. Er kann sogar unter den Umgebungsdruck sinken. Dann wird durch die Messöffnung Luft angesaugt.
- Fühler nebeneinander anordnen
(Bei Messung des statischen Drucks darf die Sonde keinen Anteil an dynamischem Druck erfassen. In gewissem Masse ist dies bei turbulenten Strömungen immer der Fall. Daher muss bei der Montage der Drucksonde jede Störung der Luftströmung durch einen anderen Fühler oder eine Eigenstörung vermieden werden.)
- Die Sonde sollte an einer zum Luftstrom parallelen Kanalwand montiert werden.
- Die Luftleitungen zwischen der Messstelle und dem Fühler müssen dicht und trocken sein.
- Bei der Differenzmessung zusätzlich beachten, dass auf beiden Seiten ähnliche vergleichbare Strömungsverhältnisse vorhanden sind.
- Exakte gratfreie Bohrung bei Kanalwandbohrung
- Verwendung derselben Leitung

Druckdifferenzmessung

Bei einer Druckdifferenzmessung ist darauf zu achten, dass die beiden Messstellen bei allen zu erwartenden Luftgeschwindigkeiten innen ähnliche, vergleichbare Strömungen aufweisen, andernfalls wird die Druckdifferenz beeinflusst und die Messung entwertet.

Misst man den statischen Druck in einem Kanal ohne Sonde nur mit Hilfe einer Öffnung in der Kanalwand, so können sich je nach der Qualität der Bohrung Messfehler ergeben.

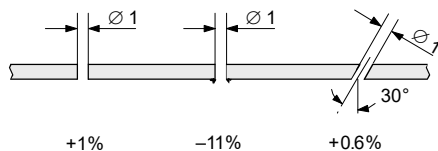
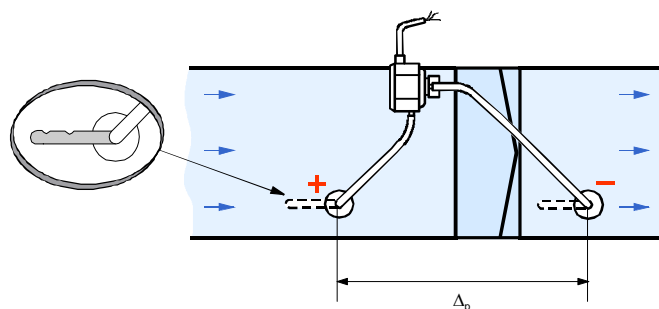


Fig. 5-21 Wandbohrung zur Messung des statischen Druckes



Die Fühler sind senkrecht zu montieren. Bei abweichender Montagelage ist (verursacht durch das Eigengewicht der Membrane) unabhängig vom Messbereich mit einem Messfehler von etwa 15 Pa zu rechnen.

Fig. 5-22 Zur Differenzdruckfühler-Montage

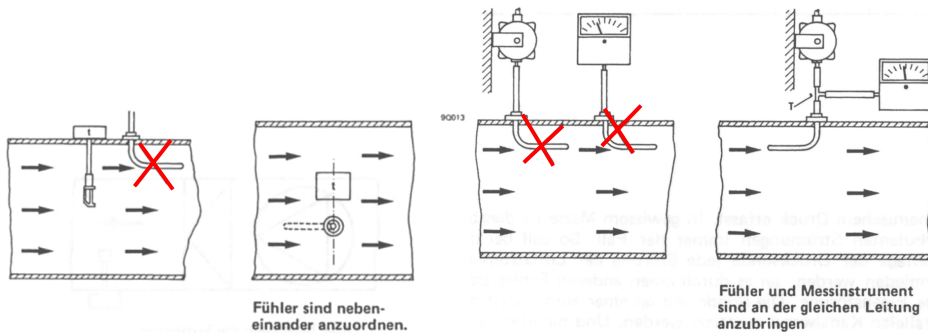


Fig. 5-23 Zur richtigen Anordnung von zwei Geräten

Einschränkung

Das Platzieren von zwei Geräten nach der oben gezeigten Art ist nur für Membran-Sensoren (statische Sensoren) gültig.

Der Druckdifferenzfühler eignet sich für die Direktmontage an Luftkanäle, Wände oder Decken sowie in Schaltschränke. Bitte beachten Sie:

- Der Fühler sollte vertikal montiert werden.
- Die Druckanschlusstutzen sollten wenn immer möglich unten sein und höher liegen, als die Anschlusssonden am Luftkanal.
- Nicht empfohlen wird eine waagerechte Montage (Klappdeckel oben oder unten), da daraus gewisse Messwertabweichungen resultieren.
- Bei nach oben gerichteten oder tiefer als die Sonden liegenden Druckanschlusstutzen kann sich Kondenswasser im Fühler ansammeln und den Fühler zerstören.



Fig. 5-24 Differenzdruckfühler (Quelle: Siemens)

Montageort ist normalerweise direkt der Luftkanal. Hier kann die Befestigung sowohl auf einer DIN-Tragschiene als auch an einer senkrechten oder waagerechten Fläche direkt erfolgen.

- Der „+“-Anschluss ist auf der Seite mit höherem Druck.
- Der „-“-Anschluss auf der Seite mit niedrigerem Druck anzuschließen.
- Grobe Verunreinigungen werden durch Anbringen einer Windung im Luftzufuhrschlauch abgefangen.

Kanaldruck-Regelung

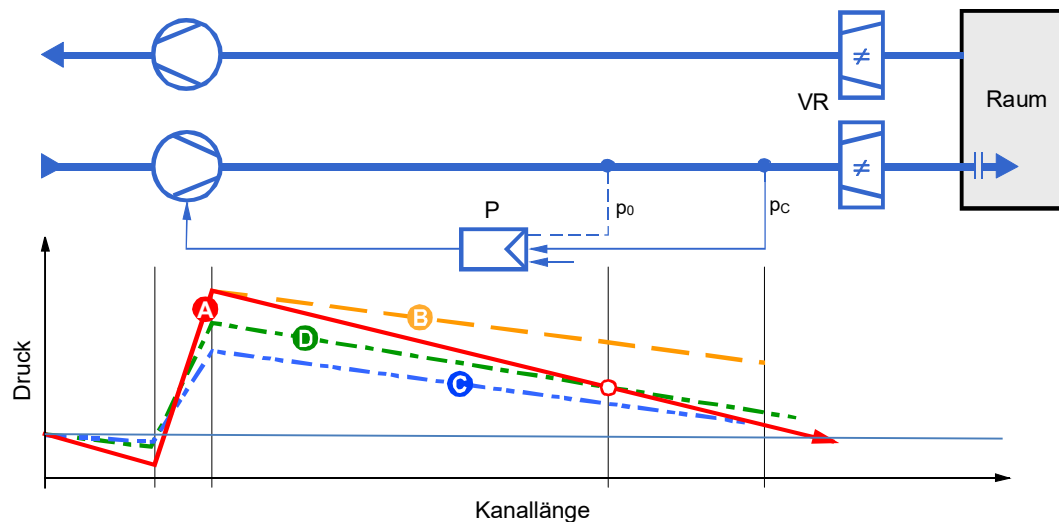


Fig. 5-25 Platzierung des Druckfühlers zur Ventilatorregelung, Druckverlauf des Kanalnetzes

- A 100% Volumenstrom, Volumenstromregler (VR) voll offen
- B Drosselung über Volumenstromregler
- C Reduktion der Ventilator-Drehzahl
- D Wie C, Druckmessung bei p_0

Kurve A

Die Kurve A stellt den Druckverlauf im Kanalnetz dar bei voll geöffnetem Volumenstromregler und maximalem Volumenstrom. Im Ansaugkanal stellt sich gegenüber der Umgebung ein zum Ventilator hin steigender Unterdruck ein. Der Ventilator erbringt die für die Kanalnetzlinie erforderliche Druckerhöhung; der nach dem Ventilator vorliegende Überdruck baut sich bis hin zum Raum entsprechend der Kanalnetzgestaltung ab.

Kurve B

Wird keine Ventilatorsteuerung oder Druckregelung vorgenommen, so ergibt sich durch Einstellen eines kleineren Volumenstromes (durch den Volumenstromregler) annähernd der Druck-Verlauf nach Kurve B.

Beachte:

Annähernd, weil in der Realität der Ventilator gemäß seiner Druck-Volumenstromkennlinie eine andere Druckdifferenz erzeugen wird, die im Bild nicht eingezeichnet ist.

Kurve C

Ohne Drosselung durch den Volumenstromregler, aber mit reduziertem Volumenstrom (durch Absenkung der Ventilator-drehzahl), ergibt sich der Druckverlauf gemäß Kurve C. Die direkte Drehzahlregelung des Ventilators mit dem Volumenstrom als Sollwert ist bei komplexeren Anlagen nur mit entsprechendem Auswertung der Teilvolumenströme der Volumenstromregler möglich. Heute stehen diese Informationen meistens per Bus-Kommunikation in der Gebäudeautomation zur Verfügung.

Kompromiss

Ein Kompromiss ist die Druckregelung im Kanalnetz, vorausgesetzt, der Druckfühler wird sinnvoll angebracht. Wird der Druckfühler unmittelbar vor dem Volumenstromregler (p_c) angebracht, so ergibt sich ebenfalls der ideale Druckverlauf im Kanalnetz nach der Kurve C.

Kurve D

Wenn der Druckfühler ungünstiger eingebaut wird, z.B. bei Vorverlegung des Fühlers in den Punkt p_0 stellt sich der Druckverlauf nach Kurve D ein. Damit ist zwangsläufig ein höherer Antriebsenergieverbrauch am Ventilator verbunden.

6 Messkonzept / Messplanung

6.1. Messkonzept

Unter einem Konzept wird ein zusammenfassender Entwurf verstanden.

Ein Messkonzept enthält nur die Grundbedingungen. Detailbedingungen gehören in die Messplanung.

Stellt sich die Aufgabe, eine Messung durchzuführen, empfiehlt es sich - sobald die Zielsetzung definiert ist - zu überlegen, ob ein Messkonzept notwendig ist. Bei einfachen Messaufgaben ist dies kaum notwendig. Verlangt die Zielsetzung eine Messung in größerem Rahmen, bei gleichzeitigen Messungen von verschiedenen Messgrößen über einen längeren Zeitraum oder Zeitabschnitt, drängt sich ein Messkonzept jedoch auf.

Durch ein gutes Konzept erhalten wir einen Überblick, mit welchem Kostenaufwand zu rechnen ist, wie viele und welche Messgeräte eingesetzt werden müssen und wer diese Messungen organisiert, überwacht, kontrolliert und auswertet.

Die Aussagekraft aller Messresultate sowie die Frage, wie diese interpretiert werden können, muss im Voraus durch das Konzept klar umschrieben werden.

Bevor mit der Ausarbeitung eines Messkonzeptes bis und mit Schlussprotokoll begonnen wird, ist abzuklären, in welcher Vertragsform (Werkvertrag oder Auftragsrecht) die Messungen durchgeführt werden sollen.

Konzeptarten

Für Planer, Unternehmer, Betreiber oder Experten bestehen unterschiedliche Rahmenbedingungen. Somit ergeben sich für jeden dieser Fachbereiche verschiedene Konzepte:

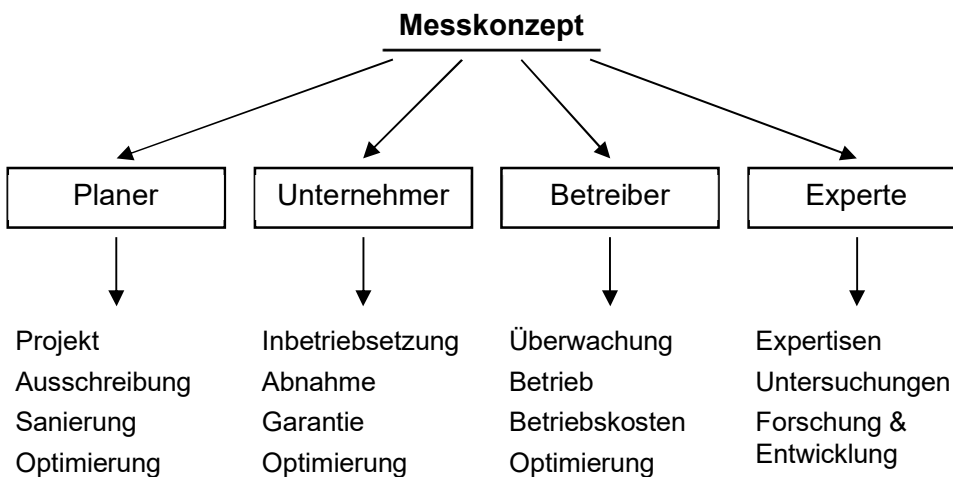


Fig. 6-1 Messkonzept

6.2. Messplanung

Liegt ein sauberes Messkonzept vor, kann mit der Messplanung begonnen werden. Sie beinhaltet der Reihe nach:

- Organisation
- Durchführung
- Auswertung
- Schlussprotokoll

Die Aufstellung eines Messplanes erfordert das Beschaffen aller benötigten Daten. Dazu gehören Betriebsvorschriften, Prinzip- und Funktionsschema sowie Anlagedaten. Bei bestehenden Anlagen wird eine Orientierung an Ort und Stelle nützliche Informationen für die Planung liefern.

6.2.1. Organisatorische Planung

Durch die organisatorische Planung wird bestimmt, wie die Durchführung der Messung abgewickelt wird. Dieser Planungsteil bildet die Grundlage für eine möglichst kostengünstige Abwicklung des Messauftrages.

Im Detail enthält die organisatorische Planung folgende Punkte:

- Wer ist verantwortlich für die Durchführung des Auftrags?
- In welchem Zeitrahmen sind die Messungen durchzuführen (Datum, Jahreszeit etc.)?
- Messzeit: Zu welcher Uhrzeit wird welche Messgrösse wie lang gemessen?
- Bedarfsabklärung: Sind Instrumente vorhanden, Installationsmittel, bauseitige Vorkehrungen?

6.2.2. Technische Planung

Technische Gegebenheiten

Eine Zusammenstellung der technischen Gegebenheiten kann sowohl bestehende Unterlagen wie auch neu zu erstellende Dokumentationen umfassen.

Messstellenplan

Die Messstellen werden in die Anlagepläne (Grundriss und Aufriss) eingezeichnet. Daraus wird ersichtlich, welchen Umfang die Messinstallationen erfordern und welche bauseitigen Vorkehrungen erforderlich sind.

Messprinzipschema

Es empfiehlt sich, ein separates Messprinzipschema zu erstellen. Eine einfache, klare synoptische Darstellung bietet die größtmögliche Übersicht der Zusammenhänge. Es muss Auskunft geben über alle prinzipiellen Funktionsabläufe (Steuerung, Regelung). Die Messstellen werden mit den gültigen Symbolen bezeichnet und durch Funktionslinien mit den jeweiligen Messinstrumenten verbunden.

Codierung (Positionsnummer):

Jedem Messpunkt wird eine Positionsnummer zugeordnet. Diese ist unerlässlich für den Aufbau der Messeinrichtung (Verkabelung). Die Positionsnummer hat Gültigkeit für die gesamte Messung bis hin zum Schlussprotokoll.

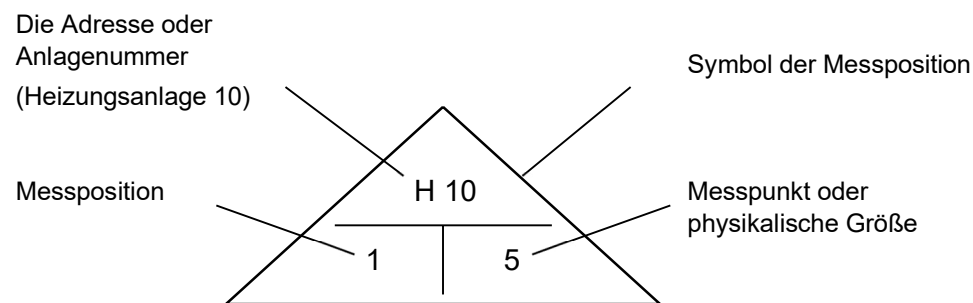


Fig. 6-2 Symbol und Codierung der Messposition

Messposition

Eine Messposition enthält:

1. Adresse: Bezeichnung der Anlage, Räume, Branche usw.
2. Messposition: Diese ist eine frei zugeordnete Nummer des Messfühlers.
3. Messpunkt: Wird nur bei Registriergeräten mit mehreren Messkanälen notwendig.

Messeinrichtung

Ein wesentlicher Bestandteil bei der technischen Planung ist die Wahl der geeigneten Messeinrichtungen:

- Güteklasse der Messeinrichtung
- Toleranz und Auflösungsvermögen der Messgrößen
- Vernünftiges Verhältnis der Skalaenteilung (Messbereich) bei gleichzeitigem Einsatz mehrerer Geräte
- Auswahl der Messeinrichtungen auf den Einsatz bezogen: Umgebungstemperatur, Feuchtigkeit, Vibration etc.
- Aufzeichnen der Skalenbedeutung bei Schreiberpapier
- Startzeit - Endzeit (Zeitraster)
- Maßeinheiten benennen

Installation

Der Aufwand für die Montage der Messgeräte und deren notwendigen Verbindungsleitungen wird vielfach unterschätzt. Es besteht beispielsweise ein erheblicher Unterschied im Aufwand, ob ein Einbautemperaturfühler oder ein Anlegefühler eingesetzt werden muss.

Ferner sind bei der Installation und Montage von stromführenden Instrumenten und Leitungen die Vorschriften der jeweiligen Länder zu beachten.

Beim Verlegen von Messkabeln ist darauf zu achten, dass keine Fremdeinflüsse die Messübertragungen beeinträchtigen können, z.B. Induktionsspannung (Netzfrequenz-Überlagerung im Messkabel, durch nahe gelegene Starkstromleitungen induziert), Temperaturdifferenzen und Fernmeldesignale.

6.2.3. Auswertung von Messungen

Liegen einmal alle Messresultate vor, müssen diese vom verantwortlichen Fachmann bearbeitet werden.

Zuerst erfolgt das Ordnen der Resultate:

- Auf vergleichbare Zeitgrößen (Zeitachse t)
- Auf optisch vergleichbare Messbereiche
- Ausscheiden von nicht wichtigen Hilfsmessgrößen und Resultaten mit Messfehlern

Nach dem Ordnen werden die Resultate in Form einer Graphik auf der gemeinsamen Zeitachse einander gegenübergestellt, damit die ersten Zusammenhänge erkannt werden und eine Beurteilung möglich ist. Z.B. ob ein Anlagefehler vorliegt oder etwa die Regelfunktionen nicht stimmen. Richtige Messungen zeigen anhand der Auswertung, wo die Fehler liegen, so dass die geeigneten Maßnahmen zur Verbesserung der Anlage getroffen werden können.

Werden die Messresultate für Berechnungen gebraucht, sei dies für Leitungsnachweise oder für die Sanierung von haustechnischen Anlagen, benötigt man hauptsächlich Maximal- und Minimalwerte und keine Funktionsabläufe (dynamisches Messverfahren). Die Interpretation dieser Werte dient dann als Berechnungsgrundlage.

6.2.4. Schlussprotokoll

Im Schlussprotokoll müssen die aus den Messungen gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und eine abschließende Beurteilung vorgenommen werden. Es beinhaltet somit Angaben über:

- Zustand der Anlage
- Aufgedeckte Fehler
- Durchgeführte Mängelbeseitigung
- Noch durchzuführende Arbeiten

6.2.5. Checklisten

Eine Checkliste ist die Darstellung des gedanklich aneinandergereihten Ablaufs von Handlungsweisen oder Fakten.

Die Mess-Checkliste ist ein Hilfsmittel beim Aufbau einer Messung sowohl in der Konzept- wie auch in der Planungs- und Durchführungsphase. Sie beinhaltet nur knapp formulierte Gedankenstützen und stellt den Leitfaden für die ganze Messung dar. Sie zeigt die richtige Reihenfolge der Vorgehensweise.

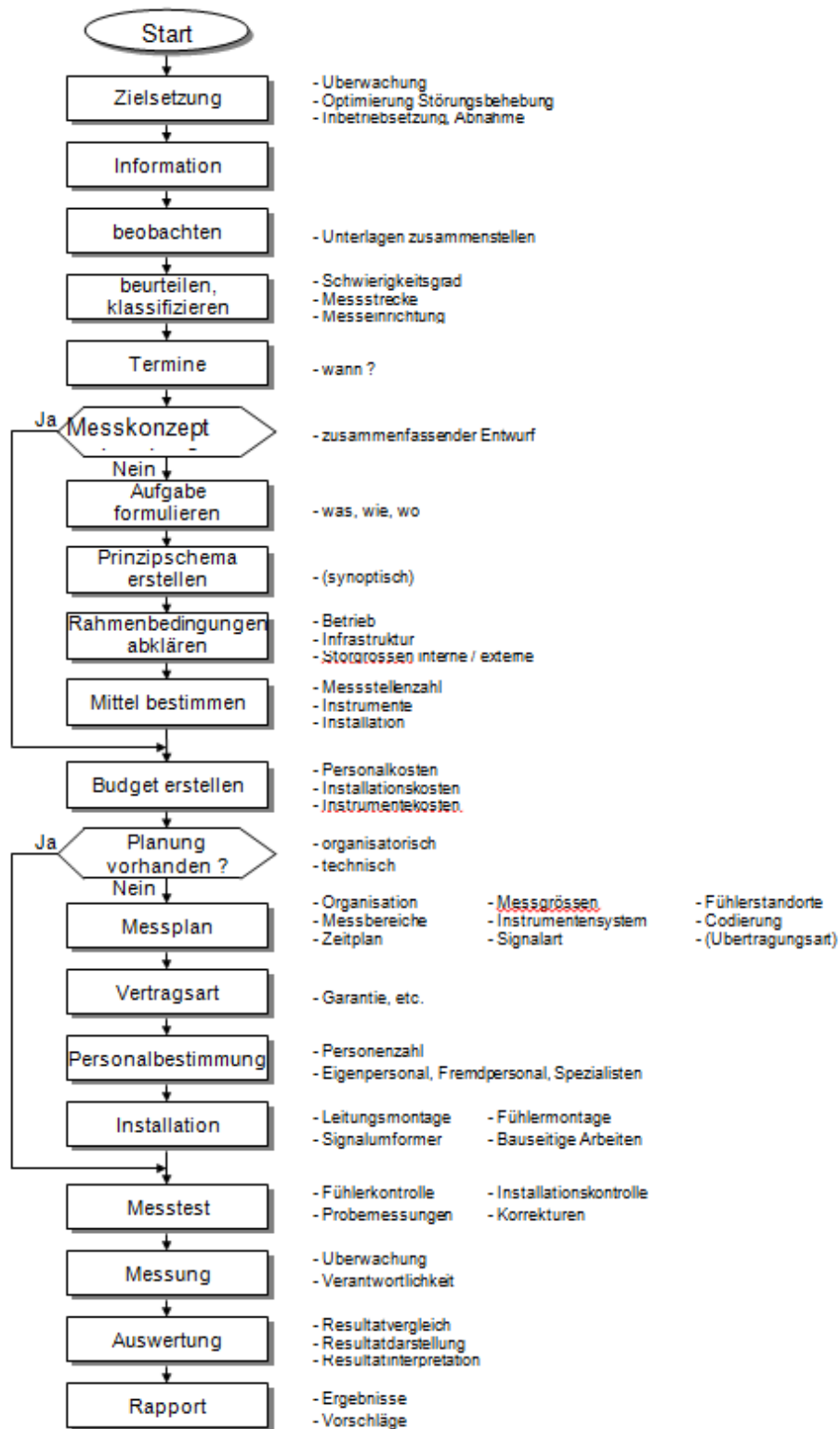


Fig. 6-3 Checkliste zur Planung und Durchführung von Messungen

Smart Infrastructure verbindet auf intelligente Weise Energiesysteme, Gebäude und Industrien und verbessert die Art und Weise, wie wir leben und arbeiten, um Effizienz und Nachhaltigkeit deutlich zu steigern.

Gemeinsam mit unseren Kunden und Partnern schaffen wir ein Ökosystem, das sowohl intuitiv auf die Bedürfnisse der Menschen reagiert als auch Kunden dabei unterstützt, ihre Geschäftsziele zu erreichen.

Ein Ökosystem, das unseren Kunden hilft zu wachsen, das den Fortschritt von Gemeinschaften fördert und eine nachhaltige Entwicklung begünstigt, um unseren Planeten für die nächste Generation zu schützen.

Creating environments that care.

[siemens.com/smart-infrastructure](https://www.siemens.com/smart-infrastructure)

Herausgeber
Siemens Schweiz AG

Smart Infrastructure
Global Headquarters
Theilerstrasse 1a
6300 Zug
Schweiz
Tel. +41 58 724 24 24

Siemens AG
Smart Infrastructure
Lyoner Straße 27
60528 Frankfurt am Main
Deutschland
Tel. +49 69 797-0

Siemens AG Österreich
Smart Infrastructure
Siemensstraße 90
1210 Wien
Österreich
Tel. +43 (51707) 0

Siemens Schweiz AG
Smart Infrastructure
Sennweidstrasse 47
6312 Steinhausen
Schweiz
Tel. +41 585 579 200

Siemens S.A.
Smart Infrastructure
21, rue Edmond Reuter
5326 Contern
Luxembourg
Tél. +352 43843 900

Schutzgebühr € 50

Änderungen und Irrtümer vorbehalten. Die Informationen in diesem Dokument enthalten lediglich allgemeine Beschreibungen bzw. Leistungsmerkmale, welche im konkreten Anwendungsfall nicht immer in der beschriebenen Form zutreffen bzw. welche sich durch Weiterentwicklung der Produkte ändern können. Die gewünschten Leistungsmerkmale sind nur dann verbindlich, wenn sie bei Vertragsschluss ausdrücklich vereinbart werden.

© Siemens 08/2022