



Klimamessung für Praktiker



Vorwort

Die vorliegende Fibel "Klimameßtechnik für Praktiker" entstand aus vielfachen Diskussionen mit unseren Kunden. Sie richtet sich in erster Linie an Abnahme- und Servicetechniker von Klima- und Lüftungsanlagen. Es geht dabei weniger darum, dem erfahrenen Meßtechniker zu zeigen wann er warum, wo zu messen hat, als vielmehr die Probleme aufzuzeigen, denen man in der Praxis vor Ort mit Temperatur, Feuchte und Luftgeschwindigkeits-Meßgeräten begegnet.

In dieser Fibel finden Sie wertvolle Hinweise, wie Sie vor Ort Meßfehler vermeiden können, wie Sie Fühler, Sonden und Meßgeräte optimal und effizient einsetzen und welche Randbedingungen Sie beachten sollten, um die Meßergebnisse richtig interpretieren zu können.

Die Fibel entstand unter Federführung unseres langjährigen Produktmanagers und Projekt-Innovations-Managers Manfred Streicher. Die wissenschaftliche Kompetenz wurde durch Herrn Professor Dr. Ing. S. Hesslinger eingebracht. Beiden sei an dieser Stelle herzlichst gedankt für ihre wertvolle Arbeit, die sich Testo-Kunden zunutze machen sollen.

Wir sind dankbar für weitere Anregungen, die wir gerne bei einer Neuauflage einarbeiten. Wenden Sie sich bei Fragen und Anregungen an das Testo-Projektteam Klimameßtechnik, bestehend aus Produktmanager Dipl.-Ing. (FH) Thomas Schwarzer und verantwortlich für Innovation und Projektleitung Dipl.-Ing. (FH), Physiker (bac) Manfred Streicher.

Die Geschäftsleitung: Burkart Knospe
Wolfgang Hessler
Martin Schulz



Inhalt

EINFÜHRUNG	6
ALLGEMEINE GRUNDLAGEN ZUR DURCHFÜHRUNG VON MESSUNGEN	
Meßgrößen in der Raumluftechnik	7
Protokollierung	8
TEMPERATURMESSUNG	
Messung von Lufttemperaturen	12
Meßfehler bei der Messung im instationären Zustand	13
Meßfehler durch Strahlungseinfluß	14
Meßfehler durch Schichtung	15
Messung von Oberflächen-Temperaturen	17
Oberflächenmessungen an Isolationen und schlechten Leitern(Holz, Glas etc.)	18
Oberflächen-Temperaturmessung an Wänden	18
Messung an Rohren	18
FEUCHTEMESSUNG	
Allgemeines	20
Messen der relativen Feuchte in Räumen	23
Anschauungsbeispiel	25
Messen der relativen sowie der absoluten Feuchte in Kanälen	26
LUFTSTROMMESSUNG	
Allgemeines	29
Meßstellenplanung	33
Luftstrommessung in Kanälen	35
Meßfehler bei der Luftstrommessung	36
Fehler durch Messungen im unteren Teil des Meßbereiches	37
Fehler durch Störstelleneinfluß	39
Messungen mit Flügelrad-Anemometern	41
Versperrung des Strömungsquerschnittes durch die Meßsonde	41
Rückstromeffekte	43
Hinweise für den Umgang mit Staurohren	44
Luftstrommessungen an Luftdurchlässen	45
Messen an saugenden Öffnungen	50
Volumenstromermittlung über die Ventilator Kennlinie	52
Messung der Raumlufgeschwindigkeit	53

VORBEREITUNG, DURCHFÜHRUNG VON MESSUNGEN	53
DRUCKMESSUNG.....	54
CO₂-MESSUNG IM RAHMEN DER RAUMKLIMA-BEURTEILUNG.....	55
ALLGEMEINES ZUR HANDHABUNG VON MEßGERÄTEN	57
Der Umgang mit Fühlern und Sonden	58
VORSTELLUNG DER TESTO-MEßGERÄTE	60
Fühlerbeschreibungen.....	63
QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS	68

testo

Einführung

Die 3 wichtigsten Meßgrößen in Gebäuden bzw. an lufttechnischen Anlagen sind die Temperatur, die relative Luftfeuchte sowie die Luftgeschwindigkeit. Im wesentlichen geht es darum, in einem Raum ein definiertes Klima bereitzustellen. Hierbei sollen Temperatur, Feuchte und Luftgeschwindigkeit innerhalb eines Toleranzbandes ausgeregelt werden (z. B. Behaglichkeitsbereich). Diese Leistung soll mit einem möglichst geringen Energieaufwand erbracht werden.

In einem Gebäude kann man vier Meßorte mit prinzipiell unterschiedlichen Randbedingungen unterscheiden:

1. die Außenluft,

mit den Extremzuständen:

Winter (kalt, hohe relative Luftfeuchte, jedoch niedrige absolute Luftfeuchte) und

Sommer (heiß, zeitweise hohe absolute Luftfeuchte, in der Regel mittlere relative Luftfeuchte)

2. die Versorgungszentrale



Hier befinden sich die klimatechnischen Bauelemente zur Bearbeitung der angesaugten Außenluft:

Trockner, Befeuchter, Filter, Heiz- und Kühlelemente, sowie die Ventilatoren, hinzu kommen die Überwachungs-, Steuer- bzw. Regelungseinheiten.

Bild 1: testo 454 beim Einsatz in einer Zentrale

3. Transportwege

bis zu dem Raum der klimatisiert werden soll.

Bestehend aus Rohren (Vor- und Rücklauf), Luftschächten (Zuluft und Umluft), mit Verzweigungen und definierten Meßstellen.

4. Kontakt mit dem zu klimatisierenden Raum:

Luftaustrittsgitter, Absaugvorrichtungen sowie Wärmetauscher bzw. Heizkörper.

5. Der Raum selbst inkl. Wänden, Decke, Türen und Fenster.

An all diesen Punkten gibt es sowohl für den Abnahme- als auch für den Servicefall definierte Meßstellen mit definierten Meßwerten (innerhalb zulässiger Toleranzbereiche) sowie Angaben zu den wichtigsten Randbedingungen.

Werden nun Messungen zur Bestätigung oder zur Kontrolle dieser Meßwerte durchgeführt, so besteht die grundsätzliche Forderung, daß man an derselben Meßstelle zu verschiedenen Meßzeiten aber unter gleichen Randbedingungen dieselben Meßwerte erhält. Dies setzt absolut genaue Meßgeräte voraus, die relativ unabhängig von Randbedingungen zu denselben Meßwerten führen. Oder aber der Meßtechniker muß sich vor Ort jedesmal erneut die Frage nach dem richtigen Meßverfahren, dem richtigen Fühler, sowie dem geeigneten Ablauf der Messung (Dauer der Messung, Angleichzeit, Mittelwertbildung über mehrere Meßpunkte oder Mittelwertbildung über eine Zeitdauer) stellen.

Für den richtigen Einsatz von Meßgeräten ist eine regelmäßige Überprüfung der Meßgeräte genauso wichtig wie der überlegte Einsatz der Meßgeräte vor Ort.

Ihren Wert letztendlich erhalten die Meßdaten durch eine konsequente und eindeutige Dokumentation. Ein Zahlenwert und eine Einheit machen noch keinen Meßwert aus. Interpretationsfähig und brauchbar als repräsentativer Meßwert wird der gemessene Wert erst dann, wenn er von allen notwendigen Informationen begleitet wird, die die Wiederholung des Meßergebnisses unter vergleichbaren Bedingungen ermöglichen.

Allgemeine Grundlagen zur Durchführung von Messungen

Meßgrößen in der Raumluftechnik

Im Rahmen der fachtechnischen Abnahme wird von einem Sachverständigen geprüft, ob die ausgeführte Anlage die vertraglich geforderten Leistungen erbringt. Je nach Anlagentyp muß ein nach VDI 2079 [2] geregeltes Mindestmeßprogramm durchgeführt werden. Darüber hinausgehende Messungen sind zwischen Auftraggeber (Bauherr) und Auftragnehmer gesondert zu vereinbaren.

Bei der Abnahme einer Klimaanlage (nach VDI 2079 [2]), sind die in Tabelle 1 aufgelisteten Meßgrößen zu erfassen. Die dazu verwendbaren Meßgeräte und Meßverfahren sind in der VDI 2080 [1] beschrieben.



Meßgrößen	Messungen am Zentralgerät	Messungen im Raum
Stromaufnahme des Ventilatormotors	X	-----
Luftstrom	X	X ¹⁾
Lufttemperatur	X	X
Luftfeuchte	X	X
Druckabfall am Filter	X	-----
Schalldruckpegel	-----	X ¹⁾
Raumluftgeschwindigkeit	-----	X ¹⁾

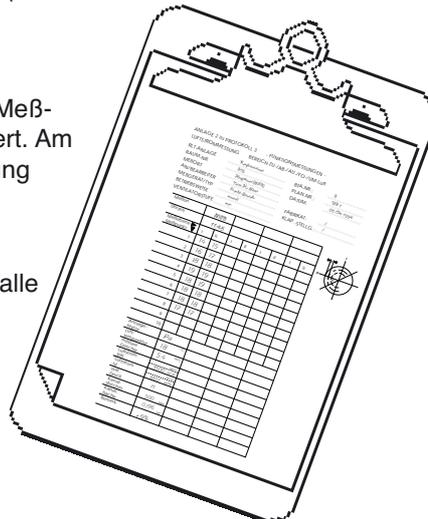
Tabelle 1: Zu erfassende Meßgrößen an einer Klimaanlage bei der Funktionsmessung nach VDI 2079 [2]

¹⁾ nur bei vertraglicher Vereinbarung durchzuführen

Protokollierung

Zu jeder (Abnahme-) Messung gehört die Dokumentation der Meßergebnisse und der Randbedingungen. Dabei müssen folgende Daten im Protokoll vermerkt werden (s. auch DIN 2079 S. 8 ff.):

- Datum/Uhrzeit**
 Diese werden beim Ausdruck mit Testo-Meßgeräten der Profi-Klasse direkt mitgeliefert. Am besten machen Sie direkt vor der Messung einen kurzen Kontrollausdruck.
- Bearbeiter**
 Oftmals werden trotz aller Sorgfalt nicht alle Randbedingungen notiert, für eventuelle Rückfragen muß deshalb dokumentiert sein, wer die Messung durchgeführt hat.



- **Anlagenbezeichnung**

Gerade bei späteren Wartungs- und Servicearbeiten muß sichergestellt sein, daß wesentliche Leistungsmerkmale der Anlage zwischen zwei Messungen nicht verändert wurden (z. B. leistungsstärkere Ventilatoren).

- **Anlagenbetriebsweise**

Hier geht es um Angaben zu eingestellten Sollwerten, Betrieb der Anlage unter Vollast etc.

- **Meßortbezeichnung**

Es muß später möglich sein, die Meßwerte eindeutig dem Meßort zuzuordnen (z. B. in einem Plan der Anlage)

- **Meßeinrichtung**

Angabe des verwendeten Meßgerätes und des Fühlers, gegebenenfalls auch der im Meßgerät eingestellten Randparameter z. B. Absolutdruck an der Meßstelle, eingestellte Luftdichte oder Angabe weiterer Meßgrößen, die im Meßgerät zur Kompensation von gemessenen Werten herangezogen werden (Temperatur, Feuchte etc.)

- **eingestellter Meßbereich**

Dies ist wichtig bei Meßgeräten mit umstellbaren Meßbereichen, da hier jedem Meßbereich eine andere Genauigkeit zugeordnet wird. Für Testo-Meßgeräte ist dies ohne Bedeutung, da diese nach Auswahl und Anstecken des jeweils optimalen Fühlers den passenden Bereich selbst wählen.

- **Sollwert**

Der Wert, der laut Plan unter angegebenen Bedingungen vorliegen soll.

- **Istwert**

Der abgelesene oder ausgedruckte Meßwert

- **Abweichung Soll-Ist**

- **Bemerkungen zur Meßstelle**

Vermerken Sie hier alles was die Messung beeinflusst haben könnte, so z. B. Wartungsarbeiten, Messungen vor oder nach dem Austausch von Filtern, Strömungsmessungen bei abgenommenen Austrittsgittern, offene oder geschlossene Fenster und Türen ...

- **evtl. Witterungsverhältnisse**

Barometrischer Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung oder Temperatur und Feuchte der Außenluft



ANLAGE 2 zu PROTOKOLL 3 - FUNKTIONSMESSUNGEN -
 LUFTSTROMMESSUNG BEREICH ZU-/AB-/AU-/FO-/UM-Luft

RLT-ANLAGE Konferenzräume BTA-NR.: 3
 RAUM-NR. 812 PLAN-NR.: UG 1
 MEBORT Kaugthanal (MP3) DATUM: 05. Okt. 1994
 AN/BEARBEITER Teste, G. Maier
 MEBGERÄT/TYP Vordtl-Staurefr FABRIKAT: /
 BETRIEBSWEISE manuell KLAP.-STELLG.: /
 VENTILATORSTUFE max.

Meßort	MP3							
Uhrzeit	11:45							
Meßebe- Meßpunkt	I	II	I	II	I	II	I	II
1	14	15						
2	16	17						
3	18	18						
4	19	19						
5	18	19						
6	18	18						
7	18	18						
8	17	17						
9								
10								
Anzeige- faktor	pa							
Luft- temperatur	18 °C							
mittlere Geschw.	5,4 m/s							
Luftstrom Soll	3500 m ³ /h							
Luftstrom Ist	3817 m ³ /h							
stat. Druck	71							
Kanal- durchm.	500 mm							
Kanal- fläche	0,196 m ²							
Bemerk.	+ 9%							

Bild 2: Beispiel für ein ordnungsgemäßes Protokoll einer Luftstrommessung nach dem Schwerlinienverfahren (siehe VDI 2080 [1])

Als weiteres Beispiel ein Protokollausdruck mit einem Meßgerät vor Ort und ein am PC erstelltes Diagramm zur Dokumentation des Zeitverhaltens der Temperaturen an einem Heizkörper.

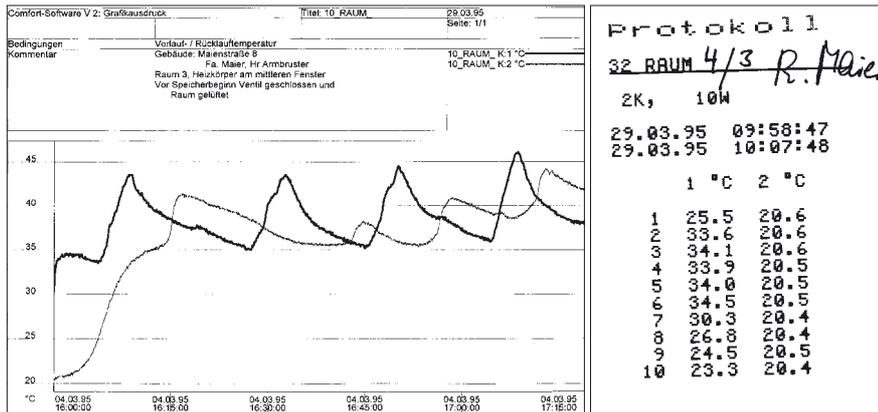


Bild 3: Dokumentation mit Testo Comfort-Software 0554.0171

Druckbild testo 454 in Verbindung mit Infrarot-Drucker 0554.0345

Falls der Meßort nicht eindeutig aus den Plänen hervorgeht, ist eine Skizze von der Meßumgebung zu erstellen. Darin sind die Meßorte mit Maßangaben einzutragen. Die Vermaßung ist auf Gebäudefestpunkte (z. B. Gebäudestützen) zu beziehen.

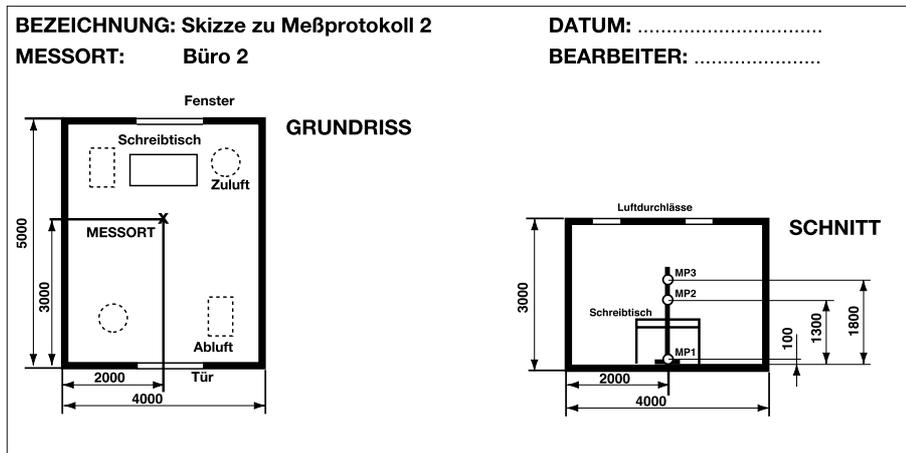


Bild 4 zeigt eine beispielhafte Skizze mit Angabe der Meßorte für die Messung der Temperaturschichtung im Raum.



Temperaturmessung

Messung von Lufttemperaturen

Temperaturmessungen werden im Rahmen von Abnahmemessungen am Zentralgerät der raumluftechnischen Anlage, in der Zuluft und in den belüfteten Räumen durchgeführt.

An die Temperaturen im Raum werden nach der DIN 1946, Teil 2 [3] im Zusammenhang mit der thermischen Behaglichkeit des Menschen neue Anforderungen gestellt.

Für folgende Temperaturen sind Grenzwerte einzuhalten:

- **Raumlufttemperatur**

Die Raumlufttemperatur ist mit einem strahlungsgeschützten Thermometer zu messen. Hierfür eignen sich alle Testo-Temperaturfühler mit Edelstahlrohren. Der vertikale Temperaturgradient der Raumluft darf 2 K/m nicht überschreiten.

- **Operative Temperatur (bzw. Empfindungstemperatur)**

Die Messung ist mit einem Globethermometer durchzuführen. Die gemessene operative Temperatur stimmt nach Glück [4] bei der Verwendung eines Globethermometers mit 150 mm Durchmesser (siehe Testo-Globethermometerfühler) auf $\pm 0,41$ K mit der Empfindungstemperatur des Menschen überein.

Die Berechnung der operativen Temperatur aus den Meßwerten der Raumlufttemperatur und der Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen, gewichtet mit den Einstrahlungszahlen, ist sehr zeit- und rechenaufwendig und wird deshalb hier nicht weiter ausgeführt. Zudem ist die Anwendung dieser Methode durch den Einsatz des Testo-Globethermometers nicht mehr erforderlich.

Bei der Verwendung von Globethermometern ist darauf zu achten, daß die Kugel nicht von direkter Sonnen- oder Lichtstrahlung getroffen wird, da nur die Strahlungstemperaturen der Umgebungsoberflächen in die gemessene Temperatur eingehen dürfen, d. h. entweder den Meßort entsprechend wählen und falls dies nicht möglich ist, die Kugel aus möglichst großer Entfernung abschatten. Der Trägheit des Thermometers ist durch eine entsprechend lange Meßdauer (bis ein konstanter Wert angezeigt wird - mindestens 20...30 min, siehe DIN 33403, Teil 1 [6]) Rechnung zu tragen.

Die Temperaturmessungen im Raum (Lufttemperatur und operative Temperatur) sollten am gleichen Ort und unter gleichen Randbedingungen durchgeführt werden, wie die Messung der Raumlufgeschwindigkeiten.

Meßfehler bei Messungen im instationären Zustand

Die meßtechnische Erfassung von Temperaturverläufen erfordert den Einsatz von Temperaturfühler, deren Zeitkonstante an die Änderungsgeschwindigkeit der Mediumtemperatur, angepaßt sein muß.

Die Zeitkonstante ist abhängig vom Wärmeübergang an der Fühleroberfläche, von der Wärmeleitfähigkeit des Fühlermaterials und von den Wärmespeichereigenschaften (Masse, Dichte, Wärmekapazität) des Fühlers.

In Bild 5 sind die Zeitkonstanten eines langsam und eines schnell reagierenden Fühlers bei sprungförmiger Veränderung der Lufttemperatur einander gegenübergestellt.

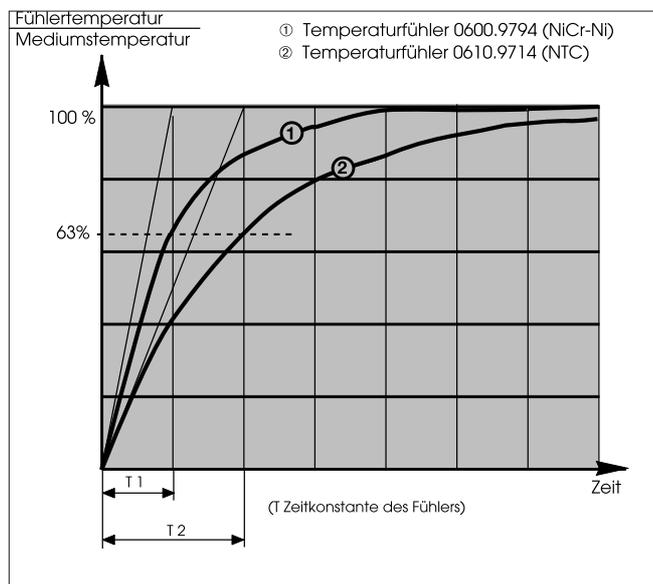


Bild 5:
Sprungantworten
zweier Temperaturfühler
mit unterschiedlichen
Zeitkonstanten
($T_2 = 2T_1$)

Welcher Fühler vorzuziehen ist, hängt von der Anwendung ab.

Wir empfehlen Fühler ② dort, wo sich Bedingungen nur langsam ändern, aber hohe Systemgenauigkeiten gefordert werden (Messen in Räumen, Behaglichkeit, Systemgenauigkeit besser $0,5^\circ\text{C}$).



Fühler ① ist vorzuziehen bei Messungen im Kanal (z. B. bei schnellen Temperaturwechseln nach plötzlicher Änderung des Umluftanteiles).

Bild 6 zeigt qualitativ den Temperaturunterschied, der zwischen Mediumstemperatur und Temperaturanzeige entsteht. Vorausgesetzt wurde, daß die Temperatur des Mediums mit konstanter Geschwindigkeit ansteigt.

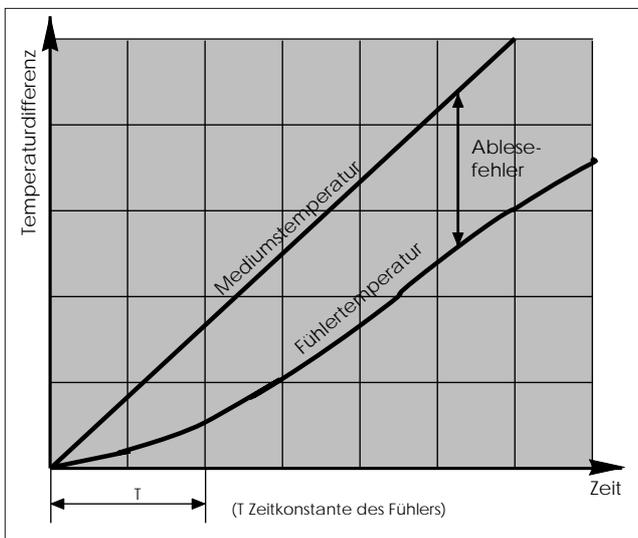


Bild 6:
Darstellung des Ablesefehlers bei konstant ansteigender Mediumstemperatur aufgrund der Trägheit des Temperaturfühlers

Ein langsamer Fühler (Nr. 1 aus Bild 5) führt, trotz hoher Genauigkeit im Beharrungszustand, bei dynamischen Prozessen zu Meßfehlern. Je schneller der Fühler desto realistischer ist der angezeigte Meßwert.

Die t_{99} -Zeit des Fühlers sollte mindestens doppelt so schnell sein wie die erwartete Änderung der Mediumstemperatur.

Meßfehler durch Strahlungseinfluß

Für die Genauigkeit der Messung von Lufttemperaturen ist es wichtig den Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen Temperaturfühler und Umgebungsoberflächen zu berücksichtigen. Abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen Fühler und Oberfläche und von deren Entfernung zueinander, können bei der Messung erhebliche Abweichungen von der tatsächlichen Lufttemperatur auftreten.

In Bild 7 ist eine Lufttemperaturmessung mit einem nicht strahlungsgeschützten Thermometer hinter einem Luftheizer dargestellt. Der Meßfehler (zu hohe Temperatur) würde sich bei geringerem konvektivem Wärmeübergang (durch geringere Luftgeschwindigkeiten) noch vergrößern.

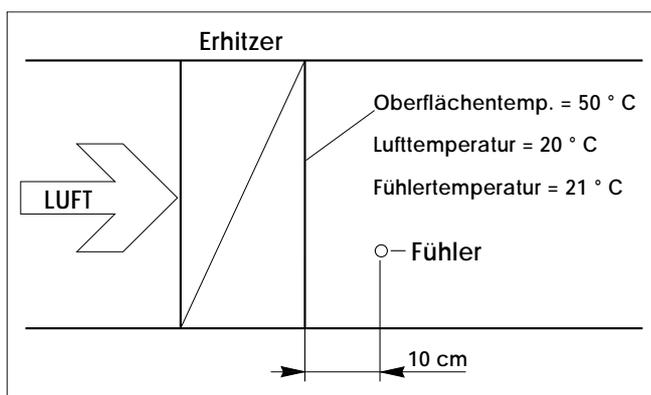


Bild 7:
Lufttemperaturmessung mit einem nicht strahlungsgeschützten Thermometer

Durch die Temperaturmessung mit Fühler ohne Strahlungsschutz ergibt sich in diesem Beispiel ein Meßfehler von 1 K.



Messen Sie in der Praxis Lufttemperaturen nicht in direkter Umgebung von Flächen, deren Temperatur stark von der Lufttemperatur abweicht. Ist dies unvermeidlich, schirmen Sie den Fühler durch einen Schutz vor eintreffender Strahlung ab (z. B. metallisch blankes Alu-Blech zwischen Strahlungsquelle und Fühler).

Meßfehler durch Schichtung

Bei Lufttemperaturmessungen in Kanälen und am Zentralgerät werden häufig nur 1-Punkt-Messungen durchgeführt. Diese Messungen sind nur dann repräsentativ für den Gesamtluftstrom, wenn am Meßpunkt die mittlere Temperatur und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Querschnittes erfaßt werden. In Bild 8 ist ein Beispiel aufgezeigt, bei dem diese Bedingungen nicht erfüllt werden können.

testo

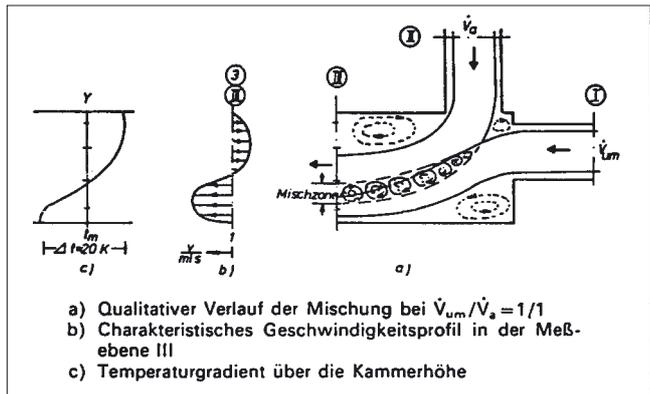


Bild 8:
**Mischkammer für Luft
 mit Temperatur
 schichtung und
 Rückstromgebieten**

Temperaturschichtungen können sich bei der Mischung von unterschiedlich temperierten Luftströmen oder nach der Durchströmung von Wärmetauschern, besonders wenn deren Oberflächentemperatur über den Querschnitt sehr uneinheitlich ist (häufig im Teilastfall), einstellen.

Falls an der Meßstelle keine nahezu vollständig durchmischte Strömung vorliegt, ist (vergleichbar mit der Luftstrommessung) eine Netzmessung durchzuführen (siehe auch Seite 31). Die Anzahl der Meßpunkte richtet sich nach der Unregelmäßigkeit des Temperaturprofils.

Für die exakte Ermittlung der mittleren Temperatur des Gesamtluftstromes müssen die gemessenen Temperaturen mit den zugehörigen Geschwindigkeiten gewichtet werden.

Messung von Oberflächentemperaturen

Oberflächentemperaturen müssen in erster Linie zur näheren Bestimmung von Randbedingungen gemessen werden. Dies betrifft mögliche Aussagen zur Funktion von Wärmetauschern, entweder zur Lufterhitzung oder -kühlung in Kanälen oder an Heizkörpern in Räumen.



*Bild 9:
Messung der
Oberflächentemperatur
eines Heizkörpers mit
Magnetfühler 0600.4893*

Darüberhinaus spielen Oberflächentemperaturen eine Rolle bei Wärmebilanzen, bzw. bei der Beurteilung von Installationen (z. B. Luftkanäle in denen Warmluft transportiert wird oder Rohre, die Kühlmittel enthalten).

Ebenso spielen Oberflächentemperaturen im Behaglichkeitsbereich eine tragende Rolle, hier geht es um die Beurteilung des Einflusses der raumumschließenden Flächen, z. B. Fenster oder Wände.

Speziell bei Messungen der relativen Luftfeuchte hängen Kondensationserscheinungen von Oberflächentemperaturen ab (siehe Bild 14, Seite 25).

Bei größeren Motoren, Ventilatoren oder Pumpen kann deren Zustand durch Messen der Oberflächentemperatur am Gehäuse oder an Lagern besser beurteilt werden.

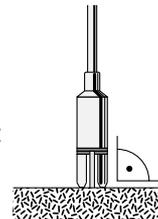
Die unproblematischsten Messungen kann man an großen Metallteilen (große Masse) mit planer, glatter Oberfläche durchführen. Die gute Wärmeleitfähigkeit von Metallen garantiert den einwandfreien Wärmetransport vom Inneren der zu messenden Oberfläche an den eigentlich messenden Sensor. Der Wärmeübergang von der Oberfläche zum Fühler (der kritische Faktor bei einer genauen Messung) kann durch Verwendung von Wärmeleitpaste (Art.-Nr. 0554.0004) deutlich verbessert werden.



Als weitere Fehlerquellen bleiben das frühzeitige Ablesen ohne Berücksichtigung der Temperaturangleichzeit des Fühlers und die bauartbedingte Temperaturabsenkung an der Oberfläche durch Aufsetzen des Temperaturfühlers.



Hinweis für Messungen in der Praxis:
Setzen Sie den Fühler senkrecht auf, warten Sie ab bis sich der Meßwert stabilisiert hat (Temperaturangleichzeit), bei Oberflächenmessungen ist der maximal angezeigte Meßwert dem wahren Meßwert am nächsten (→ Max.-Wertanzeige des Meßgerätes).



Oberflächenmessungen an Isolationen und schlechten Leitern (Schaumstoff, Holz, Glas etc.):

Vorzuziehen sind hier aufklebbare Thermoelemente, deren Fläche über Wärmeleitpaste mit der Oberfläche verbunden werden kann. Die geringe Masse dieser Sensoren entzieht der Oberfläche möglichst wenig Wärme, über die Anschlußdrähte wird kaum Wärme abgeführt. Ideal: Sensor mit Wärmeleitpaste auf der Oberfläche plazieren und großzügig mit Isolierband ankleben, dabei ein Stück der Anschlußleitung mit einbeziehen.

Oberflächen-Temperaturmessung an Wänden:

Ideal sind hier kontaktlose Infrarot-Oberflächentemperaturfühler nicht zuletzt deshalb weil diese bei entsprechendem Abstand über eine größere Fläche der Wand integrierend messen, d. h. man erhält automatisch einen Mittelwert über diese Flächen.

Der Einsatz in der Praxis ist jedoch sehr aufwendig, da die potentielle Fehlerquelle (die falsche Berücksichtigung des Emissionsgrades) nur schwer in den Griff zu bekommen ist. Abhilfe schaffen allenfalls Erfahrungswerte und Vergleichsmessungen mit Kontaktthermometern.

Messung an Rohren

Messen Sie mit planen Oberflächenfühlern nicht auf gekrümmten Oberflächen. Suchen Sie ebene Einsatzflächen (Flansche, Überwurfmutter) oder verwenden Sie hierzu die speziell dafür konstruierten Rohroberflächenfühler. Diese garantieren vor allem bei Messungen über einen längeren Zeitraum eine einwandfreie Positionierung des Sensors.

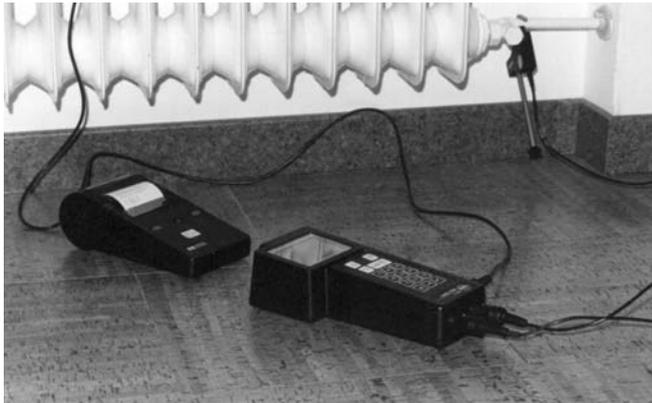


Bild 10:
testo 454 im Einsatz mit
Rohroberflächenfühler
0600.4593



Achtung bei Differenzmessungen:

2 Fühler, die direkt nebeneinander auf einem Rohr plaziert sind, müssen aufgrund der Fühlertoleranzen nicht zwingend eine Differenztemperatur von 0° C anzeigen. Machen Sie diesen Test, bevor Sie mit verschiedenen Fühlern an Rohren unterschiedlicher Temperatur die Differenztemperatur messen wollen. Bei Abweichungen müssen Sie diese gegebenenfalls später am Meßergebnis korrigieren.

Zusammengefaßt ergibt sich für korrekte Temperaturmessungen:

Jedes Meßgerät mißt direkt die Sensortemperatur und nur indirekt die Mediums- oder Objekttemperatur. Testo optimiert diesen Übergang von Anwendung zu Anwendung unterschiedlich, durch spezielle Fühlerkonstruktionen.

Der Anwender muß den richtigen Fühlertyp auswählen und auf die korrekte Handhabung achten:

- | | |
|--|------------------|
| z. B. • Messen auf planen Metalloberflächen - robust - | 0600.9993 |
| • Messen auf gewölbten Oberflächen - schnell - | 0600.0194 |
| • Messen an Rohren - Fühler fixiert sich selbst - | 0600.4593 |
| • Dauermessungen an Heizkörpern - Magnetfühler - | 0600.4793 |
| • Messen auf schlecht wärmeleitenden Oberflächen | |
| - aufklebbare Thermoelemente - | 0644.1607 |



Feuchtemessungen

Allgemeines

Die Regelung der Luftfeuchte ist überall dort interessant, wo sich Menschen oder feuchteempfindliche Stoffe über längere Zeit in einem Raum befinden. In diesen Räumen findet ein Feuchteaustausch zwischen der Umgebungsluft und der sich darin befindenden Menschen oder Stoffe statt.

Hygroskopische Stoffe geben Feuchte an die Umgebung ab oder nehmen selbst Feuchte auf. Sie streben dabei nach einem Gleichgewicht ihres Feuchtehaushaltes mit der Umgebung, d.h. bei Luft mit einem geringen Gehalt an relativer Feuchte, trocknen hygroskopische Stoffe langsam aus; bei hohen relativen Luftfeuchten reichern sich Materialien mit Wasser an.

Als Beispiel hierfür: Bei geringer Luftfeuchte kommt es zu Materialversprödung und Rißbildung (vor allem in der Heizperiode während des Winters). Bei hoher relativer Luftfeuchte und partiell kühlen Oberflächen beginnen Materialien zu quellen. Es kommt zu Tauwasserbildung oder gar zum Wachstum von Schimmelpilzen.

Die treibende Kraft dabei ist der Grad der relativen Luftfeuchte. Für Menschen und hygroskopische Materialien läßt sich dabei ein Bereich optimaler relativer Feuchte definieren.

Beim Menschen spricht man in diesem Zusammenhang vom Behaglichkeitsbereich. Dieser läßt sich in Gebäuden auch auf anderes übertragen, so z. B. Holz, Stoffe, Tapeten, Papier ...

Solange der Zustand der Luft diesen Bereich nicht verläßt, kann man davon ausgehen, daß kein übermäßiger Feuchtetransport stattfindet und sich die Eigenschaften von Stoffen oder Materialien nicht wesentlich verändern.

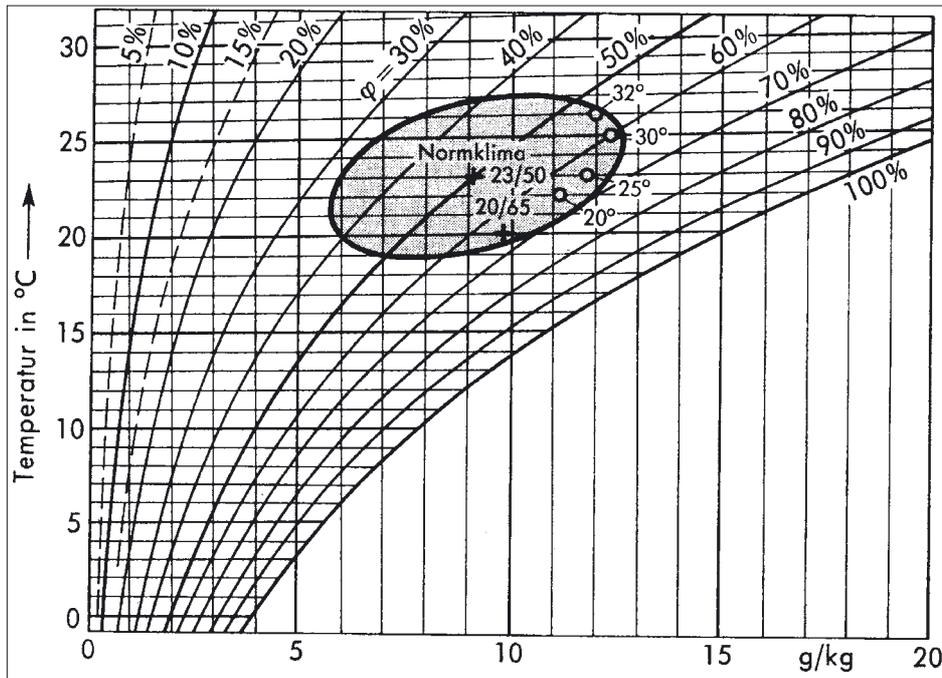


Bild 11: **Behaglichkeitsbereich**

Die Angabe der relativen Luftfeuchte bezieht sich immer auf einen Temperaturwert. Dies ergibt sich aus der Definition der relativen Feuchte:

Die relative Feuchte ergibt sich aus der vorhandenen (absoluten) Feuchte, bezogen auf die, bei der vorherrschenden Temperatur, maximal mögliche (absolute) Feuchte.

Bei Erreichen der maximal möglichen Feuchte spricht man von der Taupunkttemperatur, die relative Feuchte beträgt 100 %rF: Es kommt zu Kondenswasser- oder Nebelbildung, die Luft ist feuchtegesättigt.



In der Regel sind Feuchte-Meßgeräte mit einer Genauigkeit von ± 2 %rF spezifiziert. Allerdings gelten diese Angaben in den meisten Fällen nur für einen engen Temperaturbereich (18...25 ° C). Bei Testo wird diese Abhängigkeit über eine zusätzliche Temperaturmessung kompensiert.



Die Testo-Feuchtefühler sind generell mit Feuchte- und Temperatursensoren ausgestattet. Sie haben somit die zwei korrespondierenden Werte, Temperatur und Feuchte, auf einen Blick. Auf Wunsch kann die aus diesen Werten berechnete Taupunkttemperatur mit angezeigt werden.

Kapazitive Feuchtefühler zur Messung der relativen Luftfeuchte sind in der Regel wartungsfrei, es empfiehlt sich von Zeit zu Zeit die Kontrolle mit einem Kontroll- und Abgleichset.

Beim Feuchteaustausch an Oberflächen spielt ebenso die Strömungsgeschwindigkeit eine Rolle. Mit steigender Luftgeschwindigkeit werden die Prozesse beschleunigt, da ein lokales Gleichgewicht, eine Grenzluftschicht in der Nähe der Oberfläche, verhindert wird.

Messen der relativen Feuchte in Räumen

Hier gelten im wesentlichen dieselben Regeln wie für die Temperaturmessung. Die relative Feuchte hängt bei konstanter absoluter Feuchte von der Temperatur ab. Dabei besteht die Gefahr von Schichtungen und starken Feuchteänderungen in der Nähe von Oberflächen, deren Temperatur stark von der Lufttemperatur abweicht.

Der Mindestabstand zur Wand ist dann erreicht, wenn sich trotz Abstandsänderung die Anzeigewerte von Feuchte und Temperatur nicht mehr ändern.

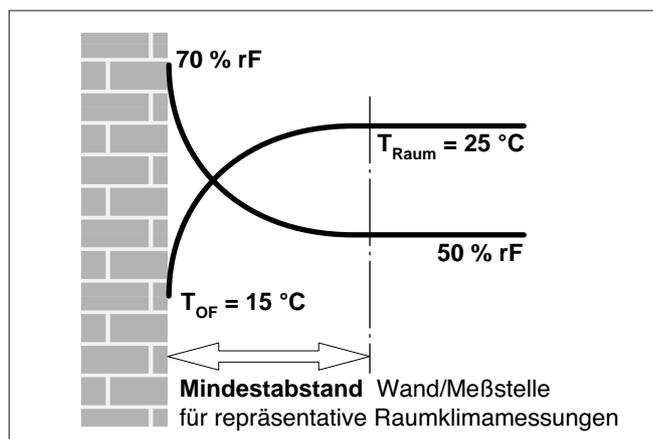


Bild 12:
*relative Feuchte
in Räumen*

Im Raum werden zwei prinzipielle Arten von Messungen durchgeführt:

- **die aktuelle Kontroll- oder Stichprobenmessung:**
eine schnelle Kontrollmessung ist in erster Linie dann interessant, wenn man einen starken oder plötzlichen Luftaustausch vorfindet z. B. bei Klimaanlage mit hohem Luftwechsel, häufigem Öffnen von Fenstern oder Türen, bei starken Feuchtequellen im Raum selbst wie in Küche und Bad, ...



Achten Sie darauf, daß der Feuchtefühler dieselbe Temperatur annimmt, wie die zu messende Luft. Bewegen Sie den Fühler, wenn Sie in stehender Luft messen (die Angleichzeiten können dadurch verkürzt werden).

Vermeiden Sie direkte Sonneneinstrahlung. Bereits wenige Zehntel Grad Temperaturdifferenz zwischen Fühlerrohr und Umgebungsluft verfälschen bereits das Meßergebnis.

testo

- **die beobachtende Dauermessung:**

Feuchteeffekte in der Nähe von Oberflächen werden am besten mit Datenspeichergeräten über eine längere Zeitdauer untersucht, da sich mehrere Einflüsse überlagern können (Einfluß der Klimaanlage, Wandtemperatur, periodische Schwankungen: Tag und Nacht, Wochenend-Temperaturabsenkung ...).



*Bild 13:
Dauermessung mit
Datenlogger testo 171-2*

Als Ergebnis erhält man vielseitig interpretierbares Datenmaterial, mit dem man auch komplexe Vorgänge nachvollziehen kann.

Anschauungsbeispiel dampfender Wasserkessel in einer Küche:

In diesem einfachen, doch sehr anschaulichen Beispiel bleibt die Lufttemperatur auch nach dem Einschalten der Herdplatte konstant knapp über 20° C, ebenso die etwas kühlere Metalloberfläche der Spüle. Die Oberflächentemperatur des Fensters erhöht sich geringfügig nach einsetzender Betauung. Die absolute Luftfeuchte (der Taupunkt) erhöht sich stark durch das Sieden des Wassers. Bereits nach kurzer Zeit beschlägt das Fenster.

Die Spüle betaut nicht, da deren Oberflächentemperatur auch im Maximum der absoluten Feuchte über der Taupunkttemperatur liegt.

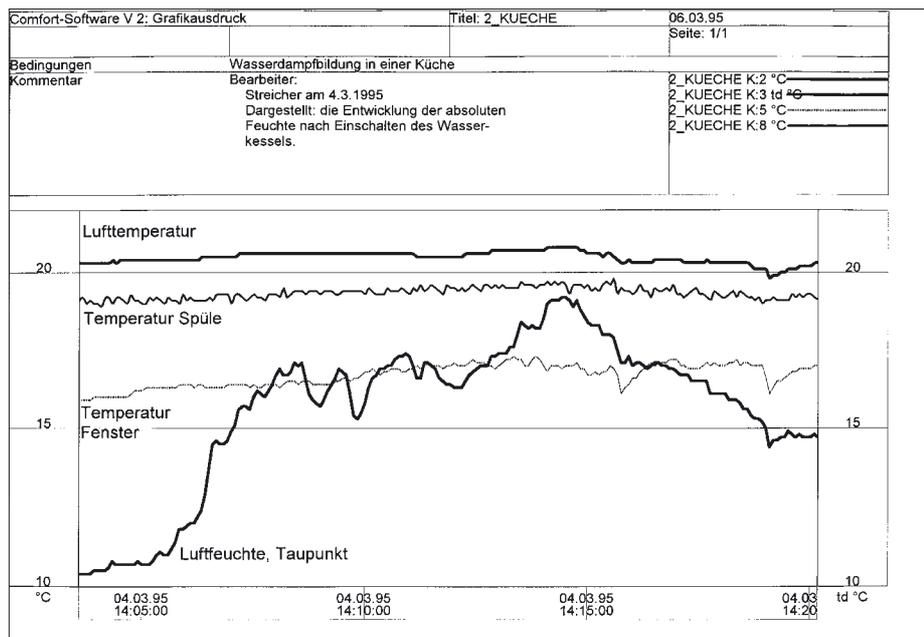


Bild 14: Diagramm als Protokoll; Darstellung zeitlicher Verläufe



Messen der relativen sowie der absoluten Feuchte in Kanälen

Bei der Feuchtemessung in Kanälen steht die absolute Feuchte im Vordergrund. Gemessen wird in erster Linie vor und nach feuchtetechnischen Bauelementen (Trockner, Befeuchter) oder an Stellen der Anlage, wo Luftströme verschiedener absoluter Feuchten gemischt werden (Umluft / Außenluft).

Es kann davon ausgegangen werden, daß die gemessene absolute Feuchte über lange Kanalstrecken konstant bleibt, vorausgesetzt es wird unterwegs nicht zusätzlich getrocknet oder befeuchtet (auch keine Kondensatbildung an kalten Oberflächen).

Eine einfache Methode zur groben Abschätzung der Verhältnisse geht davon aus, daß die Luft direkt hinter einem Wäscher als feuchtegesättigt angesehen werden kann. An dieser Stelle wird die Temperatur gemessen. Diese Temperatur kann ungefähr gleich der Taupunkttemperatur gesetzt werden. Das gleiche gilt analog an leistungsfähigen Kondensatfallen.

Mißt man anschließend im klimatisierten Raum die Temperatur, so läßt sich die relative Feuchte vor Ort über Tabellen bestimmen.

In der Praxis jedoch liefert nur die Feuchtebestimmung mit einem Feuchtemeßgerät brauchbare Werte, die für Berechnungen weiterverwendet werden können, da auch an Befeuchtern mit einem Befeuchtungsgrad kleiner 100% gemessen werden muß (z. B. nur 80 %rF nach dem Befeuchter).

Grundlage zur Erstellung von Feuchtebilanzen mit der dazugehöriger Energieverbrauchs Betrachtung bildet das MOLLIER - h, x -Diagramm. Mit diesem Diagramm wird in der Praxis gearbeitet, da die Handhabung von Formeln vor Ort zu umständlich ist. Das MOLLIER-Diagramm besteht aus übereinandergelegten Kurvenscharen, wobei eine Kurve jeweils für einen konstanten Wert steht.

So gibt es Geraden konstanter Temperatur (ϑ), Linien konstanter relativer Feuchte (φ), Geraden konstanter absoluter Feuchte (x) und Geraden konstanter Wärmeinhalts oder Enthalpie (h).

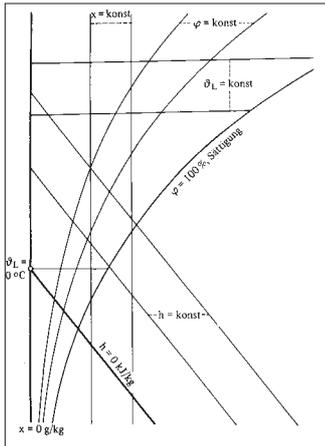


Bild 15:
prinzipieller Aufbau h, x-Diagramm

Mit zweien dieser Werte ist der Zustand der feuchten Luft eindeutig definiert. Die beiden anderen Größen ergeben sich aus dem Diagramm, d. h. mit einer Feuchte- und Temperaturmessung können Sie der Luft an der gemessenen Stelle einen Punkt im h, x- Diagramm zuweisen.

Alle technischen Veränderungen (Heizen, Kühlen, Trocknen, Befeuchten) dieser Luft entsprechen einer Bewegung innerhalb dieses Diagramms.

Erläuterung des Aufbaus eines h, x-Diagrammes

- h Wärmeinhalt kJ/kg trockene Luft
- x Wassergehalt g/kg trockene Luft
- θ Lufttemperatur ° C
- φ relative Luftfeuchte %rF



Hinweis für Messungen in der Praxis:

- Messen Sie mit elektronischen Feuchtfühlern keine Taupunkte, die über der Fühlertemperatur liegen, da die folgende Betauung**
- die Sensorik für eine gewisse Dauer sättigt, oder sogar
 - die Elektronik betaut, was die Funktion des Fühlers (bis zur Trocknung) beeinträchtigt.

Als einfache Beispiele sehen Sie im folgenden die Zustandsänderungen der feuchten Luft durch einen Lufterhitzer oder durch einen Luftwäscher.

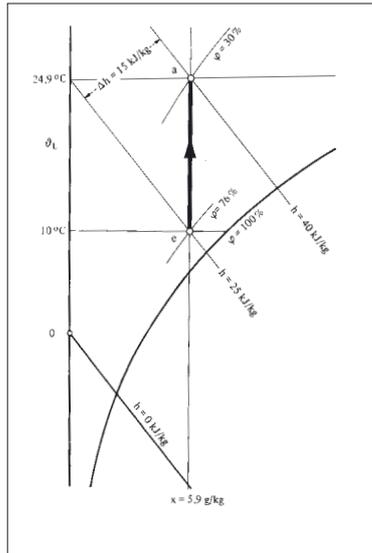


Bild 16: Luftzustandsänderung im Lufterhitzer
 e Lufteintrittszustand
 a Luftaustrittszustand, bei $\Delta h = 15 \text{ kJ/kg}$ Wärmezufuhr

Das Diagramm gilt bei Vertauschung von e und a auch für Luftkühler mit trockener Oberfläche

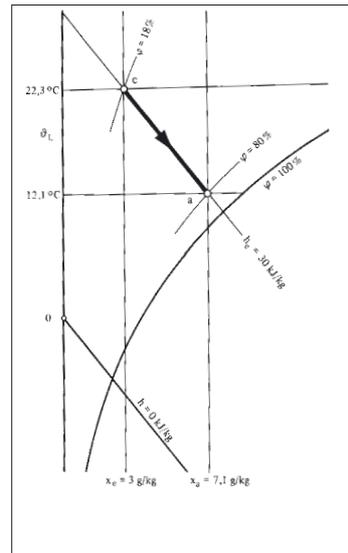


Bild 17: Luftzustandsänderung im Luftwäscher
 e Lufteintrittszustand (z. B. vorgewärmtes Außen-/Umluftgemisch)
 a Luftaustrittszustand für Befeuchtungsgrad $\mu=0,76$.

Der Lufterhitzer ist charakterisiert durch Wärmezufuhr bei konstanter absoluter Feuchte. Dadurch ergibt sich eine Temperaturerhöhung in Verbindung mit der Erniedrigung der relativen Luftfeuchte.

Beim Luftwäscher wird bei konstantem Wärmeinhalt der Luft Wasser zugeführt. Durch Wasserzufuhr in Verbindung mit dem Abkühlen der befeuchteten Luft erhöht sich die relative Feuchte.

Auf diese Weise können Sie mit der Luft die klimatechnischen Arbeitsschritte im Diagramm nachvollziehen und haben auf einen Blick die relevanten Größen zur Bestimmung der Feuchte, Temperatur und Energiebilanz an Klimaanlagen. Sie erhalten hierbei für jede Zustandsänderung der Luft den dazu notwendigen Energieverbrauch.

LUFTSTROMMESSUNGEN

Allgemeines

Die Einhaltung der Luftströme ist von ausschlaggebender Bedeutung für die Funktion der Anlage. Sind die Luftströme geringer als geplant, kann die Abführung der Raumlasten (Heiz-, Kühl- und Stofflasten) unter Umständen nicht gewährleistet werden. Deshalb ist auf eine möglichst genaue Erfassung der Luftströme besonderen Wert zu legen.

Wählen Sie vor der Messung (abhängig von den Bedingungen vor Ort) die richtige Sonde.

Je nach Bauart eignen sich die Sonden besonders für

- **niedrige Strömungsgeschwindigkeiten:**
thermische Sonden,
 - für **mittlere Strömungsgeschwindigkeiten** speziell in Kanälen:
Flügelradsonden mit möglichst kleinen Durchmessern,
 - für **Messungen an Absaug- und Austrittsöffnungen:**
Flügelräder mit großen Durchmessern
(60 oder 100 mm)
- oder
- für **Messungen in hohen Geschwindigkeiten,**
in **stark verschmutzten Strömungen** mit **hohem Partikelanteil:**
Stauohre

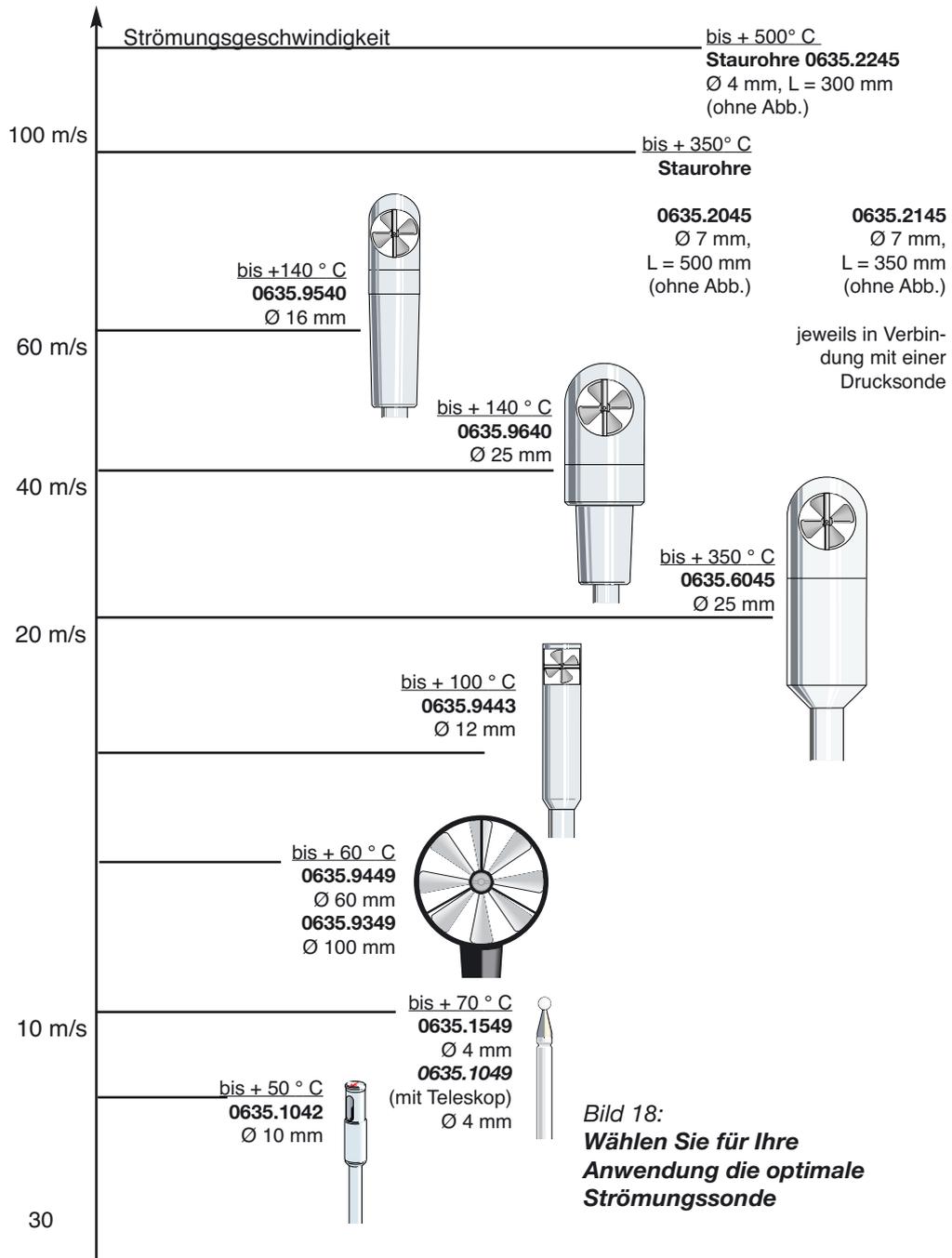


Bild 18:
Wählen Sie für Ihre
Anwendung die optimale
Strömungssonde

Im Rahmen von Abnahmemessungen werden zur Ermittlung der Luftströme indirekte Meßverfahren (Netzmessungen) angewendet.

In der VDI 2080 [1] werden folgende Verfahren vorgeschlagen:

- **Trivialverfahren für Netzmessungen in Rechteckquerschnitten**

Bei diesem Verfahren werden keine besonderen Annahmen über das Geschwindigkeitsprofil getroffen. Das Geschwindigkeitsfeld innerhalb des rechteckigen Kanalquerschnittes wird in gleichgroße Meßflächen aufgeteilt, wobei sich der eigentliche Meßpunkt in der Mitte einer solchen Meßfläche befindet.

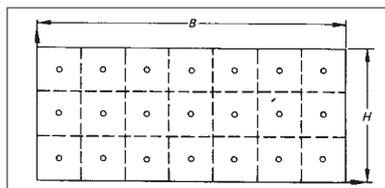


Bild 19:
Schema Netzmessung

Bei einem gleichmäßigen Geschwindigkeitsprofil kommt man bereits mit wenigen Meßpunkten zu einem repräsentativen Meßergebnis.

Stellt man jedoch über den Querschnitt starke Strömungsgeschwindigkeitsunterschiede fest, so ist die Anzahl der Meßpunkte zu erhöhen. Die Anzahl der Meßpunkte ist dann ausreichend, wenn der Meßwert einer jeden Fläche repräsentativ ist für seine nähere Umgebung, d. h. wenn er als echter Mittelwert für seine Teilfläche angesehen werden kann.

- **Schwerlinienverfahren für Netzmessungen in Kreisquerschnitten**

Hierbei wird der Kreiskanalquerschnitt in flächengleiche Kreisringe eingeteilt, wobei sich der Meßort auf der Schwerlinie des Kreisringes befindet (nicht auf der Mittellinie des Kreisringes).

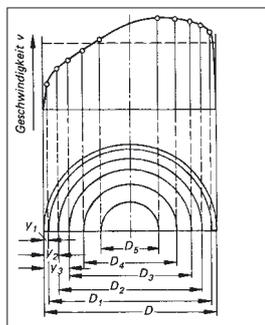


Bild 20:
Schwerlinienverfahren

Auch hier erfolgt die Auswertung der Messung über arithmetische Mittelwertbildung der Einzelmeßwerte.



• **Loglinearverfahren für Netzmessungen in Kreisquerschnitten**

Voraussetzung für dieses Verfahren ist das Vorhandensein eines turbulenten Grenzschichtprofils, das in der Praxis jedoch nur selten angetroffen wird. Bei diesem Verfahren werden die Meßorte auf mindestens 2 aufeinander senkrechtstehende Durchmesser verteilt, wobei der Abstand zwischen den Meßstellen zum Rand hin logarithmisch abnimmt.

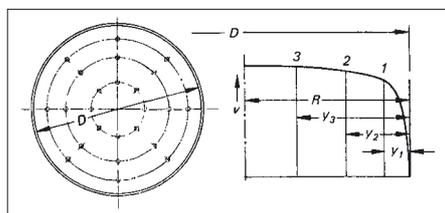


Bild 21:
Loglinearverfahren

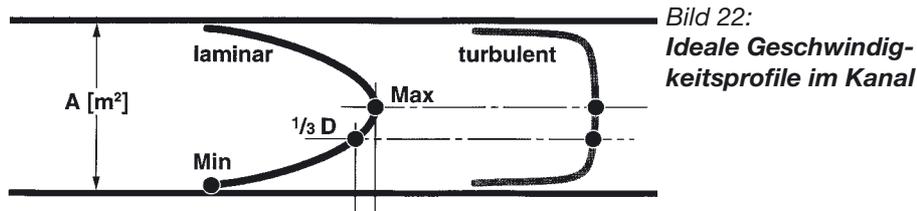
Aus den einzelnen Geschwindigkeitsmeßwerten ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und daraus der Luftvolumenstrom zu berechnen.

$$\dot{V} = A \cdot \bar{v} \cdot 3600$$

- \dot{V} = Volumenstrom in m³/h
- \bar{v} = mittl. Strömungsgeschwindigkeit in m/s
- A = Strömungsquerschnitt in m²

Beispiel: Bei einem Querschnitt A von 0,5 m² und einer gemessenen mittleren Geschwindigkeit von 4 m/s ergibt sich ein Volumenstrom von 7200 m³/h

Bild 22 zeigt ideale Strömungsprofile im Kanal. Links eine ausgeprägte laminare Strömung mit einem deutlichen Maximum in der Kanalmitte, die mittlere Strömungsgeschwindigkeit liegt bei ca. einem Drittel des Kanaldurchmessers. Rechts sieht man ein turbulentes Grenzschichtprofil (keine Verwirbelungen) mit einer weitgehend konstanten Strömung in der Kanalmitte und drastischem Abfall an den Wänden. Zwischen diesen beiden Idealformen sind alle Mischformen möglich, deshalb ist eine Netzmessung in der Regel unumgänglich.



Häufig werden im Zuge von Einregelungsarbeiten die Luftströme an einzelnen Luftdurchlässen gemessen. Da diese Messungen sehr zeitaufwendig und zudem mit großen Fehlern (siehe Seite 45 ff.) behaftet sind, empfiehlt es sich, die Einregelung anhand der Ergebnisse der Kanalnetzrechnung vorzunehmen und anschließend die gleichmäßige Beaufschlagung der Auslässe (z. B. durch Rauchproben) zu prüfen. In diesem Fall müssen nur die Hauptluftströme gemessen werden. Dazu sind geeignete Meßstellen zu schaffen, was wiederum die entsprechende Meßstellenplanung voraussetzt.

Meßstellenplanung

Wichtigste Voraussetzung für eine genaue Messung ist die Eignung des Meßortes. Dies gilt besonders für die Durchführung von Luftstrommessungen in Kanälen. Deshalb muß schon der Anlagenplaner die Meßorte im Ausführungsplan (Projektplan) festlegen. Dabei sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- An allen Hauptkanälen und an den Zuleitungen zu den Räumen mit hohen Anforderungen sind Luftstrommeßstellen einzuplanen.
- Es sind Mindestabstände zu Störstellen einzuhalten (siehe auch Kapitel: Fehler durch Störstelleneinfluß, Seite 39). Zu stromaufwärts liegenden Störstellen sollte ein Abstand eingehalten werden, der mindestens dem 6fachen hydraulischen Durchmesser $D_h = 4A/U$ (A : Kanalquerschnitt, U : Kanalumfang) entspricht. Zu stromabwärts liegenden Störstellen genügt ein Abstand von $2 D_h$.

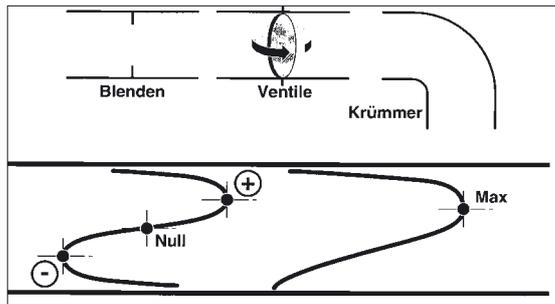


Bild 23:
problematische
Meßstellen



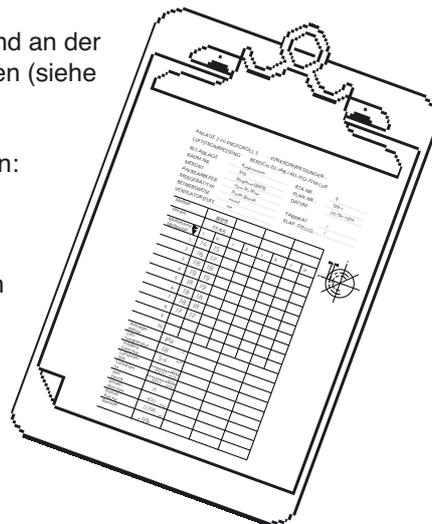
Hinweis für Messungen in der Praxis:

Diese Meßstellen sind so problematisch, weil sich in Ihrer Nähe das Geschwindigkeitsprofil stark ändern kann. Das Strömungsmaximum liegt nicht mehr in der Kanalmitte, es kann Bereiche ohne Strömungsgeschwindigkeit und Bereiche mit Rückströmungen geben.

- Die Meßstelle muß zugänglich sein.
- Es muß genügend Platz für die Handhabung des Meßgerätes zur Verfügung stehen.
- Die planmäßige Ausführung der Kanalführung, einschließlich der Meßstellen, ist zu kontrollieren.
- Die Meßstellen sind in den Plänen und an der Anlage gleichlautend zu kennzeichnen (siehe auch Protokollierung ab Seite 8).

Diese Kennzeichnung sollte enthalten:

- die Anlagenbezeichnung (z. B. Konferenzraum 1. OG)
- den Meßort (z. B. Zuluft)
- den Soll- und den Ist-Volumenstrom
- Meßgerät und Meßprinzip (z. B. Flügelrad-Anemometer)
- das Datum
- Firmenname oder Verantwortlicher für die Messung

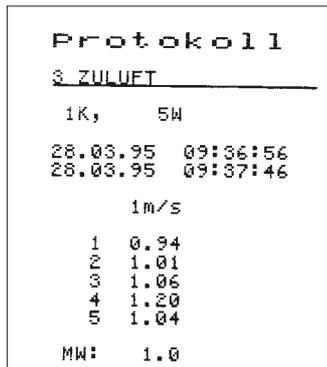


Luftstrommessung in Kanälen

Vor Beginn der Messungen sind die Protokolle (siehe auch „Protokollierung“ ab Seite 8) vorzubereiten, wobei die Sollwerte z. B. den Revisionsplänen zu entnehmen sind. Die Betriebsweise der Anlage ist zu kontrollieren, und im Protokoll zu vermerken. Es ist dafür zu sorgen, daß sich die Betriebsweise während des Meßvorganges (z. B. durch Regelvorgänge) nicht verändert.

Die Messungen sollen vom Zentralgerät der raumlufttechnischen Anlage ausgehen, sodaß bei unzureichender Gesamtluftmenge im Hauptkanal unnötige Messungen an Einzelsträngen unterbleiben.

Nach Abschluß jeder Messung muß sofort die Auswertung der Meßergebnisse erfolgen. Ideal sind Meßgeräte, die die einzelnen Meßwerte und den ermittelten arithmetischen Mittelwert ausdrucken .



The image shows a terminal printout with the following text:

```
Protokoll 1
3 ZULUFT
1K, 5W
28.03.95 09:36:56
28.03.95 09:37:46
1m/s
1 0.94
2 1.01
3 1.06
4 1.20
5 1.04
MW: 1.0
```

Bild 24:
Ausdruck testo 454

Heften Sie diesen Ausdruck zusammen mit dem Meßprotokoll ab. Vergessen Sie nicht, die wichtigen Randparameter (die da waren: Firma, Verantwortlicher, Datum, Meßort, Meßverfahren, Meßergebnis, Abweichung zum Sollwert, Lufttemperatur und bei Staurohrmessung, die zur Berechnung herangezogene Luftdichte sowie der zugehörige Absolutdruck und die relative Feuchte) mit einzutragen.



Meßfehler bei der Luftstrommessung

In der Meßtechnik-Theorie unterscheidet man zwischen zufälligen und systematischen Fehlern.

Die zufälligen Fehler kann man anhand von Fehlerrechnungen z. B. nach VDI 2080 [1] abschätzen. Dabei werden die Unsicherheiten durch die Meßanordnung, die Meßmethode, die Meßgeräte und die Ablesungen zu einer Gesamtunsicherheit zusammengefaßt.

Im folgenden Bild ist das Beispiel einer Fehlerrechnung dargestellt.

Meßquerschnitt	$a \cdot b$ in mm ²	Unsicherheit des Meßortes	τ_U in %
Zahl der Meßpunkte	n	Unsicherheit des Anemometers	τ_G in % v. E.
relativer Abstand von der Störstelle	a/D_h	Unsicherheit für die Ablesung (bei schwankender Anzeige)	δ_v in m/s
Geschwindigkeit = Ablesewert	v in m/s	Meßbereich des Anemometers	v_E in m/s
Unregelmäßigkeit des Profils	U in %	Unsicherheit für die Seitenlänge	δ_a, δ_b in mm

Unsicherheit

$$\tau_L = \pm \sqrt{\tau_U^2 + \left(\frac{\delta_a}{a} 100\right)^2 + \left(\frac{\delta_b}{b} 100\right)^2 + \left(\frac{\delta_v}{v} 100\right)^2 + \left(\frac{v_E}{v} \tau_G\right)^2}$$

Für $a = 1200$ mm, $b = 800$ mm, $n = 20$, $a/D_h = 3$, $v = 6$ m/s, $U = 24$ % (aus Bild 28), $\tau_U = 9$ % (aus Tabelle 2), $\tau_G = \pm 1$ % v. E. (Tab. 2), $\delta_v = 0,2$ m/s, $v_E = 40$ m/s, $\delta_a = \delta_b = 1,5$ mm folgt:

$$\tau_L = \pm \sqrt{9^2 + \left(\frac{1,5}{1200} 100\right)^2 + \left(\frac{1,5}{800} 100\right)^2 + \left(\frac{0,2}{6} 100\right)^2 + \left(\frac{40}{6} 1\right)^2}$$

$= \pm 11,69$ %

Ergebnis $v = 6$ m/s

Unsicherheit $\tau_L = \pm 11,69$ % = $\pm 0,7$ m/s

Daraus ergibt sich für den Volumenstrom:

$$v = 1,2 \text{ m} \cdot 0,8 \text{ m} \cdot (6,0 \pm 0,7) \text{ m/s} = (5,76 \pm 0,7) \text{ m}^3/\text{s} = 20880 \pm 2520 \text{ m}^3/\text{h}$$

Bild 25: **Beispiel einer Fehlerrechnung**

Man erkennt, daß besonders die Fehler durch den Einsatz des Meßgerätes im unteren Teil des Meßbereiches und durch die Unregelmäßigkeit (Verzerrung) des Strömungsprofils für den Gesamtfehler ausschlaggebend sind. Deshalb wird auf diese Hauptfehlerquellen später noch näher eingegangen.

Zu den zufälligen Fehlern kommen noch sogenannte systematische Fehler hinzu. Dabei handelt es sich um „versteckte“ Fehler, die dadurch entstehen, daß die Meßperson verschiedene Einflüsse, die das Meßergebnis verfälschen, nicht erkennt.

Ein gutes Beispiel dafür ist die Messung der Luftgeschwindigkeit im Rückstromgebiet eines Bogens mit einem Meßgerät das unabhängig von der Strömungsrichtung positive Werte anzeigt (siehe Kapitel: Rückstromeffekte Seite 43).

Fehler durch Messungen im unteren Teil des Meßbereiches

Je nach Meßverfahren weisen Strömungssensoren eine unterschiedliche Fehlercharakteristik auf, die sich je nach Wahl des Meßbereiches negativ auf das Meßergebnis auswirken kann.

So haben thermische Strömungssonden einen sehr kleinen Grundfehler (im Bereich $\pm 2 \dots 5$ cm/s), dem ein Empfindlichkeitsfehler in Prozent vom Meßwert (2,5 ... 5% vom Meßwert) hinzuzufügen ist. D. h. thermische Sonden eignen sich in erster Linie zur Messung von niedrigen Luftgeschwindigkeiten, die Meßunsicherheit nimmt mit steigender Luftgeschwindigkeit linear zu.

Im Gegensatz dazu wird bei Flügelrädern die Meßunsicherheit in der Regel in % vom Endwert angegeben. Flügelräder besitzen also einen konstanten Meßfehler über ihren kompletten Meßbereich. Dadurch haben Flügelräder ihren optimalen Einsatzbereich in der oberen Hälfte des Meßbereiches. In der Regel kann man sagen bis 5 m/s sind thermische Anemometer vorzuziehen, über 5 m/s Flügelräder.

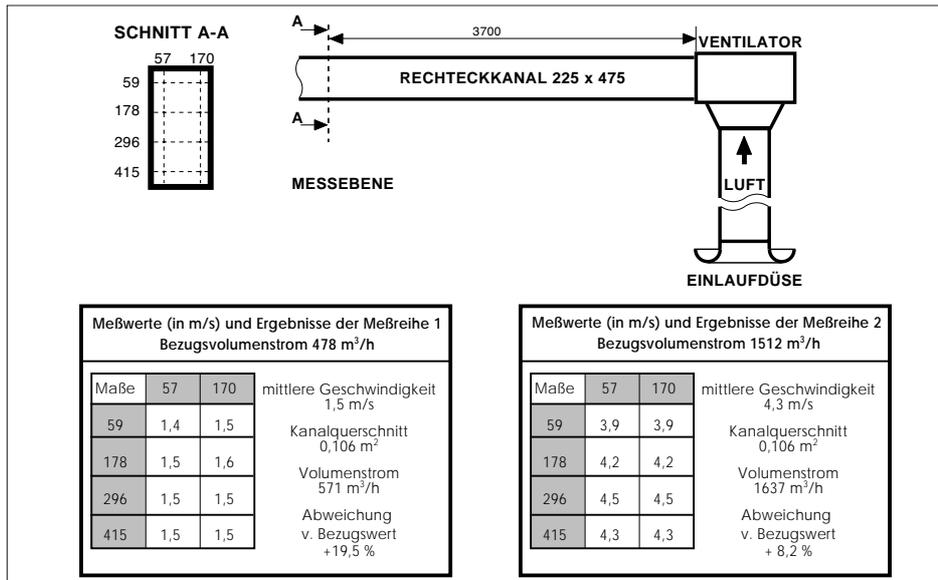


Bild 26: Meßfehler durch Einsatz einer Flügelradsonde (Ø 16 mm) in Verbindung mit einem testo 452 im unteren Teil des Meßbereiches.

Die Meßstelle weist ein sehr ausgeglichenes Strömungsprofil auf (Abstand von der Störstelle "Ventilator" ca. 12 D_n) so daß die Meßungenauigkeit im wesentlichen auf den Einsatz des Flügelrades im unteren Teil des Meßbereiches zurückzuführen ist. Bei der Meßreihe 2 mit höherer Luftgeschwindigkeit (4 m/s), verringert sich die Meßunsicherheit bereits von 19,5 % auf 8,2 %.

Noch besser ist die Fehlercharakteristik bei der Staurohrmessung bei mittleren und hohen Luftgeschwindigkeiten. Durch die Wurzelbildung bei der Berechnung der Luftgeschwindigkeit aus dem dynamischen Staudruck geht der Meßfehler bei steigender Luftgeschwindigkeit stark zurück (trotz eines konstanten Grundfehlers bei der Druckmessung).

Fehler durch Störstelleneinfluß

Die Messung von Luftströmen (Luftgeschwindigkeiten, dynamische Drücke) erfordert eine drall- und rückstromfreie Strömung. Deshalb muß die Meßstelle in ausreichendem Abstand von der Störstelle gewählt werden. Eine Drallströmung ist stabil und kann sich über große Strecken im Kanalsystem fortsetzen. In solchen Fällen ist vor der Meßstelle ein Strömungsgleichrichter einzubauen.

Rückströmungen, die durch Klappen und Krümmer bzw. Kniee entstehen können, sind in der Regel nach einem Abstand von dem 2fachen hydraulischen Durchmesser ($2 D_h$; $D_h = 4 \times A/U$) zur Störstelle, abgebaut. Allerdings ist das Strömungsprofil so stark verzerrt, daß eine hohe Anzahl von Meßpunkten erforderlich ist, um die Unsicherheit der Messung gering zu halten. In Bild 27 sind die mit einem Prandtl-Staurohr gemessenen Strömungsprofile hinter einem Bogen für 3 verschiedene Störstellenabstände aufgezeigt.

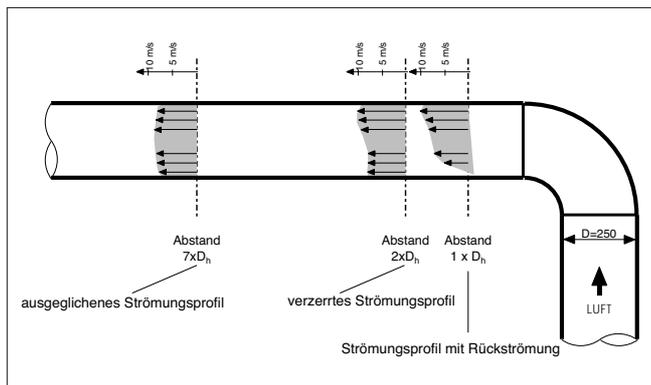


Bild 27:
Abbau der Unregelmäßigkeit des Strömungsprofiles mit zunehmendem Abstand von der Störstelle.

Die horizontalen Geschwindigkeitsprofile wurden mit einem Prandtl-Staurohr gemessen.

Die Anzahl, der zu wählenden Meßpunkte eines Querschnitts kann aus Tabelle 2 entnommen werden. Zuvor ist aus Bild 28 die Unregelmäßigkeit (Verzerrung) des Strömungsprofils zu bestimmen.

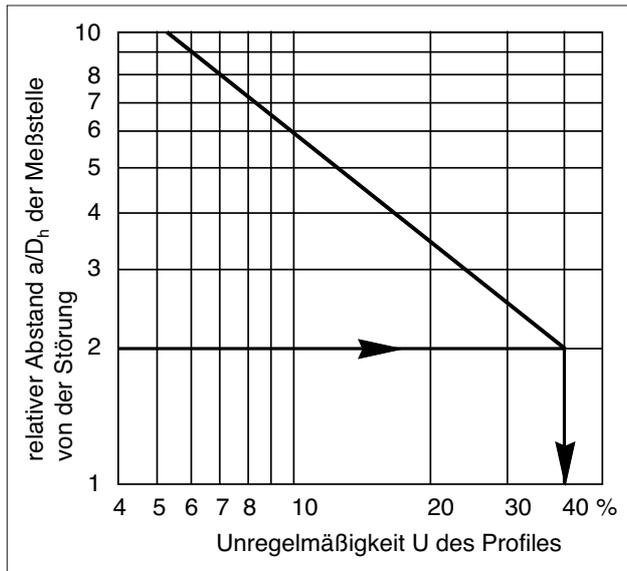


Bild 28:
Empirischer Zusammen-
hang zwischen Unregel-
mäßigkeit des Strömungs-
profils und dem relativen
Abstand a/D_h von der
Störstelle (aus VDI 2080
[1])

a = Abstand zur Störstelle
 D_h = hydraulischer
 Durchmesser

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

Tabelle 2:
Unsicherheit der
Messung bei annähernd
drallfreier Strömung in
Abhängigkeit von der
Anzahl der Meßpunkte
(aus VDI 2080 [1])

Beispielsweise würde eine Meßstelle, die zur Störstelle einen Abstand von $2 D_h$ hat, eine Unregelmäßigkeit des Profils von ca. 40% aufweisen. Will man die Unsicherheit am Meßort auf unter 10% halten, so sind mehr als 40 Meßpunkte erforderlich.

Aus diesen Beispielen sehen Sie, daß die Meßfehler bei der Strömungsmessung in erster Linie durch die Verhältnisse am Meßort, die Auswahl der richtigen Sonde und durch die richtige Handhabung bestimmt werden. Die Gerätetoleranzen sind demgegenüber zu vernachlässigen.

Messungen mit Flügelrad-Anemometern

• **Versperrung des Strömungsquerschnittes durch die Meßsonde**

Die ideale Flügelradsonde für Kanalmessungen ist die kombinierte Strömungs-/Temperatursonde mit $\varnothing 16$ mm. Diese Sonde ist als Universalsonde anzusehen, da der Flügelradquerschnitt einerseits groß genug ist, daß sich Anlaufeffekte und Lagerverschmutzung nicht zu stark auswirken, andererseits sind die Maße so klein, daß der Prüfloch-Durchmesser im Rahmen der Möglichkeiten bleibt.

Speziell in Verbindung mit einem Teleskop eignet sich diese Sonde für Messungen an großen Luftkanälen. Bei Messungen an kleinen Kanalquerschnitten ist der Einfluß des Flügelrad-Querschnittes auf die Genauigkeit der Messung nicht mehr zu vernachlässigen, dieser nimmt mit abnehmendem Kanalquerschnitt zu.

Die gemessene Strömungsgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe des Flügelrades gegenüber der Strömungsgeschwindigkeit vor der Sonde erhöht. Dieser Effekt ergibt sich durch die Querschnittsverengung des freien Strömungsquerschnittes nach Einbringen der Sonde in den Kanal.

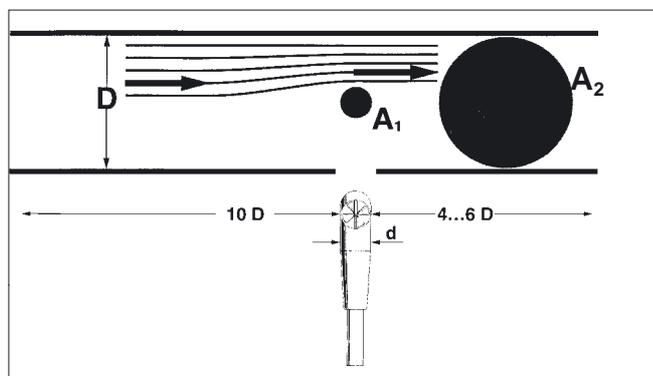


Bild 29:
Querschnittsverengung

A1: angeströmter
Sondenquerschnitt
A2: freier
Kanalquerschnitt

Um diesen Effekt zu verdeutlichen, sehen Sie in Bild 30 die Vergleichsmessung zwischen einer Flügelradsonde $\varnothing 25$ mm verglichen mit einem Prandtl-Staurohr mit deutlich kleinerem Querschnitt bei einem Kanal mit 250 mm Durchmesser.

testo

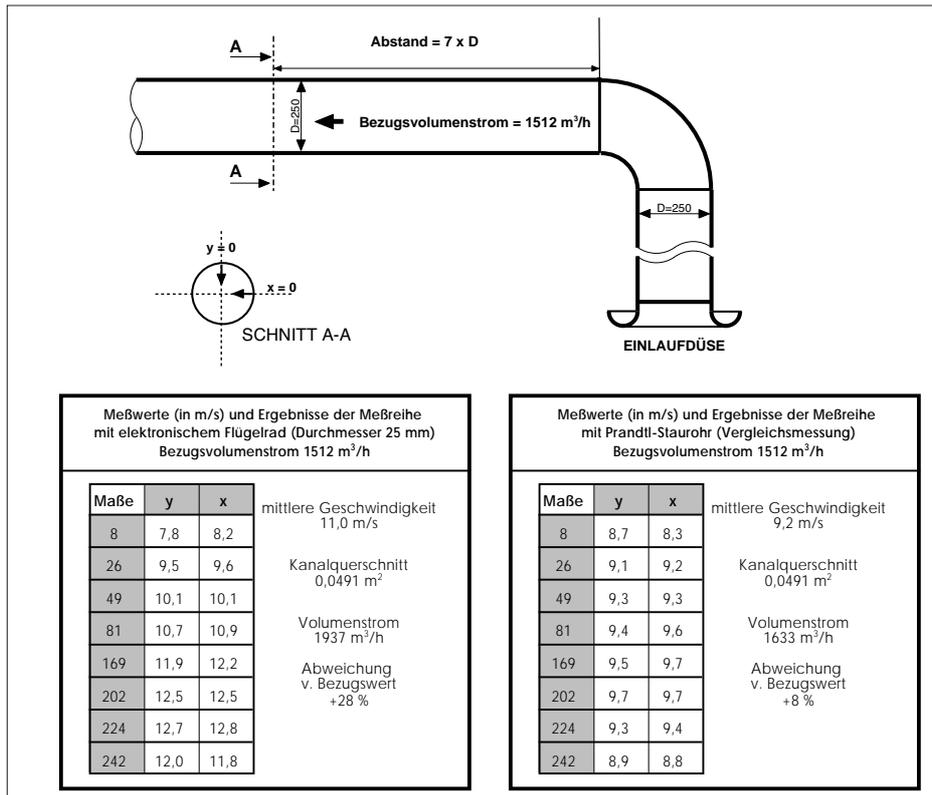


Bild 30: Meßfehler durch die Verengung des freien Strömungsquerschnittes mit einem Flügelrad-Anemometer im Vergleich zu Staurohrmessungen. Der Bezugsvolumenstrom wurde mit der Einlaufdüse ermittelt.

Die Meßwerte bei der Meßreihe mit dem Flügelrad-Anemometer steigen mit zunehmender Eintauchtiefe an (z. B. in der vertikalen Ebene von 9,5 bis 12,7 m/s).

Als Mittelwert über alle Meßpunkte ergibt sich aus der Querschnittsverengung durch das Flügelradanemometer eine erhöhte Anzeige von ca. 9 %. Dieser Wert entspricht der theoretischen Volumenstromerhöhung. Tatsächlich weicht der gemessene Volumenstrom um + 28% vom Bezugsvolumenstrom ab. Der zusätzliche Meßfehler ist ein systematische Fehler, der mit der stark gestörten Umströmung des Flügelrades und der geringen Eintauchtiefe im Kanal zusammenhängt.

• **Rückstromeffekte**

Beim Einsatz von Flügelrädern ist das Auftreten einer Rückströmung nicht aus den Meßwerten ersichtlich, da alle Werte betragsmäßig positiv angezeigt werden (die Drehrichtung des Flügelrades kann von der nachfolgenden Meßtechnik nicht erkannt werden). Dieser Zusammenhang ist auch anhand der in Bild 31 dargestellten Vergleichsmessung ersichtlich.

Treten durch, von außen nicht sichtbare, Kanaleinbauten (z. B. Schalldämpfer im wärmegeprägten Kanal oder im Rahmen von Montagearbeiten im Kanal zurückgelassene Gegenstände) starke Rückströmungen auf, werden üblicherweise zu hohe Luftströme gemessen.

Empfehlung: Verwenden Sie in solchen Fällen richtungsabhängig anzeigende Sonden z. B. die thermische Sonde 0635.1042 oder Staurohre in Verbindung mit Drucksonden.

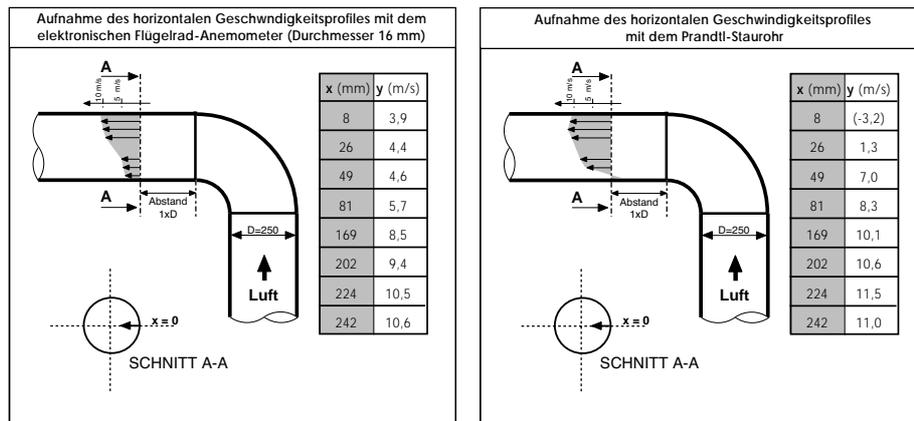


Bild 31: Vergleich der mit dem Flügelrad-Anemometer (Ø 16 mm) und dem Prandtl-Staurohr gemessenen horizontalen Geschwindigkeitsprofile unmittelbar nach dem Bogen. Die Rückströmung (Wirbelgebiet, keine definierte Strömungsrichtung) wird mit dem Flügelrad-Anemometer nicht erfaßt.



Hinweise für den Umgang mit Staurohren

• Sorgfältiger Umgang mit den Staurohren

Die Prandtl-Sonde hat zwei Druckentnahmestellen (statischer Druck und Staudruck). Zur Verbindung mit dem Differenzdruckmeßgerät werden Kunststoffschläuche verwendet. Es muß unbedingt darauf geachtet werden, daß die Schläuche dicht auf den Anschlußstutzen und den eventuell erforderlichen Kupplungsstücken sitzen. Andernfalls ergeben sich durch den Druckunterschied zur Umgehung Strömungen in Sonde und Schlauch.

Der dadurch verursachte Druckabfall kann das Meßsignal stark verfälschen. Diese Fehler können auch auftreten, wenn die Verbindungsschläuche beschädigt sind. Deshalb ist entsprechend sorgsam mit den Schläuchen umzugehen und ihre Dichtigkeit vor jeder Messung zu kontrollieren. Meßfehler entstehen auch häufig dadurch, daß die Schläuche versehentlich zusammengedrückt oder geknickt werden.

• Verschmutzung

Werden Messungen an Küchen- und Industrieabluft durchgeführt, kann sich die Meßbohrung für den Staudruck durch die von der Luft mitgeführten Partikel zusetzen. Es sind regelmäßige Sichtkontrollen und Reinigung der Meßbohrung durchzuführen.

• Fehlerhafte Auswertung der Meßergebnisse

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im untersuchten Kanalquerschnitt berechnet man aus dem arithmetischen Mittel der Einzelgeschwindigkeiten. Diese errechnet sich wiederum aus dem gemessenen dynamischen Druck wie folgt:

$$v = \sqrt{\frac{200.000 \cdot p}{\rho}}$$

v = Strömungsgeschwindigkeit in m/s

ρ = Luftdichte in g/m^3

p = am Staurohr gemessener Differenzdruck in hPa

Häufig wird bei der Auswertung aus den gemessenen dynamischen Drücken der Mittelwert gebildet und daraus die mittlere Strömungsgeschwindigkeit nach obiger Gleichung berechnet. Diese Vorgehensweise ist mathematisch falsch und führt besonders bei verzerrten Strömungsprofilen zu unzulässigen Abweichungen vom korrekt ermittelten Wert.

Ein weiterer Fehler ergibt sich oft dadurch, daß mit einer mittleren Dichte von 1200 g/m^3 gerechnet wird. Bei der Messung von Außenluftströmen kann die tatsächliche Luftdichte um bis zu $\pm 10 \%$ vom oben angegebenen Mittelwert abweichen. Damit ergibt sich eine Unsicherheit des Luftstromes von bis zu $\pm 5\%$.

Hier können Sie die Möglichkeiten des testo 452 oder 454 nutzen, aktivieren Sie die automatische Umrechnung des Staurohrdruckes in die Strömungsgeschwindigkeit, die punktuelle Mittelwertbildung kann dann direkt in m/s -Werten ausgeführt werden. Wichtig ist nur, daß Sie im Konfigurationsmenü die korrekte Luftdichte eingeben. Diese ist über Tabellen zu ermitteln. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis der örtlichen Werte von Absolutdruck, Temperatur und ggf. der relativen Feuchte.

Es empfiehlt sich diesen Luftdichtewert und die Parameter die zur Berechnung dieses Wertes geführt haben (Temperatur, absoluter Luftdruck und Feuchte) im Protokoll zu dokumentieren.

Staurohre sind ideale Aufnehmer für die Strömungsmessung im mittleren bis hohen Geschwindigkeitsbereich, bei hohen Temperaturen oder verschmutzter Luft. Unter 5 m/s sind sie nur bedingt brauchbar, da der erzeugte Differenzdruck mit zu großen Fehlern im unteren Bereich behaftet ist.

Eine brauchbare Druckmessung ist hier nur mit empfindlichen Geräten und größter Sorgfalt möglich. Stattdessen empfiehlt sich unter 5 m/s die Messung mit thermischen oder Flügelrad-Aufnehmern.

Luftstrommessung an Luftdurchlässen

Wie bereits in Kapitel „Meßfehler bei der Luftstrommessung, Seite 36“ beschrieben, sollte auf Luftstrommessungen an Luftdurchlässen verzichtet werden, da die praxisrelevanten Verfahren zum einen sehr zeitaufwendig und zum anderen mit hohen Fehlern behaftet sind.

An dieser Stelle wird trotzdem auf die zwei häufig angewendeten Verfahren eingegangen, die punktuelle Mittelwertbildung und die Schlaufenmethode.

testo

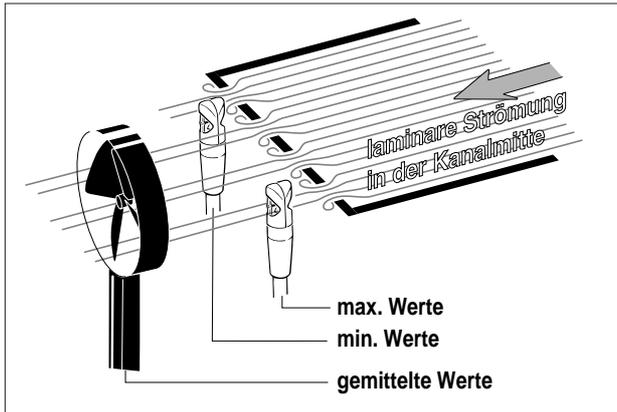


Bild 32:
Integrierende Messung
mit großem Flügelrad
oder punktuelle Mittelwert-
bildung mit Flügelradsonde
Ø 16 mm.

Durch das Luftaustrittsgitter wird die relativ gleichmäßige Strömung im Kanalinnern stark verändert, es entstehen Gebiete mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit an den freien Austrittsflächen und Gebiete mit niedriger Strömungsgeschwindigkeit und Verwirbelungen an den Gittern. Je nach Ausführung des Gitters beruhigt sich das Strömungsprofil in einigem Abstand vom Gitter (ca. 20 cm). Es bleibt ein periodisch anwachsendes und abfallendes Strömungsprofil übrig.



Bild 33:
Anwendung testo 452

Brauchbare Messungen sind hier in erster Linie mit großen Flügelraddurchmessern (60 bzw. 100 mm Durchmesser) zu erzielen, da bei diesen großen Durchmessern die Strömungswerte über eine größere Fläche integriert und gemittelt werden.

Verwendet man Flügelräder mit kleinem Durchmesser (z. B. 16 mm), ist eine punktuelle Mittelwertbildung mit entsprechend vielen Meßpunkten durchzuführen.

Bei Verwendung von großen Flügelrädern reicht ein schleifenförmiges Abfahren des Gitterquerschnittes (in Verbindung mit einer zeitlichen Mittelwertbildung) aus.

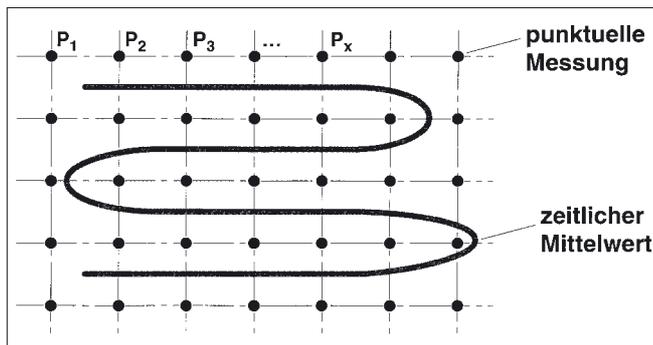


Bild 34:
**Gittermessung am
Kanalaustritt**

Nach der Ermittlung der mittleren Luftgeschwindigkeit errechnet sich der Volumenstrom durch multiplizieren dieses Wertes mit dem freien Strömungsquerschnitt des Gitters.

Beispiel: $V = 1 \text{ m/s} \times 0,8 \times 0,2 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$
mit: 1 m/s gemessener Geschwindigkeit, 0,2 m x 0,5 m Gitterfläche;
0,8 : 20 % der Gitterfläche durch Stege verdeckt.

Die nachfolgend beschriebenen Fehlerquellen beeinflussen das Meßergebnis:

- **Ungleichmäßige Führungsgeschwindigkeit des Flügelrades**
Führen Sie deswegen mehrere Messungen durch, z. B. einmal mit Führung der Sonde in senkrechten Schleifen und einmal mit Führung der Sonde in horizontalen Schleifen. Verwenden Sie das mittlere Ergebnis für weitere Berechnungen ...
- **Beeinflussung der Luftströmung durch Flügelrad und Meßperson**
Vermeiden Sie ein unnötiges Versperren des Luftauslasses, da jeder Strömungswiderstand das Meßergebnis beeinflusst. Verwenden Sie wenn möglich ein großes Flügelrad mit Teleskop, dadurch befindet sich nur noch die Flügelradsonde im zu messenden Strömungsprofil.



- **Ungleichmäßige Beaufschlagung des Gitters**

Die Beaufschlagung des Gitterquerschnittes ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit im Kanal vor dem Luftdurchlaß. In Bild 35 ist ein Luftkanal mit 3 Gittern dargestellt. Das Strömungsprofil am ersten Gitter ist sehr ungleichmäßig, da vor diesem Auslaß die größte Strömungsgeschwindigkeit im Kanal herrscht.

Im rechten Bereich des Gitters findet eine Rückströmung statt, d. h. es wird Umgebungsluft in den Kanal gesaugt. Zudem weicht die Ausblasrichtung der Zuluft stark von der senkrechten ab.

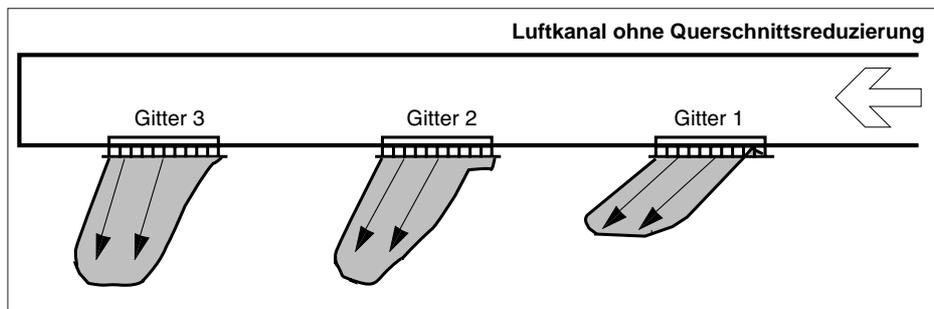


Bild 35: **Schematische Darstellung (vereinfacht) der Geschwindigkeitsprofile am Luftaustritt, zur Verdeutlichung der unregelmäßigen Beaufschlagung des Gitterquerschnittes**

- **Abstand vom Flügelrad zum Luftaustrittsgitter ist nicht definierbar**

Zwischen den Luftleitlamellen erhöht sich die Luftgeschwindigkeit. Direkt dahinter treten unabhängig vom Umlenkwinkel Wirbelgebiete ohne definierte Strömungsrichtung auf. Der Einsatz von Flügelrädern beschränkt sich auf gerichtete Strömungen - ohne ausgeprägte Geschwindigkeitsspitzen.

Deshalb ist das Flügelrad in einem gewissen Mindestabstand über die Gitteroberfläche zu führen (Richtwert 5 cm). Mit zunehmendem Abstand vom Luftauslaß vergleichmäßigt sich zwar das Geschwindigkeitsprofil, allerdings weitet sich der Luftstrahl mit zunehmendem Abstand auf und die mittlere Geschwindigkeit nimmt ab. Die, für die Volumenstromberechnung heranzuziehende, Querschnittsfläche ist hier nur schwer zu bestimmen, siehe nächster Punkt.

- **Freier Strömungsquerschnitt zur Berechnung des Volumenstromes ist nicht definierbar**

Die zur gemessenen Geschwindigkeit korrespondierende Fläche kann nur geschätzt werden. Bei Luftgittern wird dabei vom freien Strömungsquerschnitt ausgegangen. Diese Art der Flächenermittlung ist nur für gerade angestellte Luftleitlamellen (ohne Umlenkung) möglich. Für alle anderen Fälle ergeben sich zu hohe Luftströme. Das gilt auch für mehrteilig aufgebaute Gitter (z. B. mit Mengeneinstellung).

Vielfach wird die Querschnittsminderung durch die Gittereinbauten nach der Messung so abgeschätzt, daß der Soll-Luftstrom ungefähr erreicht wird.

Zusammenfassung

Die Messung der mittleren Luftgeschwindigkeit an Luftdurchlässen nach der Schlaufenmethode liefert nur dann überprüfbare (reproduzierbare) Ergebnisse, wenn die gleichmäßige Beaufschlagung des gesamten Gitterquerschnittes und die Geradeausrichtung der Luftleitlamellen gewährleistet ist (keine Umlenkung).

Dieser Fall ist in der Praxis nur selten vorzufinden, sodaß die Schlaufenmethode für Abnahmemessungen nur bedingt geeignet ist und nur für abschätzende Messungen angewendet werden darf. Dasselbe gilt analog für die punktuelle Mittelwertbildung mit Sonden kleinen Querschnittes.

Die Messung an Luftaustrittsgittern kann dadurch verbessert werden, daß man einen Ansatzkanal aus Hartschaum oder Spanplatten verwendet, wie in Bild 36 dargestellt. Am Ende des Kanales wird nach der Trivialmethode eine Netzmessung z. B. mit einem Prandtl-Staurohr durchgeführt. Die Länge des Kanales muß mindestens den 4fachen hydraulischen Durchmesser ($4 D_h$; $D_h = 4 A/U$, berechnet aus dem Gitterquerschnitt) haben.

Bei drallfreier Strömung und bei geringem Druckabfall durch den Ansatzkanal, liefert diese Methode hinreichend genaue Ergebnisse. Theoretisch wird jedoch immer ein zu kleiner Luftstrom gemessen.

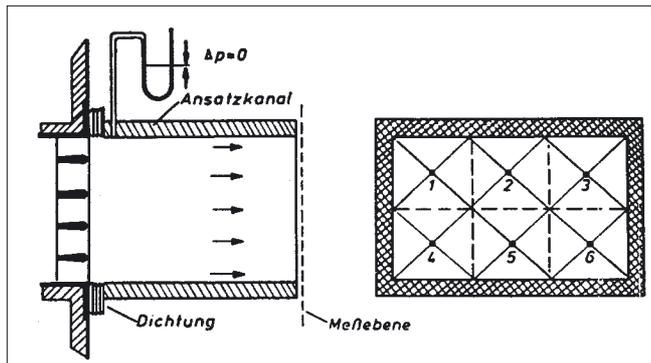


Bild 36:
Ansatzkanal mit Netz-
messung (aus dem
Handbuch der Klima-
technik, Band 3 [5])

Für Einregelungsarbeiten an kleineren Luftdurchlässen wird häufig ein verjüngter Ansatzkanal verwendet, in dessen Zentrum ein Flügelrad im Zwangsdurchlauf platziert ist. Hierbei ist der absolute Wert des Luftstromes nicht von Bedeutung, da nur der Abgleich der einzelnen Luftdurchlässe festzustellen ist. Der Gesamtluftstrom des Luftkanales wird durch Netzmessungen ermittelt.

Die genaue Messung des Volumenstromes an Luftdurchlässen ermöglicht die, in der VDI 2080 [1] beschriebene, Nullmethode. Das Meßverfahren kommt wegen des hohen apparativen Aufwandes in der Praxis nur in Sonderfällen zur Anwendung. Weitere Verfahren (z. B. Airbag-Verfahren, die jedoch ebenfalls großen Aufwand erfordern) sind im Handbuch der Klimameßtechnik [8] beschrieben.

Messungen an saugenden Öffnungen

Wie bereits beschrieben ist die Messung an Austrittsgittern (Blasen) zwar kritisch aber innerhalb gewisser Grenzen doch machbar. Hier wird das Strömungsprofil durch das Gitter zwar beeinflußt, doch bleibt es in der Regel auch in einiger Entfernung vom Gitter noch erhalten, sodaß die Geschwindigkeit gemessen werden kann.

Andere Verhältnisse findet man an Öffnungen vor, die Luft aus dem Raum absaugen. Selbst ohne störende Einflüsse eines Gitters sind die Strömungslinien nicht gerichtet, das Strömungsprofil ist stark inhomogen.

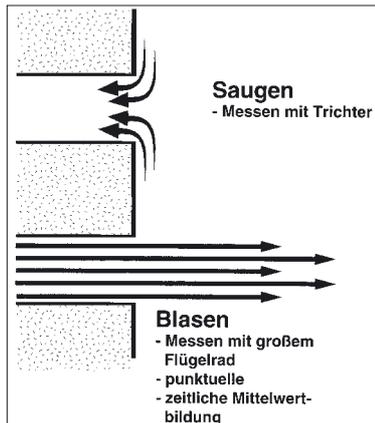


Bild 37: Strömungslinien an saugenden Öffnungen

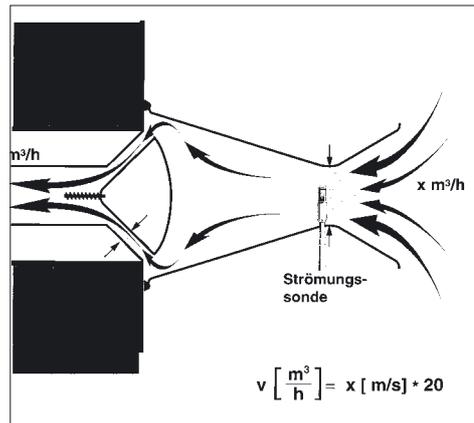


Bild 38: Volumenstrombestimmung mit Meßtrichter

Die Ursache liegt darin, daß durch den im Kanal herrschenden Unterdruck die Luft aus dem Raum trichterförmig angesaugt wird. Bereits in geringem Abstand von der Eintrittsöffnung gibt es im Raum keine definierbare Fläche über die man, z. B. durch eine Netzmessung mit Mittelwertbildung, eine Volumenstrombestimmung durchführen könnte. Hier bringt lediglich die Kanalmessung reproduzierbare Ergebnisse.

Eine spezielle Variante stellen Tellerventile dar. Der abgesaugte Volumenstrom wird durch Drehen des Ventils eingestellt, auch hier ist die freie Strömungsquerschnittsfläche nicht bestimmbar, sie liegt im Innern des Ventils (ein Kreisring), ebenso ist es nicht möglich an dieser Stelle eine Strömungssonde zu plazieren.

Für diese Anwendungen gibt es Meßtrichter in verschiedenen Größen. Diese schaffen in einiger Entfernung vom Tellerventil definierte Strömungsverhältnisse in einem fixen Querschnitt. An dieser Stelle befindet sich die Strömungssonde, die mittig positioniert und fixiert wird.

Der abgesaugte Volumenstrom ergibt sich aus dem Meßwert der Strömungssonde multipliziert mit dem Trichterfaktor (z. B. Trichterfaktor 20).



Volumenstromermittlung über die Ventilator Kennlinie

Die Ermittlung des Volumenstromes am Zentralgerät der raumluftechnischen Anlage über eine Differenzdruck- und Drehzahlmessung ist nur zulässig, wenn die Geräte- kennlinie vorliegt. Diese kann entweder auf dem Prüfstand des Geräteherstellers oder vor Ort durch Kalibrierung aufgenommen werden (siehe auch Entwurf DIN 4796 [7]).

Entnimmt man den Volumenstrom aus der Ventilator Kennlinie (Firmenunterlagen), können sich je nach der Einbausituation des Ventilators große Abweichungen vom tatsächlichen Volumenstrom ergeben (siehe schematische Darstellung in Bild 39).

Die Ventilator Kennlinie wird auf einem genormten Prüfstand ermittelt. Dabei weichen die An- und Abströmverhältnisse zum Teil erheblich von denen im Zentralgerät ab.

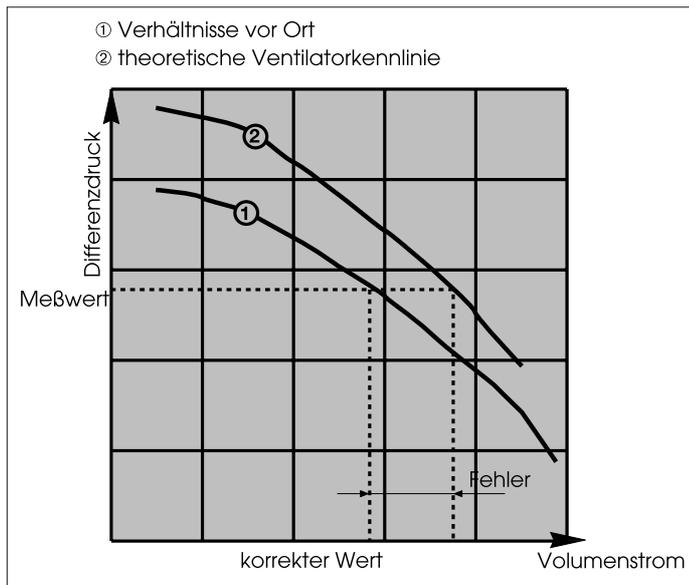


Bild 39:
Interpretationsfehler bei der Volumenstrombestimmung anhand der Ventilator Kennlinie

Messung der Raumlufthgeschwindigkeit

Die Raumlufthgeschwindigkeit ist eine sehr wichtige Größe im Zusammenhang mit der thermischen Behaglichkeit von Menschen in Aufenthaltsräumen. In der DIN 1946 [3], Teil 2 werden neue Anforderungen an die maximal zulässigen Raumlufthgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Raumlufthtemperatur und vom Turbulenzgrad gestellt.

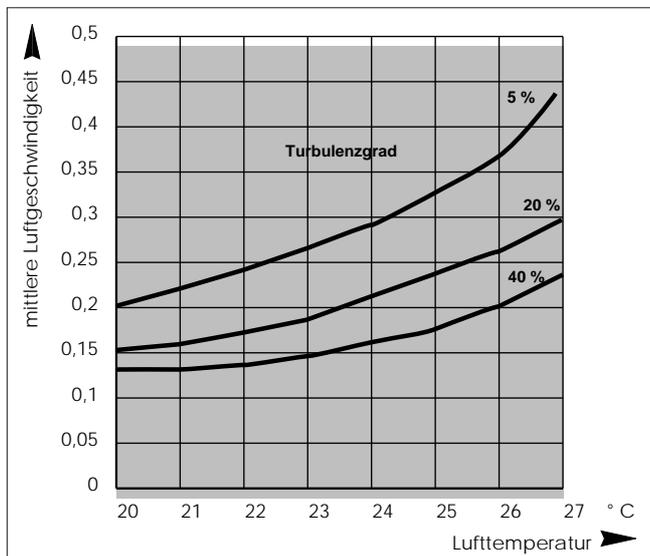


Bild 40:
Mittlere Luftgeschwindigkeiten als Funktion von Temperatur und Turbulenzgrad der Luft im Behaglichkeitsbereich (Randbedingungen siehe DIN 1946, Teil 2 [3])

Vorbereitung und Durchführung von Messungen

Grundsätzlich sollten die Messungen im voll eingerichteten Raum durchgeführt werden, da die Möblierung und die Geräte erheblichen Einfluß auf die Raumströmung haben.

Vor Beginn der Messungen müssen die Randbedingungen festgelegt und entsprechend eingestellt werden. Hierbei ist vor allem die Einstellung der Luftdurchlässe und die Differenz zwischen Zuluft- und Raumlufthtemperatur zu überprüfen, da sie den größten Einfluß auf die Luftverteilung und die Raumlufthgeschwindigkeit in der Aufenthaltszone haben.



Weiterhin muß sichergestellt werden, daß über die Raumumschließungsflächen (Fenster, Türen) kein unzulässiger Luftaustausch stattfindet, der zu Zegerscheinungen führen kann, die nicht der raumluftechnischen Anlage anzulasten sind.

Die Auswahl der Meßstellen beschränkt sich normalerweise auf den Aufenthaltsbereich von Personen. Dort wird die Luftströmung ausgehend vom nahegelegenen Luftauslaß mit Prüfrauch (Vorsicht: Strömungsgeschwindigkeitssonden dürfen nicht mit Rauch beaufschlagt werden!) sichtbar gemacht.

Werden Zegerscheinungen im Knöchelbereich festgestellt, ist zu überprüfen, ob diese nicht durch den Kaltluftabfall an Fenstern verursacht werden. An den so festgestellten kritischen Stellen, bevorzugt in den Höhen 0,1 m (Knöchelbereich), 1,3 m (Kopfhöhe sitzend) und 1,8 m (Kopfhöhe stehend), sind anschließend die mittlere Raumluftgeschwindigkeit, der (skalare) Turbulenzgrad und die Lufttemperatur zu ermitteln.

Druckmessung

Die Differenz der statischen Drücke wird im Zuge von Abnahmemessungen zur Überprüfung des Druckabfalles von Einbauten (z.B. Luftfilter) gemessen. Wie in Bild 41 verdeutlicht, muß bei der Herstellung von Meßbohrungen auf folgende Details geachtet werden:

- Es dürfen keine dynamischen Strömungskomponenten auf die Druckmeßstelle wirken, die Strömung muß parallel zur Wandung verlaufen.
- Die Meßbohrungen sollten möglichst klein ($D = 1 \dots 2 \text{ mm}$) und gratfrei ausgeführt werden. Auf den Außenflächen des Kanales sind die Druckmeßstutzen zentrisch zur Bohrung und dicht zu befestigen.

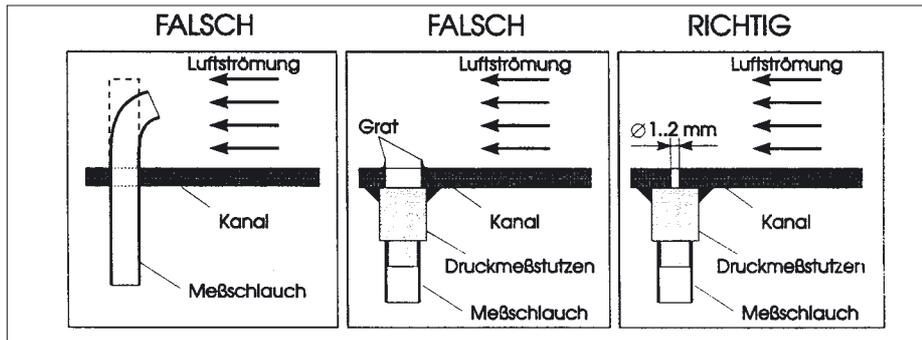


Bild 41: Fehler bei der Herstellung von Druckmeßstellen an Luftkanälen. Im rechten Bild ist die korrekte Ausführung dargestellt.

Bei der Messung des statischen Druckes gegenüber dem Umgebungsdruck sind die Höhenunterschiede zwischen statischer Druckentnahmestelle und Umgebungsdruck-Meßstelle am Meßgerät zu korrigieren. Das Problem kann umgangen werden, indem man beide Druckmeßstellen (offener Eingang am Gerät und Meßort für den statischen Druck im Kanal) auf gleiche Höhe bringt.

CO₂-Messung zur Beurteilung von Raumklima

In den deutschsprachigen Ländern Europas steckt sie noch in den Kinderschuhen, im skandinavischen Raum, in den USA und in Japan ist sie schon fest im Bewußtsein der Klima-Lüftungstechniker und Ingenieure verankert und Thema vieler Diskussionen. Die Rede ist von der CO₂ Messung als Grundlage für eine bedarfsgerechte Lüftungsregelung.

Wo liegen die Gründe dafür, eine bislang eher unbekanntete Meßgröße als neue Meßgröße in den Alltag der Klima- und Lüftungsmeßtechnik einzuführen und diese Meßgröße mit zum festen Bestandteil von Abnahmemessungen neben der Temperatur-, Feuchte-, Luftgeschwindigkeits- und Druckmessung zu machen?

Vor allem in Großgebäuden, Bürokomplexen etc. ist es heute nicht mehr möglich, bei Bedarf die Frischluftzufuhr durch Fensteröffnen kurzfristig zu regeln. Die Leistung einer raumlufttechnischen Anlage besteht eben gerade darin, zur richtigen Zeit im richtigen Raum das optimale Klima zur Verfügung zu stellen, und zwar in Hinblick auf



ein optimales Behaglichkeitsempfinden für die sich im Raum aufhaltenden und arbeitenden Menschen. Dies alles natürlich unter dem Aspekt energiesparender Arbeitsweisen.

Wie sieht das in der Praxis aus?

Entweder steht das Energiesparen im Vordergrund, die Folge davon ist eine lufttechnische Anlage, die sich an einem minimalen Luftaustausch in den einzelnen Räumen orientiert, es wird mit einem hohen Umluftanteil gearbeitet. Natürlich werden in diesem Zusammenhang Zugerscheinungen in den Räumen auf ein Minimum reduziert.

Doch es kommt dann zu Engpässen in der Versorgung mit „frischer“ Luft, nämlich dann, wenn sich überdurchschnittlich viele Menschen in den belüfteten Räumen aufhalten. Allgemeines Unbehagen stellt sich ein, begleitet von Konzentrationsschwäche, Müdigkeit und einem Abfall des Leistungsvermögens. Alles Anzeichen für das im englischen Sprachraum viel diskutierte „Sick Building Syndrom“.

Im zweiten Fall orientiert sich die Einstellung der Lüftungsanlage am Maximum des in den Räumen möglichen Publikumsverkehrs. Hier steht zwar immer ausreichend Frischluft zur Verfügung, allerdings wird dies meist als unangenehm empfunden, es „zieht“. Ein weiterer Effekt hierbei ist, daß im Mittel mehr Energie verbraucht wird, als es die Situation erfordert.

Der gemessene CO₂-Wert ist nun der ideale Indikator dafür wie verbraucht die Raumluft ist, ob der Frischluftanteil in der Zuluft erhöht werden muß oder zurückgefahren werden kann. D.h. der CO₂ Gehalt wird als diejenige Meßgröße angesehen, über die direkt auf die Luftqualität geschlossen werden kann.

Unbelastete Frischluft hat einen CO₂-Gehalt von ca. 350 ppm. Legt man eine CO₂ - Abgabe eines sitzend arbeitenden Menschen von ca. 20 l/h zugrunde, so ergibt sich im geschlossenen Raum trotz Außenluftzufuhr eine erhöhte CO₂ Konzentration.

Außenluftzufuhr pro Person [m ³ /h Person]	CO ₂ -Konzentration [ppm]
3,8	5000
8,5	2500
14,9	1500
25,6	1000

*Tabelle 3:
Beharrungswert für
die CO₂-Konzentration
in einem Raum in
Abhängigkeit von der
Außenluftzufuhr*

Diesen Verhältnissen wird in der Regelungstechnik bereits Rechnung getragen, mehr und mehr Anlagen werden mit CO₂ Meßumformern ausgestattet, um die Luftzufuhr den jeweils notwendigen Verhältnissen anzupassen.

Die je nach Nutzungsart einzuhaltenen Grenzwerte sind zwar noch nicht gesetzlich fixiert, jedoch existieren bereits gesicherte Erfahrungswerte, die sich je nach Nutzungsart zwischen 1000 und 7000 ppm bewegen.

Für Einstellungsarbeiten an lufttechnischen Anlagen und Kontrollmessungen in Räumen mit einer ständig wechselnden Anzahl an Personen stellen CO₂-Fühler in Verbindung mit einem Datenlogger eine optimale Lösung dar. Stichprobenmessungen sind genauso gut durchzuführen wie beobachtende Aufzeichnungen über längere Zeiträume. Siehe testo 454 mit CO₂ Fühler.

Allgemeines zur Handhabung von Meßgeräten

- Die Meßgeräte müssen frühzeitig vor dem geplanten Einsatz geprüft und gegebenenfalls neu abgeglichen werden. Speziell bei Messungen innerhalb der ISO 9000 wird eine in definierten Abständen wiederkehrende Nachkalibrierung der Meßgeräte vorausgesetzt. Testo bietet Kalibrierzertifikate für das komplette Meßsystem (d. h. Anzeigegerät und Fühler, für die Zertifizierung innerhalb der ISO 9000) an. Speziell für Temperatur und Feuchte ist Testo akkreditiertes DKD-Labor.
- Zur Messung müssen genügend Ersatzbatterien mitgenommen werden. Bei Akkumulatoren ist darauf zu achten, daß sie vollständig aufgeladen sind und über ausreichende Speicherkapazität verfügen.



- Achten Sie bei der Messung darauf, daß die Umgebungstemperatur im von Testo angegebenen Einsatzbereich liegt. Beim Transport der Meßgeräte an kalten Wintertagen (z. B. im Kofferraum eines PKW) muß genügend Zeit bleiben, daß sich die Geräte an die Einsatztemperatur angleichen können. Zur Vermeidung von Kondensation im Meßgerät muß es während der Aufwärmung im Meßkoffer bleiben.
- Unterliegt die Meßwertanzeige starken Schwankungen, empfiehlt es sich, eine Mittelwertbildung durchzuführen - entweder durch Mittelung der Anzeigewerte über einen längeren Zeitraum oder durch Mittelwertbildung einer größeren Anzahl von verschiedenen Meßpunkten. Dabei sollten die Einzelwerte, die zur Mittelwertbildung geführt haben, ebenfalls protokolliert werden. Nur so können die Meßergebnisse bei späteren Überprüfungen nachvollzogen werden.

Der Umgang mit Fühlern und Sonden

- Bei Sonden zur Luftströmungsmessung empfiehlt sich gelegentlich ein Vergleich mit kalibrierten Referenzsonden (die nicht im rauen Meßalltag verwendet werden und deren Genauigkeit somit über lange Zeiträume gewährleistet ist).

Für eine einfache Routinekontrolle werden weder Windkanal noch Referenzsonden benötigt. Bei Flügelrädern genügt ein leichtes Anblasen. Das Flügelrad läuft daraufhin absolut gleichmäßig ohne Nebengeräusche (leises Rattern). Ein einwandfreies Flügelrad läuft gleichmäßig bis zum Stillstand aus. Ein Nachpendeln des Flügelrades vor dem Stillstand deutet auf einen einzelnen verbogenen Flügel hin.

Laufen Flügelräder nicht bei leichtem Anhauchen an, sondern geschieht der Anlauf bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten eher ruckartig, so sind die Lager verschmutzt und gemäß den Herstelleranweisungen zu reinigen.

Bei thermischen Strömungssonden genügt in der Regel eine optische Kontrolle.

Vergleichsmessungen zwischen Strömungssonden unterschiedlicher Bauart, z. B. Vergleich zwischen thermischer Sonde und Flügelrad, sollten nur unter idealen Strömungsbedingungen vorgenommen werden. Die Strömungsbedingungen müssen den Bedingungen beim Abgleich möglichst nahe kommen, d. h. messen in laminarer Strömung, messen im Freistrah (350 mm) und nicht im Kanal.

Der Aufwand für exakte Vergleichsmessungen ist erheblich und erfordert umfangreiche technische Anlagen (Windkanal und Referenzsystem). In der Praxis spielen die in der Dokumentation garantierten, anspruchsvollen Genauigkeiten

nur eine untergeordnete Rolle. Im Alltag wird die Genauigkeit und Aussagekraft der Meßergebnisse fast ausschließlich durch die richtige Handhabung der Meßgeräte und die Wahl eines geeigneten Meßortes bestimmt.

- Bei Oberflächen-Temperaturfühlern reicht eine optische Kontrolle.

Der Kreuzbandfühler bzw. Rohroberflächenfühler (mit gewalzten federnden Thermoelmentbändchen) sollte gelegentlich auf Fühlerbruch kontrolliert werden.



Bild 42:
Kreuzbandfühler 0600.0194

Die Genauigkeit der Temperaturfühler für Luft- und Tauchmessungen ist unkritisch, solange diese gemäß den Testo-Angaben eingesetzt werden.

- Feuchtefühler sind in der Regel wartungsfrei, für gelegentliche Kontroll- und Abgleicharbeiten steht ein Kontroll- und Abgleichset zur Verfügung.
- Differenzdrucksonden müssen vor jeder Messung im Nullpunkt abgeglichen werden (siehe Gerätebeschreibung). Zur Vermeidung der Überlastung sollte die Messung mit einer Sonde mit hohem Meßbereich begonnen werden. Für genauere Messungen kann dann (bei bekanntem Druck) auf Präzisionssonden mit kleinem Meßbereich übergegangen werden.

testo

Vorstellung der Testo-Meßgeräte

Die tragbaren Hand-Meßgeräte von Testo unterteilen sich in drei Geräteklassen:

- 1) Die kompakten Kontrollgeräte für punktuelle, präzise Messungen. Die Meßdaten werden nicht dokumentiert. Fordern Sie unseren Meßgeräte-Katalog an.
- 2) Bei den professionellen Systemgeräten steht das Dokumentieren der Meßwerte im Vordergrund: Speichern und Drucken der Daten sowie Auswertung in Ihrem PC. So entfällt lästige Schreibarbeit, Ablese- und Übertragungsfehler sind ausgeschlossen. Fordern Sie ausführliche Unterlagen an oder vereinbaren Sie einen Besuchstermin mit einer unserer Geschäftsstellen.
- 3) Meßdaten-Speichergeräte messen und registrieren selbständig Meßdaten über lange Zeiträume. Eingesetzt werden diese Datenlogger zur Überwachung von Klima- und Kälteanlagen, für Meßreihen z.B. auf Prüfständen und zur Qualitätssicherung bei Produktion, Lagerung und Transport. Das Auswerten der gespeicherten Daten erfolgt im PC. Fordern Sie ausführliche Unterlagen an oder vereinbaren Sie einen Besuchstermin mit einer unserer Geschäftsstellen.





Übersicht Gerätedaten

Temperatur	Feuchte	Strömung	Kombi-Meßgeräte
Systemgeräte testo 700 / 701 Pt 100 -200...+800°C testo 781 Quarz (Auflösung 0,01°C) -40...+300°C testo 900 / 901 Thermoelement -40...+1370°C testo 9500 Thermoelement / NTC -200...+1760°C testo 9600 Thermoelement / NTC Ex- und Schlagwetter- Schutz, eichfähig -200...+1370°C Meßdaten- Speichergeräte testostor 171 NTC -50...+120°C	Systemgeräte testo 600 / 601 0...100%rF -20...+140°C mit Taupunkt- Bestimmung Meßdaten- Speichergeräte testostor 171 0...100%rF -50...+120°C	Systemgeräte testo 490 / 491 0...60 m/s -40...+350°C Flügelrad-Sonden thermische Sonden	Systemgeräte testo 451 -120...+1370°C 0...100%rF 0,2...60 m/s testo 452 -120...+1370°C 0...100%rF 0...100 m/s ±100 hPa (Differenzdruck) testo 454 Meßgerät und Datenlogger -200...+1370°C 0...100%rF 0...60 m/s ±100 hPa (Diff.-druck) 0...2000 hPa(Absolut- druck) 0...1 Vol% CO ₂ 30 Hz...300 kHz 0...20 mA -10...+10 mV 100 W...300 kW

Fühlerbeschreibungen

Oberflächenfühler	Meßbereich	Sensor	t ₉₀ (sec)	Länge Fühlerrohr	Ø Meßspitze
1) Robuster Pt100-Fühler mit verbreiteter Meßspitze für Messungen an planen Oberflächen 	-50...+400 °C	Pt100 (Klasse B)	40	150 mm	8 mm
2) Robuster NiCr-Ni-Fühler mit verbreiteter Meßspitze für Messungen an planen Oberflächen 	-200...+600 °C	NiCr-Ni	25	150 mm	4 mm
3) Hochtemperatur-Oberflächenfühler mit federndem Thermoelement-Band 	-200...+700 °C	NiCr-Ni (Klasse 2)	3	200 mm	8 mm
4) Klettbandfühler zum Ankleben an Rohre etc., für Dauermessungen 	-50...+150 °C	Pt100	40		
5) Magnetfühler für höhere Temperaturen a) Haftkraft ca. 10 N, b) Haftkraft ca. 20 N 	a) -50...+400 °C b) -50...+170 °C	NiCr-Ni NiCr-Ni (Klasse 2)	- -		25 mm 25 mm
6) Rohranlegefühler zur Temperaturbestimmung an Rohrleitungen bis 2" Durchmesser 	-60...+130 °C	NiCr-Ni (Klasse 2)	5	130 mm	65 mm
7) Infrarot-Fühler für berührungslose Temperaturmessung an spannungsführenden, schwer zugänglichen und rotierenden Teilen Ø Meßfleck 5 7,5 14 21 33 mm  Meßentfernung 16 25 50 76 130 mm	-18...+260 °C	Infrarot-sensor	2	Fühlerlänge 180 mm	-



Tauchfühler

8) Fühler zur Messung in Flüssigkeiten und pulvrigen Stoffen



	Meßbereich	Sensor	t ₉₉ (sec)	Länge Fühlerrohr	Ø F.rohr
a)	-200...+600 °C	NiCr-Ni	1	150 mm	1,5 mm
b)	-200...+600 °C	Pt100	20	150 mm	3 mm

Einstechfühler

9) Wasserdichter Fühler mit angeschliffener Meßspitze, kochfest



	Meßbereich	Sensor	t ₉₉ (sec)	Länge Fühlerrohr	Ø Meßspitze
	-200...+600 °C	Pt100	30	150 mm	3 mm

Luftfühler

10) Sehr reaktionsschneller Fühler zur Messung in Flüssigkeiten und Gasen



11) Sehr genauer Fühler für Luft- / Gas-Temperaturmessungen



	Meßbereich	Sensor	t ₉₉ (sec)	Länge Fühlerrohr	Ø Meßspitze
	-200...+600 °C	NiCr-Ni	9	150 mm	0,5 mm
	-40...+130 °C	NTC	60	150 mm	9 mm

12) Globe-Thermometer zur Messung der Strahlungswärme



	Meßbereich	Sensor	t ₉₉ (sec)	Länge Fühlerrohr	Ø Meßspitze
	-25...80 °C				Ø Kugel ca. 150 mm

Thermopaare und Adapter

13) Aufklebbare Thermopaare für Oberflächenmessungen. Trägermaterial: Alufolie



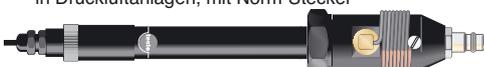
Höchst-temp.	Maße	Befestigung an Meßstelle	Lieferumfang
+200 °C	Dicke 0,1 mm Ø Verlängerung 2,0 x 0,2 mm	Mit üblichen Klebern oder mit Silikon-Wärmeleitpaste Best.-Nr. 0554.0004	Packung à 2 Stück

14) Adapter zum Anschluß von Thermopaaren und Fühlern mit offenen Drahtenden



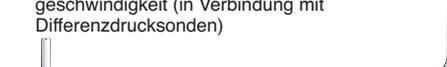
Alle Angaben für Pt100 nach DIN IEC 751, Klasse A.
Für Thermo-Elemente gelten die technischen Daten nach DIN IEC 584 Teil 2, Klasse 1.

Feuchtefühler

	Meßbereich	Sensor	t ₉₀ (sec)	Länge	Ø
15) Luftfühler für Feuchte- und Temperaturmessungen 	0...100 %rF (Fühlerspitze) -20...+70 °C	kapazitiv NTC	10	Gesamtlänge 245 mm	21 mm
16) Hochtemperatur-Feuchtefühler, zur Messung z. B. in Kanälen oder Schüttgut 	0...100 %rF -20...+140 °C	kapazitiv NTC	20	Fühlerrohr 300 mm	Fühlerrohr 12 mm
17) Flexibler Feuchte-Fühler zur Messung an schwer zugänglichen Stellen 	0...100 %rF -20...+140 °C	kapazitiv NTC	20	Fühlerrohr 1500 mm	Spitze 12 mm
18) Druckdichter Feuchte-Fühler zur Messung in Druckluftanlagen, mit Norm-Stecker 	0...100 %rF Drucktaupunkt t _{pd} : -50...+40 °C	kapazitiv NTC		Gesamtlänge 300 mm Anschluß über Norm-Stecker	

Systemgenauigkeit für 15) - 18): ±2 %rF (2...98 %rF) ±0,4 °C (0...50 °C) ±0,5 °C (restlicher Bereich)

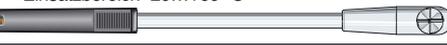
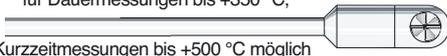
Drucksonden

	Meßbereich	Meßsystem	Genauigkeit	
19) Differenzdrucksonden a) und b) zur Messung von Strömungsgeschwindigkeit (in Verbindung mit Staurohr) und zur Messung von Differenzdruck  Ø Staurohranschluß 5 mm Absolutdrucksonde c) zur Messung von Absolutdruck	a) ±100 hPa b) ±10 hPa c) 2 bar	Diff.-druck Diff.-druck Absolutdruck	±0,1 hPa (0...20 hPa) ±0,5 % v. Mw. (20...100 hPa) ±0,03 hPa ±5 hPa	
20) Staurohre in verschiedenen Längen, Durchmessern und Materialien, zur Messung von Strömungsgeschwindigkeit (in Verbindung mit Differenzdrucksonden) 	Material a) Messing b) Messing c) Edelstahl	Temp._{max} 350 °C 350 °C 500 °C	Länge 500 mm 350 mm 300 mm	Ø 7 mm 7 mm 4 mm



Flügelrad-Meßsonden

(Systemgenauigkeit mit Gerät)

	Meßbereich	Sensor	Genauigkeit	Länge Sonde	Ø Spitze
21) Kombinierte Flügelrad-/Temperatur-Meßsonde (steckbar)*, Ø 25 mm 	0,4...40,0 m/s -30...+140 °C**	Flügelrad NiCr-Ni	±1 % v. Endwert	180 mm	25 mm
22) Kombinierte Flügelrad-/Temperatur-Meßsonde (steckbar)*, Ø 16 mm 	0,4...60,0 m/s -30...+140 °C**	Flügelrad NiCr-Ni	±0,4 m/s (bis 40 m/s)	180 mm	16 mm
23) Niedertemperatur-Anemometersonde mit Handgriff, Einsatzbereich -20...+60 °C 	0,6...40,0 m/s	Flügelrad	±2 % v. Endwert	190 mm	16 mm
24) Hochtemperatur-Sonde für Dauermessungen bis +350 °C, Kurzzeitmessungen bis +500 °C möglich 	0,4...20,0 m/s -40...+350 °C	Flügelrad NiCr-Ni	±2,5 % v. Endwert	560 mm	25 mm
25) Schalenanemometer (ohne Abbildung)	0,5...35 m/s		±0,3 ms ±5 % v.Mw.		
26) Flügelrad Ø 60 mm zur Messung am Kanalaustritt, mit ausziehbarem Teleskop, Einsatzbereich -20...+60 °C 	0,25...20,0 m/s	Flügelrad	±0,2 m/s ±2 % v. Mw.	440 bis 1100 mm	60 mm
27) Flügelrad Ø 100 mm zur Messung an Gitterauslässen, mit Handgriff (o. Abb.)	0,2...15 m/s	Flügelrad	±0,3 m/s	280 mm	100 mm

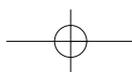
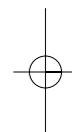
* Für steckbare Sonden wird zusätzlich ein Handgriff oder Teleskop benötigt (siehe Bestelldaten)

** Bei Kurzzeitmessungen

Therm. Strömungssonden

	Meßbereich	Sensor	Länge Sonde	Ø Spitze
28) Preisgünstige, robuste Sonde für Messungen im unteren Strömungsbereich 	0...10,00 m/s -20...+70 °C	Hitzkugel NTC	150 mm	4 mm
29) Robuste Sonde mit Teleskop für Messungen im unteren Strömungsbereich 	0...10,00 m/s -20...+70 °C	Hitzkugel NTC	190 bis 850 mm	4 mm
30) Reaktionsschnelle Sonde mit Teleskop für Messungen im unteren Strömungsbereich, mit Strömungsrichtungserkennung 	0...10,00 m/s 0...+50 °C	Hitzdraht NTC	160 bis 760 mm	

Genauigkeit Hitzkugel: ±0,05 m/s, ±2,5 % v. Mw. (0...2 m/s) ±0,5 m/s, ±5 % v. Mw. (2...10 m/s)
Temperatur-Kompensation: < 0,2% v. Mw./°C (-10...+60 °C)





Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1]
VDI 2080: Meßverfahren und Meßgeräte für Raumluftechnische Anlagen
Okt 1984
- [2]
VDI 2079: Abnahmeprüfung an Raumluftechnischen Anlagen
März 1983
- [3]
DIN 1946 Teil 2: Raumluftechnik, gesundheitstechnische Anforderungen
Jan 1994
- [4]
Glück, B: Empfindungstemperatur und ihre Meßbarkeit
GI Haustechnik, Bauphysik, Umwelttechnik 1993 Heft 3
- [5]
Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik: Handbuch der Klimameßtechnik,
Band 3
- [6]
DIN 33403, Teil 1: Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung,
April 1984.
- [7]
DIN 4796 Teil 1 und Teil 2: Leistungsmessung an Raumluftechnischen Gerä-
ten.
Entwurf September 1991
- [8]
Arbeitskreis der Dozenten für Klimatechnik: Handbuch der Klimameßtechnik,
Band 1: Grundlagen,