EIN FLUIDISCHES SYSTEM ZUR LANGZEITMESSUNG VERSCHIEDENER GRÖSSEN IN KERNTECHNISCHEN ANWENDUNGEN BEI HOHEN TEMPERATUR

(A FLUIDIC SYSTEM FOR LONGTERM MEASUREMENTS OF SEVERAL VARIABLES IN HIGH-TEMPERATURE NUCLEAR APPLICATIONS)

N. MAYER

Fachgruppe G.1: Messwesen und Regeltechnik,
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), D-1 Berlin 45, Germany

SUMMARY

The measuring principle of the described fluidic system is as follows: The massflow through a nozzle at choked flow conditions is controlled by a movable valve needle. By the use of a simple mechanical linkage the position of this needle in turn is a function of the physical property to be measured, e.g. position, strain or temperature. A second nozzle with constant cross-section is arranged within the sensor in good thermal contact to the controlled nozzle. With a paraboloidic needle shape the ratio of the massflows through the two nozzles is proportional to the measured variable. With properly matched nozzle shapes and pressure ratios it is possible to get an output signal largely unaffected by the supply pressure, the atmospheric pressure, the temperatures at all positions at the system, the fluid line resistances and the nature of the working gas.

Instead of measuring the massflows directly it is possible to arrange two additional nozzles together with the sensor nozzles in a bridge circuit analog to a Wheatstone bridge. Using a micrometer valve for one of the additional nozzles this bridge can be balanced manually. In the balanced condition the position of the valve stem is proportional to the position of the sensor needle. Automatic balancing of the bridge is easily provided by a bellows actuator and an electric position sensor gives an electric output signal for data processing. Fluidic diodes protect the bellows from overpressure conditions. At a first design step switching of up to 12 sensors to the balancing circuit is provided with a solenoid-controlled scanning device.

The sensing device of this fluidic circuit can be matched to sense position, strain, temperature and other variables. Some details about the construction of the sensors are given.

The paper includes preliminary details on the behaviour of the whole measuring system at room temperature and for some measurements at temperatures up to 400°C. First application results for the measurement of strain in PCPV-models at high temperatures are presented. For some applications this system may be better qualified than electric measuring systems due to the high inherent stability of the sensor against high temperatures and high nuclear radiation levels.

1. Einführung

Fluidische Meßgeräte mit dem Düse-Prallplatte-System werden seit ca. 30 Jahren in der Industrie zu Präzisionslängenmessungen benutzt, und seit dem Anfang der 60iger Jahre gibt es auch eingehendere Untersuchungen zum Einsatz ähnlicher Verfahren in der Kerntechnik [1]. Inzwischen sind Geräte entwickelt worden zur Untersuchung der Längenänderungen von Brennstoffelementen und zur Bestimmung von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen an Werkstoffproben direkt im Reaktorkern [2, 3]. Übereinstimmend wird festgestellt, daß unter den dort herrschenden Bedingungen (Temperaturen bis 800 °C, Neutronenfluß bis zu $3 \cdot 10^{17} m^{-2} s^{-1}$, Strahlungsheizleistung in Stahl bis zu $3\ W \cdot g^{-1}$ [2]) fluidische Meßverfahren am besten geeignet seien, da die verwendbaren Werkstoffe und Gase unter diesen Bedingungen weitgehend konstante Eigenschaften besitzen. Jedoch ist der Schaltungsaufwand bei diesen Systemen z.T. beträchtlich, da ein Aufnehmer 5 Leitungen benötigt. Dies wirkt sich bei den beschriebenen Anwendungen jedoch kaum störend aus.

Das Ziel einer anderen Entwicklungsrichtung [4] ist es, kleine Aufnehmer auch in größerer Zahl zur Oberflächen-Dehnungsmessung bei hohen Temperaturen zu benutzen. Die entwickelten Aufnehmer haben nur zwei Zuleitungen von 1,5 mm Innendurchmesser aus rostfreiem Stahl. Für Innendehnungsmessungen sind sie jedoch nicht geeignet, da das Arbeitsgas am Meßort in die Atmosphäre abströmt. Anpasser zur automatischen Meßdatenerfassung existieren noch nicht.

Das Ziel der hier beschriebenen Entwicklung ist ein fluidisches Meßsystem, das die zuverlässige Messung verschiedener physikalischer Größen auch bei hohen Temperaturen, intensiver Kernstrahlung und über längere Zeiträume gestattet, hermetisch gekapselt ist und eine automatische Meßdatenerfassung ermöglicht. Vorerst ist hier insbesondere an die Überwachung von Reaktordruckbehältern gedacht. Da sich bei anderen Untersuchungen ergeben hat, daß fluidische Systeme eine sehr gute Langzeitstabilität bei hohen Temperaturen besitzen können [1], wird erwartet, daß diese Systeme bei entsprechenden Anwendungen bessere Ergebnisse liefern als die z. Zt. verfügbaren elektrischen Meßsysteme.

2. Prinzipieller Aufbau des Meßsystems (s. Bild 1)

Der Aufnehmer 3 wird über eine Leitung mit einem Gas vom Versorgungsdruck p_V versorgt. Das Gas strömt parallel durch die Düsen 1 und 2 ab, von denen Düse 1 durch die Meßgröße über eine Ventilnadel 4 gesteuert werden kann. Die beiden aus dem Aufnehmer durch Abflußleitungen abströmenden Massenflüsse werden gemessen. Hierbei ist das eigentliche Meßsignal in $\dot{m}_M$ enthalten; der Massenfluß $\dot{m}_M$ dient zur Störgrößenkompensation. Die Strömungsbedingungen an den Aufnehmerdüsen werden so gewählt, daß das Gas mit Schallgeschwindigkeit durch die Düsen strömt. Hierdurch wird erreicht, daß stromab auftretende Störungen wie Luftdruckschwankungen und Änderungen der Leitungswiderstände R_M, R_0 und R_V sich nicht auswirken können.

3. Theoretische Grundlagen

3.1 Der kritische Massenfluß durch eine Düse

Der Massenfluß durch eine Düse hängt bei kleinen Druckdifferenzen von den Drücken vor

und hinter der Düse (p_V und p_A) ab, s. Bild 2. Wird jedoch bei konstantem Versorgungsdruck p_V der Druck p_A hinter der Düse soweit verringert, daß in der Düse die Schallgeschwindigkeit erreicht wird (bei Luft für $p_A/p_V = 0{,}53$), so ändert eine weitere Verminderung von p_A den Massenfluß theoretisch nicht mehr. Für Luft gilt dann die Beziehung:

$$\dot{m} = 0{,}685 \cdot C \cdot \frac{F \cdot p_V}{\sqrt{R_L \cdot T_V}} \qquad (1)$$

Hierbei bedeuten R_L die Gaskonstante für Luft und T_V die Temperatur der Luft vor der Düse. Die Ausflußzahl C ist ein Korrekturfaktor, der wesentlich von der Düsengeometrie abhängt, für eine günstige Form derselben aber unabhängig von p_A/p_V und etwa gleich 1 ist.

3.2 Das direkte Meßverfahren mit einer Vergleichsdüse (s. Bild 1)

Wie aus Gl. (1) zu erkennen ist, ist der durch die Meßdüse 1 fließende Massenfluß $\dot{m}_M$ zusätzlich zum Meßsignal durch folgende Störgrößen moduliert: Gasart, Versorgungsdruck und Temperatur. Der Massenfluß durch eine parallel zur Meßdüse durchströmte Festdüse, die sich auf gleicher Temperatur befindet, enthält jedoch die gleichen Einflüsse, so daß der Quotient $\dot{m}_M/\dot{m}_0 = C_M \cdot F_M / C_0 \cdot F_0$ nur noch die Ausflußzahlen C_M und C_0 und die Temperaturabhängigkeiten

$$F_M = F_{M0} \cdot [1 + \alpha_M (T_V - T_0)]^2$$

und

$$F_0 = F_{00} \, [1 + \alpha_0 (T_V - T_0)]^2 \qquad (2)$$

der beiden Düsenquerschnitte enthält. F_{M0} und F_{00} sind die Querschnitte bei einer Bezugstemperatur (z.B. 20 °C). Für gleiche lineare Wärmeausdehnungskoeffizienten α_M und α_0 der die beiden Düsen begrenzenden Werkstoffe folgt

$$\dot{m}_M/\dot{m}_0 = C_M \cdot F_{M0} / C_0 \cdot F_{00} \approx F_{M0}/F_{00} = q \; . \qquad (3)$$

Mit einer paraboloidisch geformten Ventilnadel ($F = F_1 + \hat{F} \cdot s$) erhält man schließlich die lineare Beziehung

$$q = q_0 + k \cdot s \; , \qquad (4)$$

wobei die Größen q_0 und k von Speisedruck, Atmosphärendruck, Temperatur, Gasart und Leitungswiderständen weitgehend unabhängig sind.

Die verbleibende Schwierigkeit besteht darin, den Quotienten q der beiden Massenflüsse mit ausreichender Genauigkeit zu ermitteln. Bei nicht zu hohen Anforderungen an die Genauigkeit lassen sich dazu die bekannten Schwebekörper-Durchflußmesser benutzen.

3.3 Das Kompensationsmeßverfahren

Anstelle der Möglichkeit, beide Massenflüsse getrennt zu messen und dann den Quotienten q zu bilden, wurde ein Kompensations-Meßverfahren verwendet, wie es Bild 3 darstellt. Die beiden Aufnehmerdüsen 1 und 2 sind hierbei durch zwei weitere Düsen 1' und 2' zu einer Brückenschaltung analog der elektrischen Wheatstone-Brücke ergänzt. Zum Abgleich wird die Ventilnadel 4' soweit verschoben, bis das Differenzdruckmanometer 5 $\Delta p = 0$ anzeigt. Bei kritischem Druckabfall an allen Düsen gilt dann die Beziehung Gl. (3) sowohl

für den Aufnehmer 3 als auch für den Kompensator 6:

$$q = \dot{m}_M/\dot{m}_0 = C_M \cdot F_{M0}/C_0 \cdot F_{00} = C'_M \cdot F'_M/C'_0 \cdot F'_{00} \qquad (5)$$

Bei geeigneter Formgebung der Düsen ist es gerechtfertigt, $C_M \cdot C'_0/C'_M \cdot C_0 = 1$ zu setzen. Dann ist:

$$F_{M0} = (F_{00}/F'_{00}) \cdot F'_{M0} \; . \qquad (6)$$

Da der Quotient F_{00}/F'_{00} eine Konstante ist, bedeutet diese Beziehung, daß im abgeglichenen Zustand der Meßbrücke der Querschnitt F'_{M0} der Kompensatordüse 4' dem Querschnitt F_{M0} der Aufnehmer-Meßdüse 4 proportional ist. Dann ist auch s' proportional zu s. Dies gilt übrigens auch für konische Ventilnadeln, wie sich mit einer einfachen Rechnung zeigen läßt [5]. Dies bedeutet eine Vereinfachung in der Herstellung der Ventilnadeln. Hierzu muß jedoch das Verhältnis der Düsendurchmesser für den Aufnehmer und den Kompensator gleich sein ($d_M/d_0 = d'_M/d'_0$).

Die Beziehung zwischen s und s' ist weitgehend unbeeinflußt von folgenden Parametern: Versorgungsdruck, Atmosphärendruck, Gasart, Leitungswiderstände und den Temperaturen an allen Stellen des Meßsystems.

Die Vorteile der Kompensationsmethode gegenüber der oben beschriebenen direkten Meßmethode sind folgende:

1. Bessere Auflösung.
2. Einfachere Handhabung.
3. Kleinerer Meßfehler.
4. Mit einem elektrischen Wegaufnehmer läßt sich leicht ein elektrisches Ausgangssignal erhalten.
5. Kleine und robuste Ausführung des Meßgerätes.
6. Auch mit konischen Ventilnadeln ergeben sich lineare Beziehungen.

Nachteile sind:

1. Ein komplizierterer Aufbau des Meßsystems.
2. Ein höherer Versorgungsdruck ist erforderlich.
3. Größerer Hilfsenergieverbrauch bei gleichen Düsenabmessungen.

Aufgrund der überwiegenden Vorteile steht das Kompensationsverfahren z. Zt. im Vordergrund der Untersuchungen; das direkte Verfahren wird jedoch weiter im Auge behalten.

4. Aufbau der Systemkomponenten

4.1 Die Aufnehmer

Prinzipiell lassen sich Aufnehmer für alle Meßgrößen aufbauen, die sich in einen Weg bzw. eine Längenänderung umwandeln lassen. Bild 4 zeigt schematisch Möglichkeiten zur Weg-, Dehnungs- und Temperaturmessung.

Der Wegaufnehmer ist mit einem Metallbalg 2 hermetisch abgedichtet. Zum Schutz vor Ver-

schmutzungen aus der Zuleitung dient ein Filter 1. Der Dehnungsaufnehmer ist zur Einbettung in Beton gedacht. Das Rohr 4 wird durch die im Beton verankerten Flansche 5 gezwungen, die Bewegungen des Betons mitzumachen. Die im Innern geführte Stange 3 bleibt dagegen in ihrer Länge konstant, so daß die Nadel sich in der Düse um $s = \varepsilon \cdot L$ verschiebt. Soll die thermische Dehnung des Betons kompensiert werden, so muß die Stange den gleichen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten haben wie der Beton. Das Prinzip des Temperatur-Aufnehmers ist ähnlich, nur daß hier die Verschiebung s durch eine Bimetallanordnung 6 erzeugt wird. Das Außenrohr 7 dient zum Schutz und zur Abdichtung.

Um den Verbrauch der Aufnehmer niedrig zu halten, sollten die Düsen möglichst klein sein. Dies bedingt jedoch Fertigungsschwierigkeiten und eine größere Verschmutzungsgefahr der Düsen. Die derzeit benutzten Aufnehmer haben eine Meßdüse von 0,5 mm Durchmesser und eine Festdüse von 0,2 mm Durchmesser. Den konstruktiven Aufbau eines Dehnungsaufnehmers zeigt Bild 5.

Wichtig ist eine präzise Fertigung der Ventilnadel 3 und eine gute Führung der Nadel kurz vor der Düse. Bei den ersten Modellen wurde eine Federführung der Nadel gewählt, bei den späteren Typen Uhrensteine 5. Der Kegelwinkel der Nadel bestimmt den Meßbereich. Bei 10 Grad beträgt der Meßbereich ca. 0,3 mm. Die Nadel schließt an einen Zylinder von 0,48 mm Durchmesser an, der in die Düse noch eintauchen kann. Dadurch wird verhindert, daß Kegel und Düse bei einer Überschreitung des Meßbereichs beschädigt werden. Zum Schutz vor Schmutzteilchen aus der Zuleitung wurde ein Filter 4 aus einem Edelstahl-Tressengewebe (absolute Feinheit 10 µm) mit eingebaut. Zu Eichzwecken kann der Aufnehmer an dem Ende geöffnet werden, der dem Düsenblock gegenüberliegt, und dicht mit einer Eichvorrichtung verbunden werden. Es wurde Wert darauf gelegt, die Aufnehmer nach Testversuchen zu Untersuchungen zerlegen zu können. Deswegen wurden viele Schraubverbindungen benutzt.

4.2 Der Kompensator

Das Schaltbild eines automatischen Kompensators zeigt Bild 6. Es wird die oben beschriebene Wheatstonesche Brückenschaltung benutzt. Eine Kraftwaage mit Metallbälgen kleiner Steifigkeit bewegt sich unter dem Einfluß eines Differenzdruckes in der Brückendiagonalen in der Weise, daß eine am Waagebalken befestigte Ventilnadel die Abgleichdüse selbsttätig abgleicht (P-Regler). Die Auslenkung des Waagebalkens wird mit Hilfe eines elektrischen Wegaufnehmers W in eine Spannung umgeformt, die von einem Digitalvoltmeter DVM mit BCD-Ausgang e angezeigt wird. Die Filter F schützen die Düsen vor Verschmutzungen aus den Zuleitungen, die Rückschlagventile D_1, D_2 und D_3 (Dioden) dienen zum Schutz der Kraftwaage vor zu großen Differenz- und Absolutdrücken bei unvorhergesehenen Betriebszuständen.

Der Anzeigebereich des Digitalvoltmeters umfaßt $\pm$ 1999 Skt (mV), und bei den oben angegebenen Abmessungen der Aufnehmer-Ventilnadel beträgt die Empfindlichkeit etwa 10 Skt pro µm Nadelweg im Aufnehmer bzw. 1 Skt/µm/m für den Dehnungsaufnehmer. Die Abmessungen (b x h x t) eines Kompensator-Prototyps sind 300 x 150 x 200 mm^3; er wiegt 10 kg.

Die Verbindungsleitungen bis zu den Aufnehmerleitungen bestehen aus Kunststoffrohr 6 x 1 mm; hierzu sind auch Mehrfachleitungen im Handel erhältlich.

4.3 Versorgung mit Hilfsenergie

Zur Versorgung des Meßsystems wird ölfreie Druckluft benötigt. Der Versorgungsdruck richtet sich nach der Meßmethode. Beim direkten Verfahren mit einer Vergleichsdüse reichen ca. 3 bar (absolut) aus, um kritische Bedingungen an den Aufnehmerdüse zu gewährleisten. Beim Kompensationsverfahren hat der zusätzlich an den Kompensatordüsen benötigte Druckabfall zur Folge, daß bei Raumtemperatur ca. 6 bar benötigt werden, bei Temperaturen bis zu 400 °C jedoch etwa 10 bar, um auch dann mit etwa gleichen Bedingungen an den Kompensatordüsen arbeiten zu können. Dementsprechend ist auch der Verbrauch beim Kompensationsverfahren etwa doppelt so groß wie beim direkten Verfahren, nämlich etwa 150 mg/s (entsprechend etwa 125 cm^3/s bei Normalbedingungen).

Bei nicht zu häufigen Messungen ist eine Druckluftflasche zur Versorgung gut geeignet. Eine 50 l-Flasche reicht für mindestens 2000 Messungen. Um auch geringe Korrosionen zu vermeiden, ließe sich auch z. B. Helium verwenden. Zu einem späteren Zeitpunkt soll evtl. auch die Versorgung mit Hilfe eines kleinen Rotationsverdichters in einem geschlossenen Kreislauf untersucht werden.

5. Experimentelle Ergebnisse

Im folgenden wird ein nur knapper Überblick über einige wesentliche Eigenschaften des beschriebenen Meßsystems gegeben. Bild 7 zeigt als Beispiel die Kennlinien eines Wegaufnehmers und eines Temperatur-Aufnehmers. Die relativ großen Nichtlinearitäten sind auf Störungen in der Oberfläche der Ventilnadeln zurückzuführen. Diese wurden für eine bestimmte Anwendung zur besseren Temperaturkompensation aus Zirkonium gefertigt, bei dem die Herstellung einer guten Oberfläche bei diesen kleinen Abmessungen sehr schwierig ist. Mit anderen Werkstoffen lassen sich leicht Nadeln mit Nichtlinearitäten unter ± 0,5 % herstellen.

Weitere Untersuchungen zeigten, daß entgegen den theoretischen Überlegungen doch noch z. T. durchaus störende Einflüsse durch Schwankungen der Temperatur und des Versorgungsdruckes bestehen. Dies läßt sich auf Änderungen in den Ausflußzahlen der Düsen zurückführen. Deswegen wurde begonnen, - mit Hilfe eingehender Untersuchungen die Düsengeometrie zu optimieren [6]. Endgültige Ergebnisse hierzu liegen noch nicht vor, jedoch konnten die Einflüsse schon soweit verringert werden, daß sie in vielen Fällen vernachlässigt werden können.

Ein Ergebnis von Driftuntersuchungen bei 350 °C ist in Bild 8 dargestellt. Während der Temperaturaufnehmer, vermutlich wegen Korrosion eines Baustahlteiles, auch nach einem Monat noch langsam driftet, scheint sich die Anzeige des Dehnungsaufnehmers nach ca. 14 Tagen nur noch um weniger als 10 µm/m pro Monat zu ändern. Die im wesentlichen konstante Anzeige der Vergleichsmeßstelle (Düsenblock bei Raumtemperatur) zeigt die gute Stabilität des Kompensators und die gute Reproduzierbarkeit der Messungen. Ergebnisse von Driftuntersuchungen bei höheren Temperaturen können leider noch nicht mitgeteilt werden, es gibt jedoch viele Hinweise dafür, daß auch bei Temperaturen bis über 500 °C mit nur geringfügig anderen Ergebnissen zu rechnen ist, wenn entsprechend stabile Werkstoffe benutzt werden.

6. Vielstellenmessung

Es wurde ein Meßstellenumschalter entwickelt, der in einer ersten Ausbaustufe bis zu 12 fluidische Aufnehmer nacheinander mit dem Kompensator verbinden kann. Dabei handelt es sich im Prinzip um ein käufliches Drehschieberventil mit drei Schaltebenen und jeweils 12 Anschlüssen, das mit einem elektromagnetischen Schrittschaltwerk angetrieben wird. Aufgrund der relativ großen Zeitkonstanten des fluidischen Systems beträgt die Meßzeit pro Meßstelle ca. 10 bis 20 Sekunden. Diese Zeiten werden durch eine elektrische Steuereinheit vorgegeben, die auch den Startbefehl gibt, den Umschalter am Ende eines Durchlaufs stoppt und die Druckbefehle an einen Meßwertdrucker gibt, der vom BCD-Ausgang des Kompensators angesteuert wird. Mit Hilfe einer Schaltuhr kann die Meßanlage zu vorgegebenen Zeiten gestartet und nach dem Messen abgeschaltet werden.

7. Bisherige Anwendungen und Schlußbemerkungen

Die bisher vorliegenden Ergebnisse lassen erkennen, daß das beschriebene fluidische Meßsystem bei Temperaturen bis 350 °C eine mindestens ebenso gute Langzeitstabilität besitzt wie Meßsysteme mit den am besten geeigneten Dehnungsmeßstreifen-Aufnehmern. Auflösung und Reproduzierbarkeit sind vergleichbar. Bei Temperaturen über 400 °C wird mit besseren Ergebnissen gerechnet. Zwei Dehnungsaufnehmer der beschriebenen Art, die vor zwei Jahren in einen Versuchsbehälter aus Spannbeton eingebaut wurden, arbeiten z. Zt. noch einwandfrei, während alle im gleichen Bereich eingebauten Dehnungsmeßstreifen-Aufnehmer aus bisher noch ungeklärten Gründen bereits bei ca. 120 °C ausfielen.

In einen ähnlichen Behälter sind vor einem Jahr Aufnehmer gemäß Bild 5 eingebaut worden. Die Ventilnadel und die Stange bestehen hierbei aus Zirkonium, das etwa den gleichen linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten hat wie der verwendete Isolierbeton. Hierzu liegen Ergebnisse noch nicht vor.

Die Entwicklung wird weitergeführt mit dem Ziel, die einzelnen Komponenten zu vervollkommnen, ihre Eigenschaften umfassend zu untersuchen und in intensiven Tests ihre Zuverlässigkeit zu erproben.

Den Herren Wulkau und Specht sei für sorgfältige mechanische Arbeiten und Versuchsdurchführungen gedankt.

Die Arbeiten werden durch Mittel des Bundesministers für Forschung und Technologie innerhalb des Grundsatzprogrammes der Deutschen Forschung und Entwicklung für Spannbeton-Reaktordruckbehälter gefördert.

Literatur:

[1] PEFHANY, J.: "Pneumatic Gauges for In-pile Measurements", Nuclear Engineering 6 (1961) S. 77 - 79

[2] FIDLERIS, V., I. R. EMMERTON and R. D. DELANEY: "An In-reactor Creep Machine for High Flux Applications", Journal of Physics, Scientific Instruments 5 (1972) S. 442 - 444

[3] CATLING, E., F. G. WALLACE and A. INGERSOLL: "The Development of Tensile Creep Irradiation Equipment", Intern. Symp. on "In-pile Irradiation Equipment and Techniques", Harwell 1966, Paper 0.3

[4] HICKSON, V. M.: "Gas Strain Gauges and Their Circuitry", Royal Aircraft Establishment, Techn. Rept. No. 72006, 1972

[5] MAYER, N. und U. FLESCH, in: Bericht über die Arbeiten zum Forschungsvorhaben "Spannbeton-Reaktorbehälter-Instrumentierung" vom 1.1.1971 bis zum 30.6.1971, interner Bericht der Bundesanstalt für Materialprüfung, 1971

[6] MAYER, N. and U. FLESCH: "A Fluidic Strain Measuring System for Prestressed Concrete Reactor Pressure Vessels", Proc. 5th Cranfield Fluidics Conference, Uppsala 1972, Paper A 1

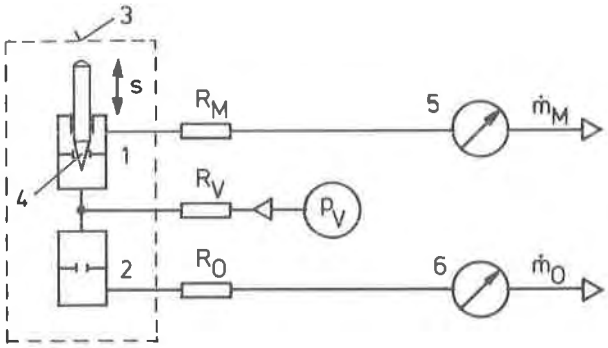


Bild 1: Grundprinzip des Meßsystems

1 Meßdüse 3 Aufnehmer 5,6 Durchflußmesser
2 Festdüse 4 Ventilnadel

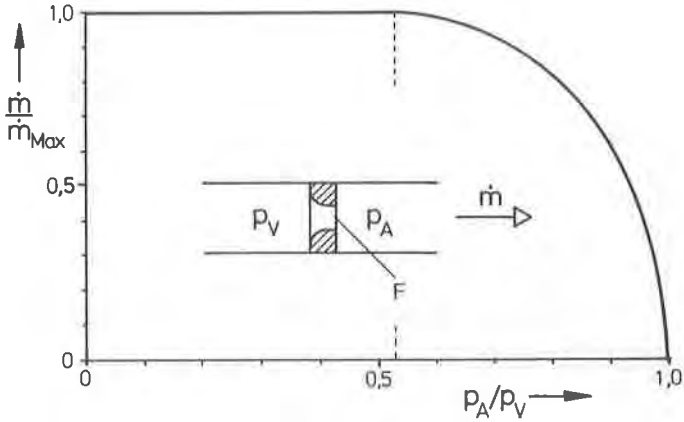


Bild 2: Massenfluß durch eine Düse

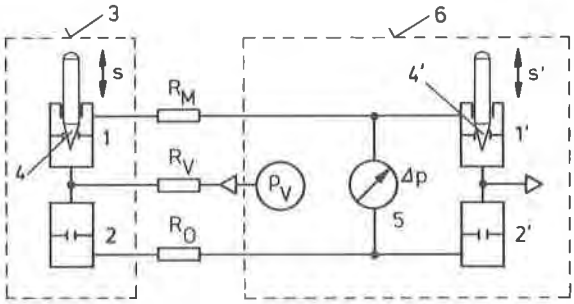
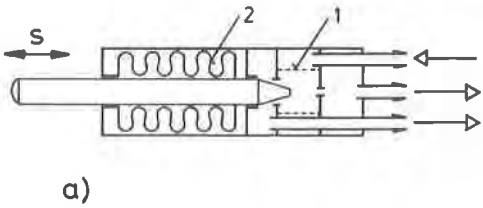
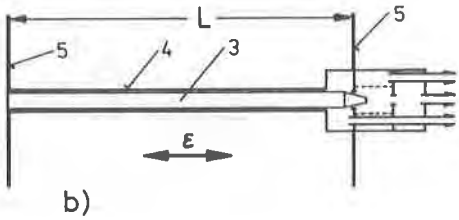


Bild 3: Kompensations-Meßverfahren

1' Abgleichdüse 4' Ventilnadel 6 Kompensator
2' Festdüse 5 Differenzdruckmesser
sonstige Bezeichnungen wie Bild 1





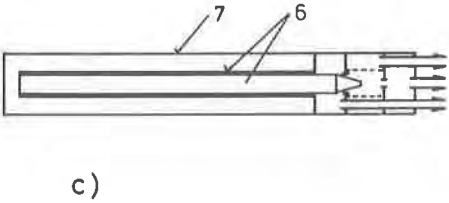


Bild 4: Aufbau der Aufnehmer, schematisch

a) Weg-Aufnehmer
b) Dehnungs-Aufnehmer
c) Temperatur-Aufnehmer

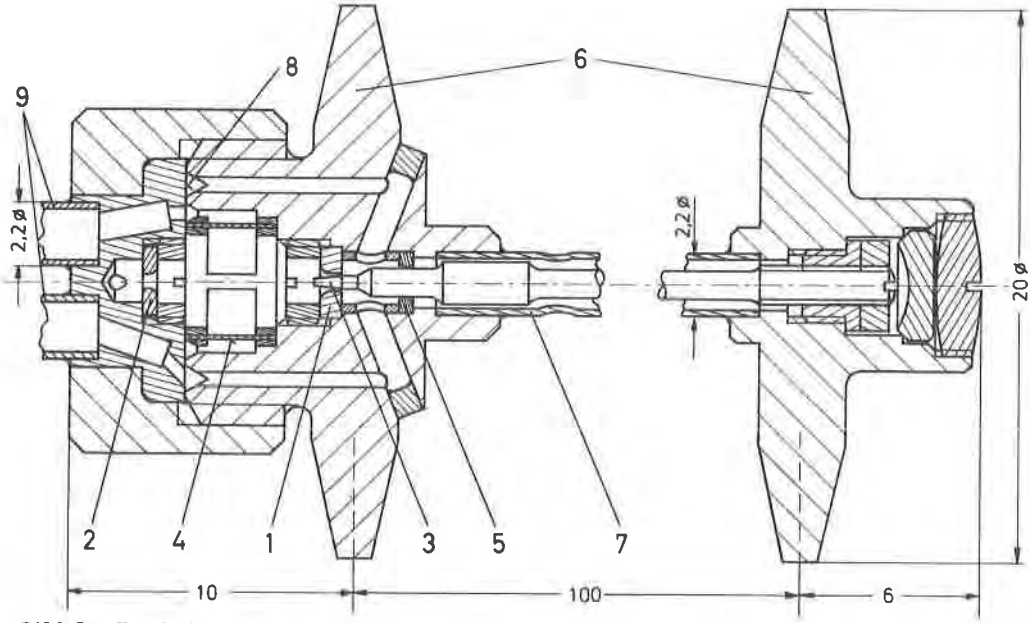


Bild 5: Konstruktion eines Dehnungs-Aufnehmers

1 Meßdüse
2 Festdüse
3 Ventilnadel
4 Filter
5 Uhrstein
6 Flansche
7 Verbindungsrohr
8 geläppte Dichtfläche
9 Leitungen

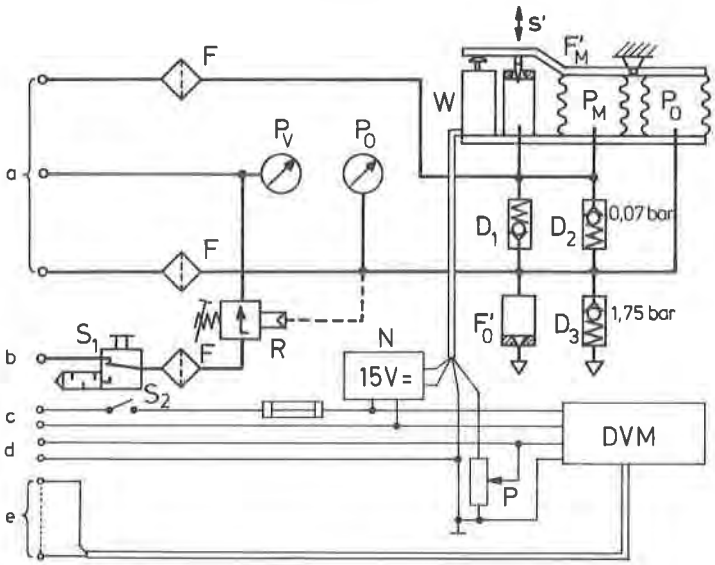


Bild 6: Schaltbild eines automatischen Kompensators

F Filter
R Druckregler
N Netzgerät
W elektr. Wegaufnehmer
DVM Digitalvoltmeter
$D_{1..3}$ Rückschlagventile

a Aufnehmeranschluß
b fluid. Netzanschluß
c elektr. Netzanschluß
d elektr. Analogausgang
e elektr. BCD-Ausgang

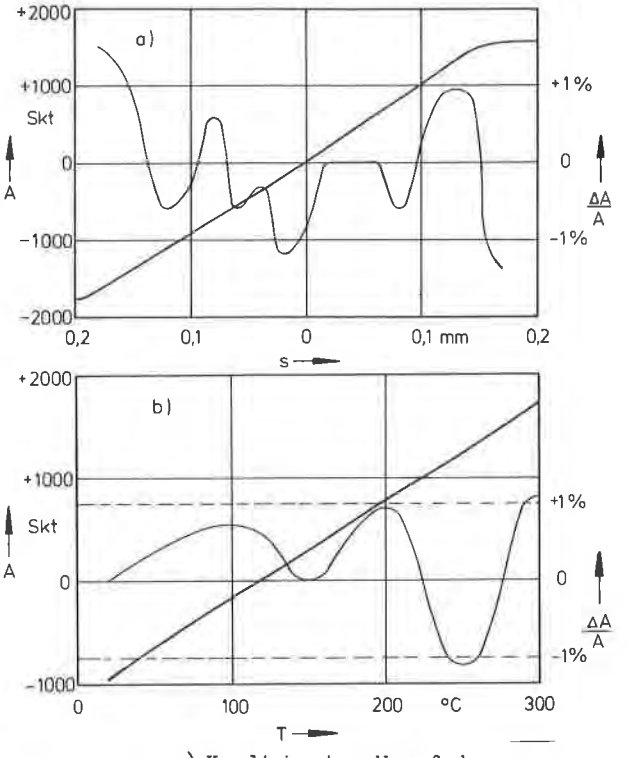


Bild 7: Aufnehmer-Kennlinien

a) Kennlinie eines Wegaufnehmers
b) Kennlinie eines Temperatur-Aufnehmers

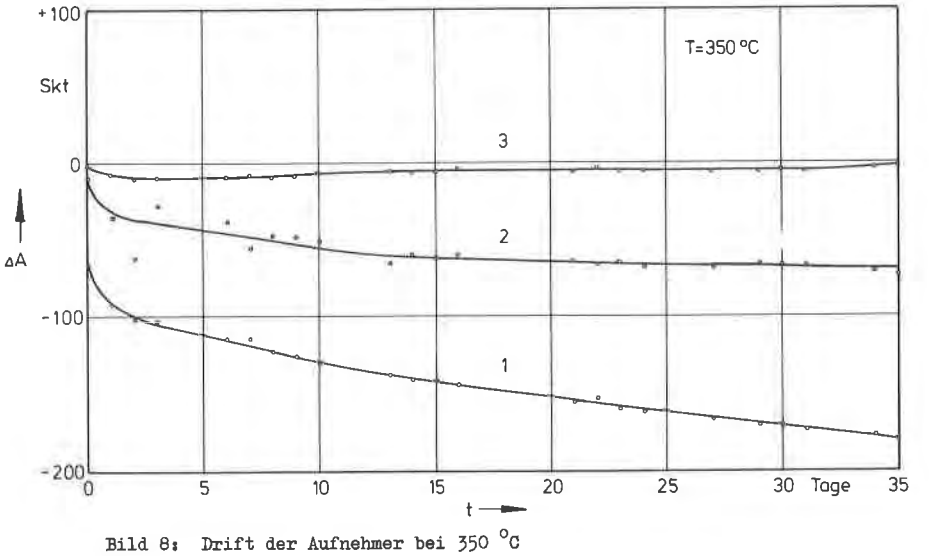


Bild 8: Drift der Aufnehmer bei 350 °C

1 Temperatur-Aufnehmer (9,3 Skt/K)
2 Dehnungs-Aufnehmer (9,6 Skt/µm bzw. 0,96 Skt/µm/m)
3 Vergleichsmeßstelle (zwei Festdüsen bei Raumtemperatur)