

4. Thermische Strömungsmessung

Thermische Strömungsmeßverfahren nutzen den Wärmetransport in einer Strömung zur Geschwindigkeitsmessung. Seit vielen Jahren ist die Hitzdraht- und Heißfilmanemometrie bekannt. Grundlegende Arbeiten zur Wärmeableitung von einem langen dünnen Heizdraht wurden schon 1914 von *L. V. King* [4.1] publiziert. Nach einer Bibliographie von *Freymuth* [4.2] erschienen im Zeitabschnitt bis 1945 die Pionierarbeiten zur thermischen **Anemometrie** mit 5 bis 10 Veröffentlichungen pro Jahr. Das Verfahren erwies sich als besonders geeignet zur Messung dynamischer Strömungsvorgänge, so daß sich seine Anwendung in der Turbulenzforschung rasch verbreitete. Das kommt in der Publikationstätigkeit nach 1945 zum Ausdruck. Bis Anfang der 70er Jahre stieg die Zahl der Veröffentlichungen auf ungefähr 100 pro Jahr. Mit der Entwicklung der hochauflösenden Laser-Doppler-Anemometrie [4.3] entstand ein konkurrierendes Meßverfahren, das zwar aufwendiger ist, jedoch einen sehr großen Dynamikbereich hat, die Strömung berührungsfrei abtastet und keine Kalibrierung braucht. Damit wurde die dominierende Stellung der thermischen **Anemometrie** in der Turbulenzforschung eingeschränkt, die Zahl der wissenschaftlichen Beiträge verringerte sich bis Anfang der 80er Jahre auf ungefähr 50 pro Jahr.

Mit der Entwicklung neuer Sondentypen, ihrer Miniaturisierung sowie der Verbesserung der Signalverarbeitung haben jedoch **thermische** Verfahren ihren Platz in der Strömungsmeßtechnik behauptet.

Einführende und zusammenfassende Darstellungen sind in [4.4] [4.5] [4.6] [4.7] gegeben.

4.1. Physikalische Grundlagen

Das Meßprinzip beruht auf dem Wärmetransport von einem elektrisch erwärmten Körper in das umgebende Medium in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zwischen beiden.

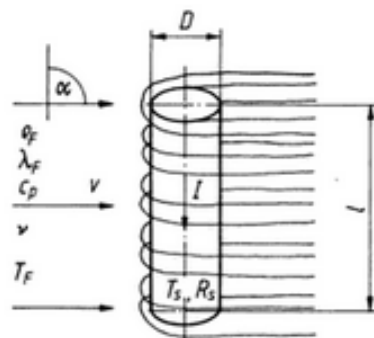


Bild 4.1. Wärmeableitung von zylindrischer Sonde durch Strömung

Bild 4.1 zeigt die Wärmeableitung von einer stromdurchflossenen zylindrischen Sonde, deren Achse senkrecht zur Strömungsrichtung steht. Bei nicht zu kleiner Strömungsgeschwindigkeit herrscht die erzwungene Konvektion vor, so daß die Wärmeabgabe bei stationärer und quasistationärer Betrachtung durch folgende Kennzahlen beschrieben wird:

• Nusselt-Zahl

$$Nu = \alpha \cdot D / \lambda_F \quad (4.1)$$

mit der Wärmeübergangszahl

$$\alpha = q / (T_S - T_F) \quad (4.2)$$

q Wärmemenge je Flächen- und Zeiteinheit

T_S Temperatur der Sonde

T_F Temperatur des Fluids

$$q = \dot{I} \cdot R_S / (\pi \cdot D \cdot l) \quad (4.3)$$

$\dot{I}$ Sondenstrom

R_S Widerstand der Sonde bei der Temperatur T_S

D Durchmesser der Sonde

l Länge der Sonde

λ_F Wärmeleitfähigkeit des Fluids.

Aus den Gln. (4.2) und (4.3) ergibt sich die Wärmemenge, die je Zeiteinheit von der Sonde an das Medium abgegeben wird zu

$$\dot{I}^2 \cdot R_S = Nu \cdot \pi \cdot \lambda_F \cdot l \cdot (T_S - T_F). \quad (4.4)$$

Randverluste an den Halterungen des Sondenzyllinders sind hier vernachlässigt. Sie müssen berücksichtigt werden, wenn das Verhältnis $l/D < 100$ ist.

• Prandtl-Zahl

$$Pr = c_p \cdot \eta / \lambda_F \quad (4.5)$$

c_p spezifische Wärme bei konstantem Druck

η dynamische Zähigkeit

• Reynolds-Zahl

$$Re = v \cdot D / \nu \quad (4.6)$$

v Strömungsgeschwindigkeit

ν kinematische Zähigkeit $\nu = \eta / \rho_F$

ρ_F Dichte des Fluids.

Im Grenzfall inkompressibler Strömungen verschwindet die Mach-Zahl, so daß die Nusselt-Zahl nur eine Funktion der Prandtl-Zahl und der Reynolds-Zahl ist. Mit experimentell bestimmten Konstanten für den unendlich langen Zylinder wird nach [4.8]

$$Nu \approx 0,42 \cdot Pr^{0,2} + 0,57 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,5}. \quad (4.7)$$

Aus Gl. (4.4) folgt mit $R_S \approx \text{const}$ und einem Ansatz für die Wärmeübertragung vom Zylinder in das Fluid die Kingsche Beziehung

$$\dot{I}^2 \cdot R_S = l \cdot (T_S - T_F) \cdot [\lambda_F + (2\pi \cdot D \cdot \lambda_F \cdot \rho_F \cdot c_p \cdot v)^{0,5}] \quad (4.8)$$

$$\dot{I}^2 \cdot R_S = (T_S - T_F) \cdot (A + B \cdot v^{0,5}). \quad (4.9)$$

Der Vergleich von Gl. (4.9) mit Gl. (4.8) zeigt, daß die Konstanten A und B von den physikalischen Eigenschaften des Fluids abhängig sind und sich z. B. mit der Temperatur ändern. Das gilt auch für die in Gl. (4.4) angegebene Nusselt-Zahl, die sich mit Gl. (4.7) den experimentellen Werten anpaßt.

Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten ändern sich die Konstanten A und B mit der Geschwindigkeit. Die Größe der Änderung ist vom Aufbau der Sonde, von der Lage des Son-

denzylinders im Raum und von der Heiztemperatur abhängig. Die Abweichungen sind auf die Eigenkonvektion am erwärmten Sondenkörper zurückzuführen (**Bild 4.2**), die bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurde.

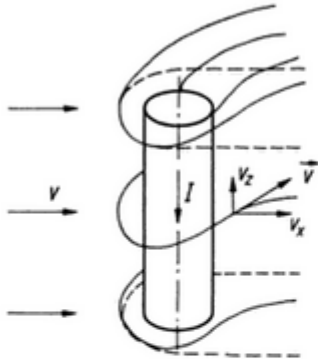


Bild 4.2. Wärmeableitung bei geringer Strömungsgeschwindigkeit und merklicher Eigenkonvektion

4.2. Meßsonden

4.2.1. Hitzdrahtsonden

Eine Hitzdrahtsonde besteht aus einem elektrisch erwärmten Draht, der zwischen zwei Haltespitzen aufgespannt ist. Der Draht ist auf die Spitze aufgeschweißt oder hartaufgelötet. Die stromführenden Haltespitzen sind in einen Keramikkörper eingelassen (**Bild 4.3**). Da der Drahtwiderstand R_s zur Gewinnung der Meßgröße dient, wird solches Drahtmaterial gewählt, das einen hohen Temperaturkoeffizienten α hat und bei der Heiztemperatur möglichst korrosionsbeständig und mechanisch stabil ist.

$$R_s = R_0 [1 + \alpha (T_s - T_0)] \quad (4.10)$$

R_0 Widerstand des Drahtes bei der Temperatur T_0 .

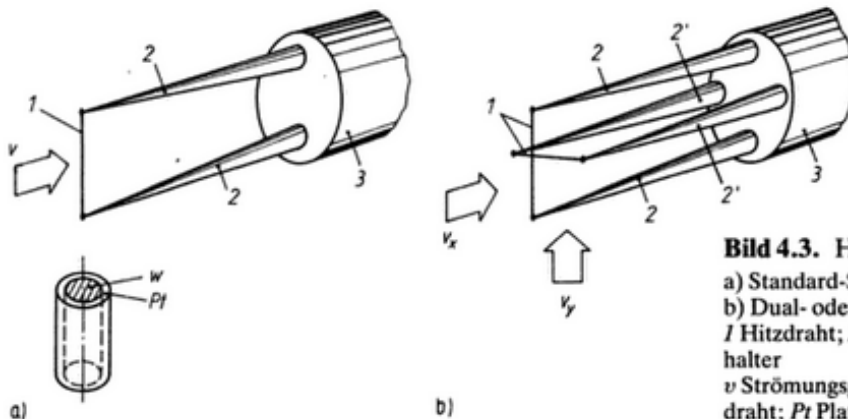


Bild 4.3. Hitzdrahtsonden

a) Standard-Sonde mit Drahtausschnitt;
b) Dual- oder -X-Sonde
1 Hitzdraht; 2, 2' Haltespitzen; 3 Keramikhalter
 v Strömungsgeschwindigkeit; W Wolframdraht; Pt Platin-Passivierungsschicht

Standard-Sonden nach Bild 4.3a haben Wolframdrähte, die mit Platin beschichtet sind. Die Platinbeschichtung verhindert die Oxidation des Wolframs und verbessert die Langzeitstabilität der Sonde. Typische Werte für Sonden in Luft sind:

Gesamtdurchmesser 5 μm

Aktive Länge des Drahtes 1 mm

Maximale Arbeitstemperatur 300 $^{\circ}\text{C}$

Geschwindigkeitsmeßbereich 0,15 ... 200 m/s.

Für höhere Arbeitstemperaturen werden Drähte aus Platin oder aus Platin-Iridium-Legierungen eingesetzt. Typische Werte für Messungen in Luft sind:

Gesamtdurchmesser 5 μm

Aktive Länge des Drahtes 1,5 mm

Maximale Arbeitstemperatur 800 $^{\circ}\text{C}$

Geschwindigkeitsmeßbereich 0,15 m/s ... 350 m/s.

Temperaturkoeffizienten des Widerstandes der verwendeten Drahtmaterialien sind

Material	Wolfram	Platin	Platin-Iridium
$\alpha \text{ K}^{-1}$	0,0042	0,003	0,0009.

Vergoldete Drahtsonden haben vergoldete Haltespitzen, Drahtbefestigungen und Drahtenden. Sie gewährleisten definierte aktive Hitzdrahtlängen.

Bild 4.3b zeigt eine Dual- oder X-Sonde mit zwei senkrecht zueinander angeordneten Hitzdrähten in jeweils getrennten Meßkreisen. Damit lassen sich zwei Strömungskomponenten v_x und v_y gleichzeitig messen und die Strömungsgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag in einem zweidimensionalen Strömungsfeld bestimmen.

4.2.2. Heißfilmsonden

Die Heißfilmsonde hat anstelle des Hitzdrahtes einen dünnen Metallfilm auf einem Quarzglassubstrat. Am häufigsten wird die Faserfilmsonde benutzt, der Filmträger ist ein zylindrisches Quarzstäbchen. Die Enden des Stäbchens sind verkupfert und vergoldet und auf Haltespitzen aufgelötet. Bild 4.4a zeigt eine Standardsonde mit einem Schnitt durch die

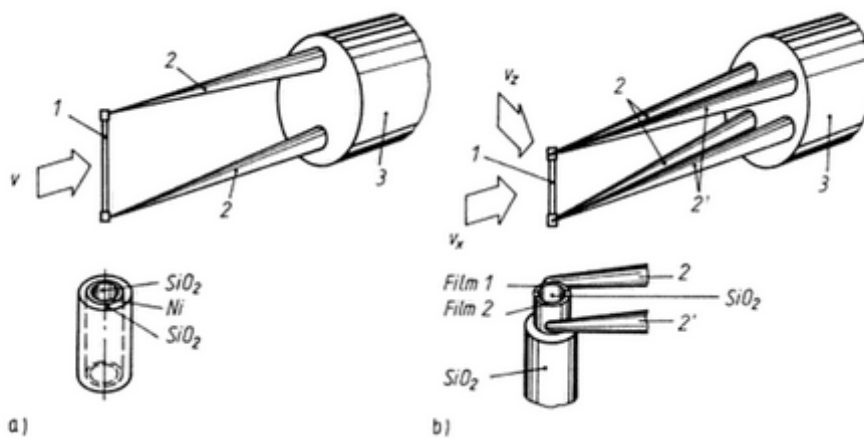


Bild 4.4. Heißfilmsonden mit Faserausschnitten

a) Standard-Sonde; b) Split-Fibersonde mit 2 halbseitigen Metallschichten
1 Filmsonde; 2, 2' Haltespitzen; 3 Keramikhalter; v Strömungsgeschwindigkeit

Faser. Auf der Faser befindet sich der Metallfilm und darüber eine SiO_2 -Schutzschicht. Als Filmmaterial wird Platin oder Nickel verwendet. Heißfilmsonden werden für Geschwindigkeitsmessungen in Gasen und Flüssigkeiten eingesetzt. Typische Werte für Messungen in Wasser sind:

Gesamtdurchmesser 50 μm

Aktive Länge des Metallfilmes 1 mm

Maximale Arbeitstemperatur (H_2O) 80 $^{\circ}\text{C}$

Geschwindigkeitsmeßbereich 0,03 ... 10 m/s.

Eine wesentliche Bedingung für einwandfreies Arbeiten der Sonde ist die Herstellung gleichmäßiger und fehlerfreier Metallschichten, die auf der Unterlage gut haften. Die Beschichtung erfolgt günstig mit Hilfe der Sputtering-Technik [4.9].

In hochproduktiven Zerstäubungsanlagen können viele Fasern gleichzeitig mit Aufwachsraten von mehr als $1 \mu\text{m}/\text{min}$ beschichtet werden [3.10]. Aufgrund der hohen kinetischen Energie der auf die Substrate auftreffenden Atome und Atomkomplexe ist eine gute Haftung der aufwachsenden Schicht gegeben. Eine Bewegung der Faser während der Beschichtung erhöht die Gleichmäßigkeit der Schicht.

Bild 4.4b zeigt eine Split-Fibersonde mit vier Haltespitzen. Die Faser ist ein Quarzstäbchen mit zwei parallelen Metallfilmen, die voneinander durch schmale Spalte längs der Mantellinie getrennt sind. Die Haltespitzen 2 kontaktieren die hintere und die Haltespitzen 2' die vordere Metallschicht. Die Sonde ist für Zwei-Komponenten-Messungen gut geeignet. Gegenüber der X-Sonde sind die räumlichen Abmessungen wesentlich geringer. Strömungsrichtungen können damit bis auf $0,5^\circ$ genau bestimmt werden [4.11].

Unter Passivierung von Heißfilmsonden versteht man den Schutz des Metallfilmes gegen Umwelteinflüsse. Dazu erhalten die Meßfühler Schutzschichten aus SiO_2 oder Al_2O_3 mit Schichtdicken von $0,5$ bis $2 \mu\text{m}$.

- SiO_2 -Passivierung, Vorteil: geringe Porosität, angewendet für Strömungsmessungen in Gasen und nichtleitenden Flüssigkeiten mit Schichtdicken $0,5 \mu\text{m}$ und in leitenden Flüssigkeiten mit Schichtdicken $2 \mu\text{m}$.
- Al_2O_3 -Passivierung, Vorteil: hohe Resistenz gegen Abtragung durch auftreffende Partikel, angewendet für Strömungsmessungen in Gasen mit Feststoffteilchen und Gas-Dampf-Gemischen.

Bild 4.5 zeigt spezielle Heißfilmsonden mit keil- und kegelförmigem Quarzsubstrat [4.12]. Der Metallfilm befindet sich an der Schneide des Keiles bzw. an der Spitze des Kegels; er ist verbunden mit Stromleitbahnen zu beiden Seiten des Trägers. Derartige Sonden eignen sich gut für Hochgeschwindigkeitsmessungen in Gasen und Flüssigkeiten. Die Kegelsonde ist gegen Verunreinigungen im Wasser weniger empfindlich als die Keilsonde.

Wandbündige Heißfilmsonden zeigt **Bild 4.6**. Die Heißfilme sind dünne Leitbahnen auf

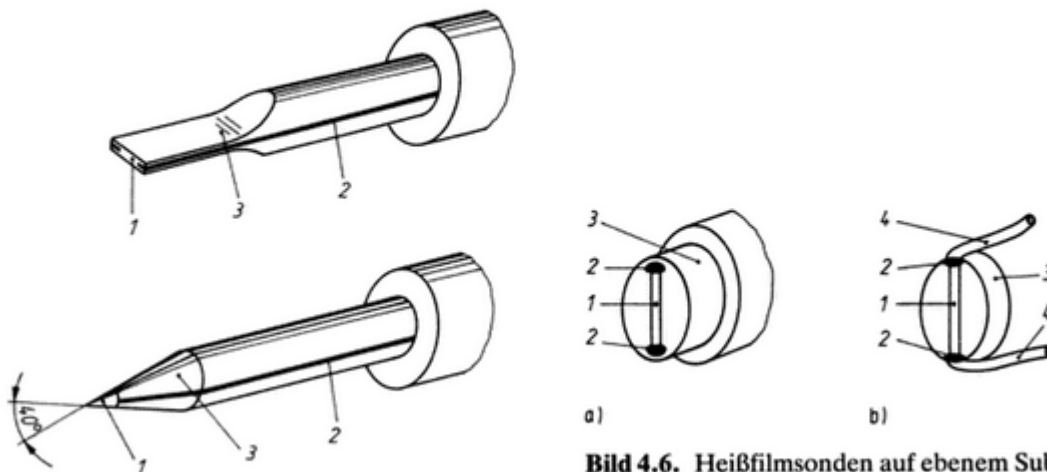


Bild 4.5. Heißfilmsonden auf keil- und kegelförmigem Quarzsubstrat

1 Heißfilm; 2 Stromzuführung; 3 Quarzsubstrat

Bild 4.6. Heißfilmsonden auf ebenem Substrat
a) kompakte Wandeinbausonde; b) Sondereinsatz für Wandeinbau

1 wandbündiger Heißfilm; 2 Bondinseln; 3 Quarzsubstrat; 4 Drahtzuführungen

ebener Fläche mit speziellen Bondinseln und Golddrahtzuführungen. Sie werden zur Messung von Scherspannungen und Wärmeübergängen sowie zur Bestimmung des Umschlages von laminarer in turbulente Strömung in Grenzbereichen angewendet.

Kugelpopf-Heißfilmsonden nach **Bild 4.7** haben ein kugelförmiges Substrat, das den Metallfilm trägt und mit ihm erhitzt wird [4.11]. Die Sonde arbeitet nahezu richtungsunabhängig, sie eignet sich gut für Luftströmungsmessungen bei Raumklimauntersuchungen. Robuster als Heißfilmsonden sind nach [4.13] geheizte NTC-Perlensonden (1 mm Ø). Das sind Thermistoren in Perlenform mit hohem negativem Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, besonders geeignet zum Messen kleiner Luftströmungsgeschwindigkeiten (ab 0,01 m/s). Robust deshalb, weil der Widerstand der Sonde vom Volumen des Halbleiters

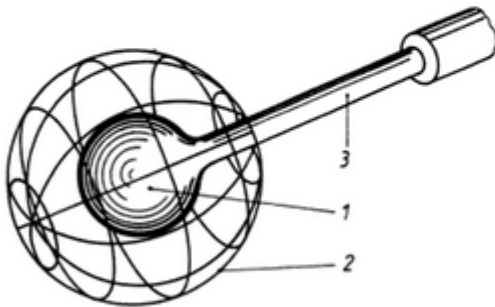


Bild 4.7. Heißfilm-Kugelpopfsonde
1 Metallfilm auf Kugeloberfläche; 2 Drahtschutz;
3 Halter mit Stromzuführungen

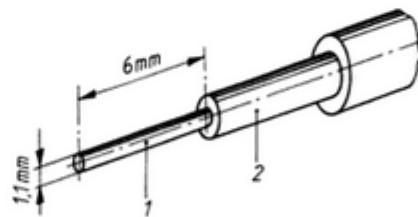


Bild 4.8. Ummantelte Hitzdrahtsonde
1 Metallröhrchen mit Hitzdraht im Innern; 2 Halter mit
Zuleitungen

bestimmt wird und Oberflächendefekte einen weitaus geringeren Einfluß auf die Leitfähigkeit haben. Eine richtungsunabhängige Sonde mit NTC-Perle und einem weit gespannten Drahtschutz ist speziell für Raumklimaanalysen entwickelt worden [4.13].

Bild 4.8 zeigt eine robuste Hitzdrahtsonde mit Metallmantel: Ein bifilar gewickelter Hitzdraht ist von einem dünnen Metallmantel (rostfreies Stahlröhrchen) umgeben und elektrisch durch eine Aralditschicht isoliert [4.14]. Der Metallmantel schützt den Hitzdraht vor chemischen und mechanischen Einwirkungen, andererseits erhöht er die **thermische** Trägheit der Sonde und beschränkt die Anwendung auf niederfrequente Strömungsvorgänge (<5 Hz).

Die Empfindlichkeit von Hitzdraht- und Heißfilmsonden wächst mit der Temperaturdifferenz zwischen Sonde und Fluid $T_s - T_F$. Je höher die Übertemperatur der Sonde ist, um so geringer wird der Einfluß der Mediumtemperatur. So strebt man möglichst hohe Sonden-temperaturen an, in Gasen ungefähr 250 °C. In Flüssigkeiten richtet sich die Brenntemperatur nach dem Siedepunkt. Sie muß so weit unter dem Siedepunkt liegen, damit sich am Draht oder Film keine Dampfblasen bilden, in Wasser unterhalb 80 °C [4.12].

4.3. Meßschaltungen

Nach den Gln. (4.4) und (4.8) ist die von der Sonde abgegebene Leistung $I^2 \cdot R_s$ zu messen. Dazu benutzt man Widerstandsbrückenschaltungen, in denen

- der Sondenstrom I konstant gehalten und der Sondenwiderstand R_s gemessen werden, das **Konstant-Strom-Anemometer** (CCA Constant Current Anemometer),
- der Sondenwiderstand und damit seine Temperatur konstant gehalten und der Sondenstrom oder die Sondenspannung gemessen werden, das **Konstant-Temperatur-Anemometer** (CTA Constant Temperature Anemometer).

CCA-Meßschaltung

Eine CCA-Meßschaltung zeigt **Bild 4.9**. Im einfachen Fall wird die Brücke von einer Konstantstromquelle [4.15] gespeist. Die Verzweigung

$$I = I_1 + I_2 \quad (4.11)$$

liefert den Sondenstrom

$$I_1 = I / [1 + (R_1 + R_S) / (R_2 + R_K + R_3)]. \quad (4.12)$$

Um einen möglichst großen Teil des Speisestromes für die Sondenheizung zu nutzen, arbeitet man mit unsymmetrischer Brücke, z. B. mit einem Brückenverhältnis

$$(R_1 + R_S) / (R_2 + R_K + R_3) \approx 1 : 20. \quad (4.13)$$

Bei dieser Unsymmetrie wirken sich Änderungen von R_S nach Gl. (4.12) nur wenig auf I_1 aus, so daß mit der Konstantstromeinspeisung I auch der Sondenstrom I_1 in guter Näherung konstant bleibt.

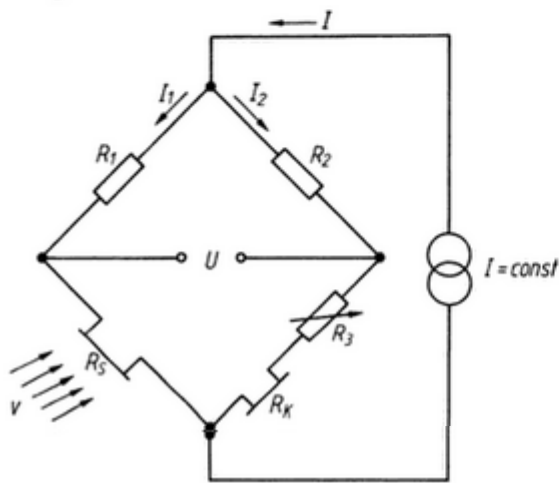


Bild 4.9. Konstant-Strom-Anemometer (CCA)
 I Konstantstromquelle; I_1 Strom im aktiven Brücken-
 zweig; I_2 Strom im passiven Brücken-
 zweig; R_S Wider-
 stand der Sonde im Betriebszustand; R_1, R_2 feste
 Vergleichswiderstände; R_3 einstellbarer Vergleichs-
 widerstand; R_K Kompensationswiderstand (Fluidtemp.-
 Komp.)

Die Strömung verändert die Temperatur und damit den Widerstand der Sonde R_S . Die daraus resultierende Brückenverstimmung U wird verstärkt und als Maß für die Strömungsgeschwindigkeit verwendet:

$$U = I_1 [R_2 \cdot R_S - R_1 (R_K + R_3)] / (R_2 + R_K + R_3). \quad (4.14)$$

R_K im passiven Brücken-
 zweig kompensiert in begrenztem Umfang Temperaturschwankungen des Fluids. Dazu dient eine temperaturempfindliche Drahtsonde, die ungeheizt der Strömung ausgesetzt ist.

Der Abgleich der Brücke erfolgt im ruhenden Fluid ($v = 0$). Der Heizstrom wird so eingestellt, daß die Spannung in der Brückendiagonalen verschwindet. Mit der Abkühlung der Sonde durch die Strömung sinkt der Widerstand und wächst die Meßspannung U :

$$U = I_1 \cdot R_2 (R_{SO} - R_S) / (R_2 + R_K + R_3) \quad (4.15)$$

R_{SO} Sondenwiderstand bei $v = 0$

R_S Sondenwiderstand bei $v > 0$.

In **Bild 4.10** sind Kennlinien eines Konstant-Strom-Anemometers mit der Meßspannung U und der Sondenübertemperatur ΔT als Funktion der Geschwindigkeit v von Luft bei 20 °C dargestellt [4.6]. Es handelt sich um eine Hitzdrahtsonde mit 10 µm Drahtdurchmesser und 3 mm Länge. Die Charakteristik zeigt, daß sich die CCA-Meßschaltung gut für kleine Strö-

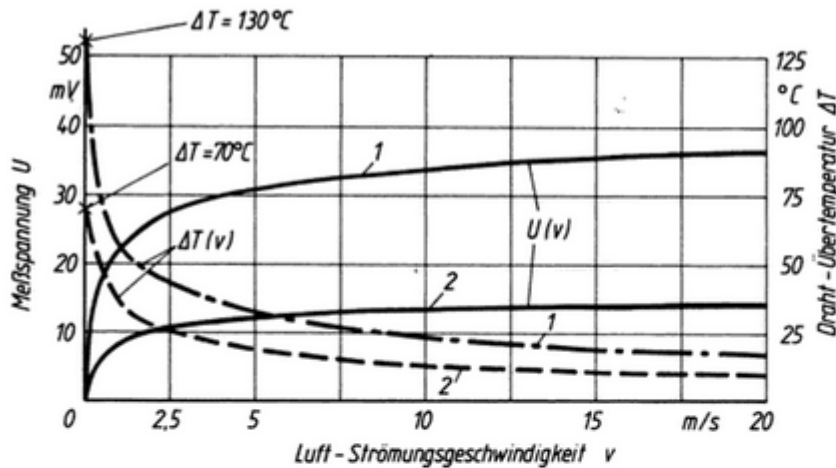


Bild 4.10. Kennlinien eines Konstant-Strom-Anemometers in Luft

$U(v)$ Meßspannung bei konstantem Strom; $\Delta T(v)$ Temperaturdifferenz Hitzdraht-Fluid bei konstantem Strom I Hitzdrahtstrom 63,5 mA ($\Delta T = 130^\circ\text{C}$ bei $v = 0$); 2 Hitzdrahtstrom 49 mA ($\Delta T = 70^\circ\text{C}$ bei $v = 0$)

nungsgeschwindigkeiten eignet, denn die Empfindlichkeit nimmt mit wachsender Geschwindigkeit stark ab.

Nachteilig wirkt sich die **thermische** Trägheit der Sonde auf die Meßdynamik aus. Der Sondenwiderstand kann mit seiner relativ großen thermischen Zeitkonstanten schnellen Strömungsfuktuationen nicht folgen. Außerdem besteht die Gefahr, daß der Hitzdraht durchbrennt, wenn bei hoher Übertemperatur die Geschwindigkeit plötzlich abfällt. Diese Nachteile vermeidet das Konstant-Temperatur-Anemometer.

CTA-Meßschaltung

Sie dominiert in der thermischen Geschwindigkeitsmeßtechnik. Das Meßprinzip besteht in der Einstellung einer konstanten Heiztemperatur der Sonde durch Nachführung des Speisestromes oder der Speisespannung. Diese kompensieren die durch die Strömung verursachte Abkühlung des Hitzdrahtes. Mit der Temperatur bleibt auch der Widerstand der Sonde konstant. Damit sind Speisestrom oder Speisespannung ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. **Bild 4.11** zeigt eine Meßschaltung für ein CTA, in der die Wheatstone-

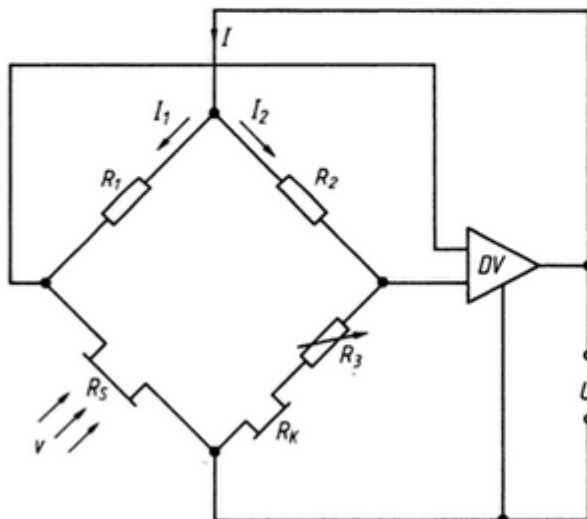


Bild 4.11. Konstant-Temperatur-Anemometer (CTA)

U Brückenspeisespannung; I Speisestrom; I_1, I_2 Ströme in Brückenzeigen; R_5 Widerstand der Sonde im Betriebszustand; R_1, R_2 feste Vergleichswiderstände; R_3 einstellbarer Vergleichswiderstand; R_K Kompensationswiderstand (Fluidtem.-Komp.); DV Differenzverstärker, v Strömungsgeschwindigkeit

Brücke und ein Differenzverstärker zu einem Regelkreis verbunden sind. Die durch die Strömung veränderte Heiztemperatur bewirkt eine kleine Spannungsdifferenz (Brückenverstimmung) am Eingang des Verstärkers. Entsprechend dem Vorzeichen der Spannung verringert oder erhöht sich am Ausgang des Verstärkers die Brückenspeisespannung, bis die Brücke wieder abgeglichen ist. Je größer die Schleifenverstärkung g ist, um so kleiner ist die Brückenverstimmung, die zur Kompensation der Temperaturänderung der Sonde benötigt wird. Um so kleiner ist auch die Zeitkonstante des Regelkreises τ_R , die den Frequenz- und Phasengang der Sonde mitbestimmt

$$\tau_R = \tau/g \quad (4.16)$$

τ Eigenzeitkonstante der Sonde.

Speisestrom I und Speisespannung U sind nach Gl. (4.4) und Gl. (4.11)

$$I^2 = Nu \cdot \pi \cdot \lambda_F \cdot l \cdot (T_S - T_F) \cdot (1 + n_B)^2 / R_S \quad (4.17)$$

mit

$$n_B = (R_1 + R_S) / (R_2 + R_K + R_3). \quad (4.18)$$

(Brückenverhältnis)

Die Temperaturdifferenz läßt sich ersetzen durch

$$T_S - T_F = (R_S - R_F) / (R_0 \cdot \alpha) \quad (4.19)$$

R_F Widerstand der Sonde bei der Temperatur des Fluids

R_0 Widerstand der Sonde bei einer gegebenen Bezugstemperatur (z. B. 0°C)

α linearer Temperaturkoeffizient des Widerstandes.

$$I^2 = Nu \cdot \pi \cdot \lambda_F \cdot l \cdot (R_S - R_F) (1 + n_B)^2 / (R_S \cdot R_0 \cdot \alpha) \quad (4.20)$$

$$U^2 = Nu \cdot \pi \cdot \lambda_F \cdot l \cdot (R_S - R_F) (R_S + R_1)^2 / (R_S \cdot R_0 \cdot \alpha). \quad (4.21)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit v ist in der Nusselt-Zahl Nu enthalten. Für Luft und Wasser bei 20°C und Normaldruck ergeben sich nach Gl. (4.7) die in Tafel 4.1 zusammengestellten Beziehungen.

Tafel 4.1. Prandtl-Zahlen Pr , Reynolds-Zahlen Re und Nusselt-Zahlen Nu für Geschwindigkeitsmessungen in Luft und Wasser bei 20°C und Normaldruck

	Pr	Nu
Luft	0,7	$0,39 + 0,507 \cdot Re^{0,5}$
Wasser	7,0	$0,62 + 1,08 \cdot Re^{0,5}$

Beispiele für Hitzdraht- (HD) und Heißfilmsonden (HF):

Sonde	D μm	ν m^2/s	Re	Nu
Luft HD	5	$15,09 \cdot 10^{-6}$	$0,33 \cdot v$	$0,39 + 0,29 \cdot v^{0,5}$
Wasser HF	25	$1,004 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot v$	$0,62 + 5,4 \cdot v^{0,5}$

D Durchmesser der Sonde

ν kinematische Zähigkeit

v Strömungsgeschwindigkeit in m/s

Da R_S konstant bleibt, wird aus Gl. (4.20)

$$I^2 = A_1 + B_1 \cdot v^{0.5} \quad (4.22)$$

und aus Gl. (4.21)

$$U^2 = A_2 + B_2 \cdot v^{0.5}. \quad (4.23)$$

Die Konstanten A und B lassen sich aus den Gln. (4.20) und (4.21) und den Nusselt-Zahlen nach **Tafel 4.1** berechnen. Es sind jedoch nur Näherungswerte, sie gelten für begrenzte Geschwindigkeitsbereiche. Das betrifft auch den Exponenten der Geschwindigkeit v . Die begrenzte Gültigkeit ist auf Näherungen im Ansatz für die Energiebilanz zurückzuführen.

Bild 4.12 zeigt typische Kennlinien eines Konstant-Temperatur-Anemometers in Luft: Sensor-Brückenströme in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit. Es handelt sich um eine Heißfilmsonde und um eine Hitzdrahtsonde. Der Brückenstrom ist so eingestellt, daß die Brenntemperatur der Sonde konstant bei 250 °C bleibt. Bei dieser Temperatur hat die Filmsonde einen Widerstand von 9 Ω und die Hitzdrahtsonde 10,8 Ω. Gegenüber den Kennlinien des Konstant-Strom-Anemometers ist hier eine wesentlich höhere Empfindlichkeit über einen großen Geschwindigkeitsbereich vorhanden.

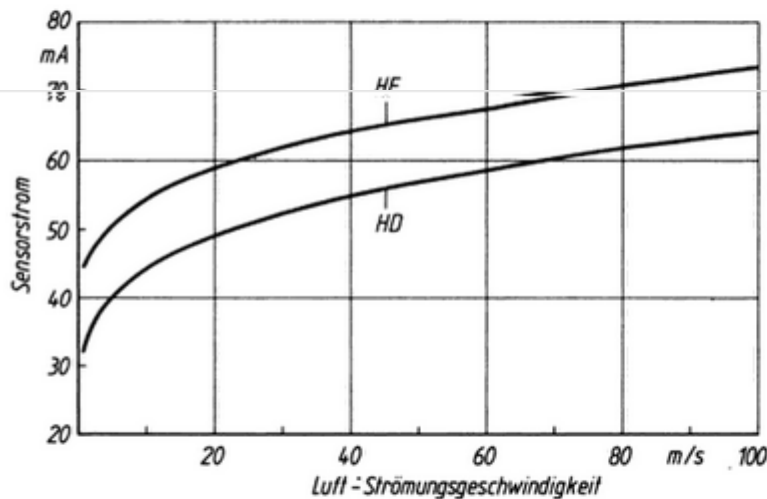


Bild 4.12. Kennlinien eines Konstant-Temperatur-Anemometers in Luft bei Sensorarbeitstemperaturen von 250 °C ($R_S \approx 10 \Omega$) [4.12]

HF Heißfilmsonde TSI Typ – 10 A 25 µm Ø, 0,25 mm Länge; HD Hitzdrahtsonde TSI Typ-T 1,5 4 µm Ø, 1,25 mm Länge

Die Analyse nach Gl. (4.22) zeigt **Bild 4.13**. Die Abweichungen bei kleinen Geschwindigkeiten sind typisch für **thermische** Sonden. Sie hängen von der Sondenposition, dem Durchmesser-Längen-Verhältnis und den Eigenschaften des Fluids ab.

Ein Beispiel für eine Kalibrierungskurve bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten von Luft zeigt **Bild 4.14**. Es sind Meßwerte einer Hitzdrahtsonde vom Typ DANTEC 55 P 14 mit der Brückenspannung als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit. Die Anpassung an Gl. (4.23) liefert unterschiedliche Werte für A , B und n .

Nach [4.16] wird

$$U^2 = A + B \cdot v^n \quad (4.24)$$

in 3 Geschwindigkeitsbereiche unterteilt. **Tafel 4.2** enthält die dazu passenden Parameter. Der Exponent n steigt bis auf Eins bei kleinsten Strömungsgeschwindigkeiten. Nach höhe-

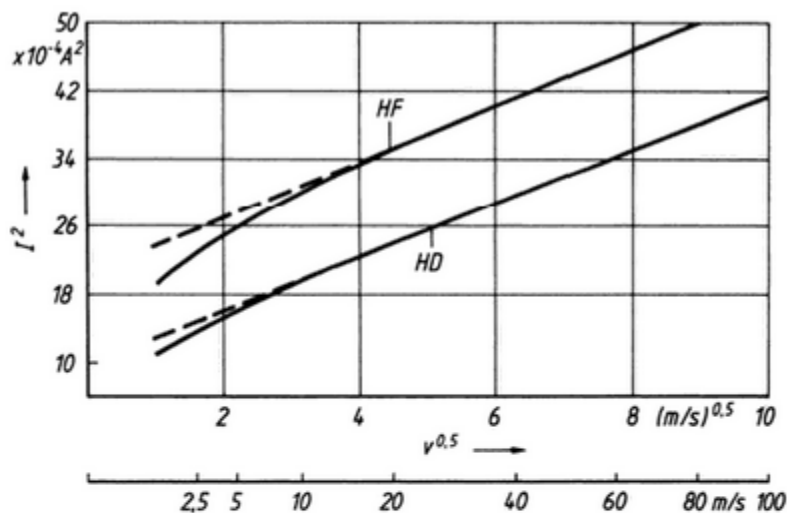


Bild 4.13. Analyse der Kennlinien der Hitzdraht (HD)- und Heißfilmsonde (HF) von Bild 4.12 nach Gl. (4.22). Die gestrichelte Linie ist jeweils die analytische Fortsetzung dieser Gleichung

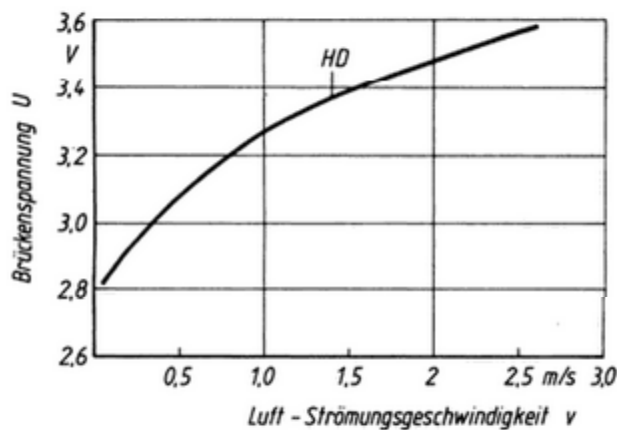


Bild 4.14. Kalibrierungskurve einer Hitzdrahtsonde (HD) vom DANTEC Typ 55 P 14 im CTA für kleine Luftströmungsgeschwindigkeiten

Tafel 4.2. Kennlinienparameter der Hitzdrahtsonde DANTEC 55 P 14 (Bild 4.14) bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten der Luft nach Gl. (4.24)

Meßbereich v m/s	A V^2	B $V^2/(m/s)^n$	n
0,04 ... 0,2	7,72	3,84	1
0,2 ... 0,7	7,10	3,60	0,6
0,7 ... 2,5	5,98	4,68	0,41

ren Strömungsgeschwindigkeiten sinkt er unter 0,5. Allgemein wird für $v \geq 3$ m/s

$$n = 0,45$$

vorgeschlagen [4.8] [4.17].

Die stahlummantelte Hitzdrahtsonde nach Bild 4.8 [4.14] hat eine Kalibrierungskurve, die über einen größeren Geschwindigkeitsbereich der Funktion nach Gl. (4.23) gut folgt

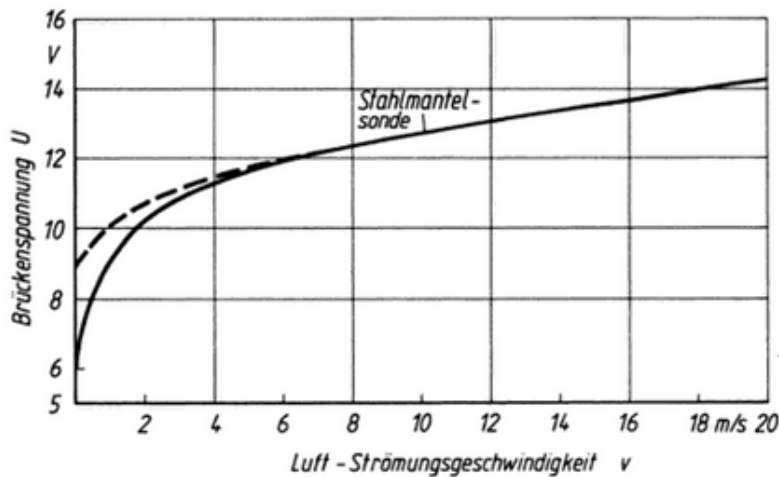


Bild 4.15. Kalibrierungskurve der stahlummantelten Hitzdrahtsonde vom DANTEC Typ 55 A 76 im CTA für Windgeschwindigkeitsmessungen. Gestrichelte Kurve nach Gl. (4.23)

(Bild 4.15). Die Abweichung unterhalb 6 m/s erklärt sich aus den speziellen Wärmeableitungsbedingungen: Wärmetransport durch den Stahlmantel, geringes Längen-Durchmesser-Verhältnis 6:1, Wärmeableitung über den Halter.

4.4. Richtungsempfindlichkeit von Hitzdraht- und Heißfilmsonden

Die Abkühlung der Meßsonde hängt von der Anströmrichtung ab. Versuche an sehr langen beheizten Zylindern haben ergeben, daß die Wärmeabgabe nur von der Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Zylinderachse beeinflusst wird [4.18]. Nach Bild 4.16 ist das v_x , die x -Komponente der in der x,y -Ebene angenommenen Strömung.

$$v_x = |v| \cdot \cos \alpha \quad (4.25)$$

α Anströmwinkel in der x,y -Ebene.

Die Komponente

$$v_y = |v| \cdot \sin \alpha \quad (4.26)$$

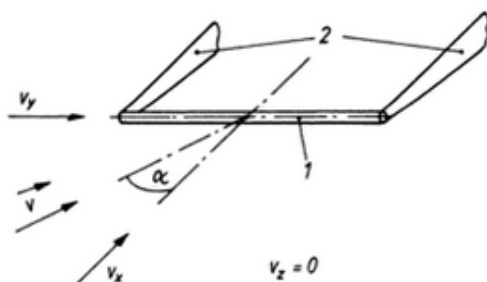


Bild 4.16. Anströmung der Sonde in der xy -Ebene unter dem Winkel α gegen die Sondenachse

1 Heizelement; 2 Haltespitzen

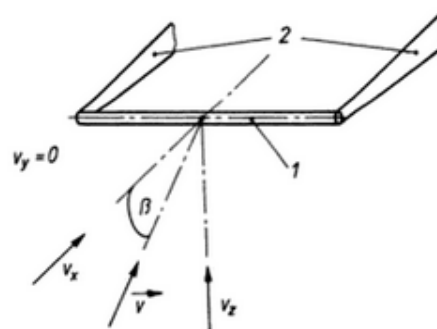


Bild 4.17. Anströmung der Sonde in der xz -Ebene unter dem Winkel β gegen die Sondenachse

1 Heizelement; 2 Haltespitzen

sollte keinen Einfluß auf das Geschwindigkeitssignal der Meßsonde haben. Da aber der beheizte Zylinder zwischen zwei wärmeabführenden Haltespitzen aufgespannt ist, die die Wärmeverteilung und das Strömungsfeld am Heizzylinder beeinflussen, liefert auch v_y einen Beitrag zum Sondersignal. Der Beitrag wird in dem dimensionslosen Richtungsfaktor k_y berücksichtigt (Koeffizient der Richtungsempfindlichkeit)

$$v_{\text{eff}}^2 = v_x^2 + k_y^2 \cdot v_y^2. \quad (4.27)$$

Die Anströmung in der xz -Ebene nach **Bild 4.17** hat die Komponenten

$$v_x = |v| \cdot \cos \beta \quad (4.28)$$

$$v_z = |v| \cdot \sin \beta \quad (4.29)$$

β Anströmwinkel in der xz -Ebene.

Aufgrund der Zylindersymmetrie des Hitzdrahtes müßten beide Komponenten gleich gewichtet sein. Da jedoch auch hier die Haltespitzen nicht ohne Einfluß auf die Wärmeabführung sind, werden diese Komponenten unterschiedlich bewertet. Dazu wird der Richtungsfaktor k_z eingeführt

$$v_{\text{eff}}^2 = v_x^2 + k_z^2 \cdot v_z^2. \quad (4.30)$$

Bei beliebiger Anströmrichtung wird das Sondersignal

$$v_{\text{eff}}^2 = v_x^2 + k_y^2 \cdot v_y^2 + k_z^2 \cdot v_z^2. \quad (4.31)$$

Die Richtungsfaktoren k_y und k_z sind nicht konstant, sondern hängen vom Anströmwinkel und vom Betrag der Geschwindigkeit ab. Sie werden experimentell ermittelt:

- k_y : Drehung der Sonde im Bild 4.16 um den Winkel α bei $v_z = 0$. Gemessen wird das Sonderegeschwindigkeitssignal v_{eff} bei konstanter Anströmgeschwindigkeit v . Aus den Gln. (4.27), (4.25) und (4.26) ergibt sich

$$k_y = [v_{\text{eff}}^2/v^2 - \cos^2 \alpha]^{1/2}/\sin \alpha \quad (4.32)$$

- k_z : Drehung der Sonde im Bild 4.17 um den Winkel β bei $v_y = 0$. Gemessen wird v_{eff} bei $v = \text{const.}$ Aus den Gln. (4.30), (4.28) und (4.29) ergibt sich

$$k_z = [v_{\text{eff}}^2/v^2 - \cos^2 \beta]^{1/2}/\sin \beta. \quad (4.33)$$

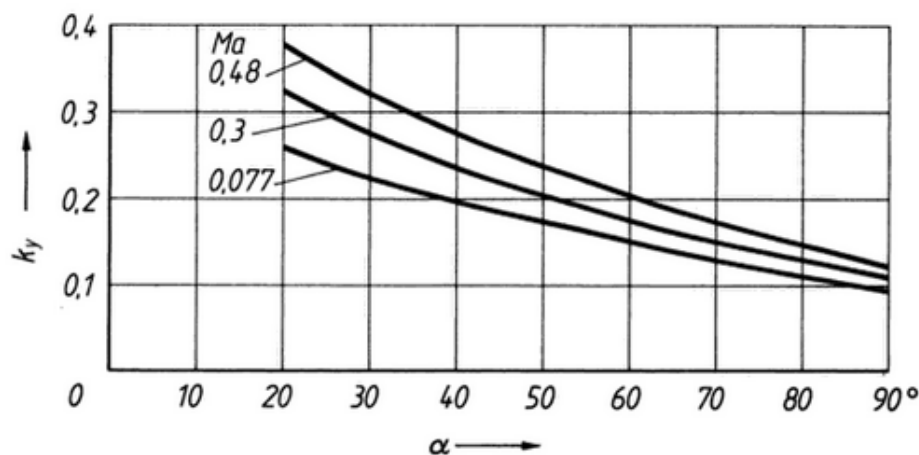


Bild 4.18. Richtungsfaktor k_y in Abhängigkeit vom Anströmwinkel α und der Machzahl Ma ($\beta = 0$)

Meßergebnisse mit einer DISA-Hitzdrahtsonde vom Typ 55 P 11 nach [4.17] zeigen die **Bilder 4.18** und **4.19**. Parameter ist die Mach-Zahl Ma , die von 0,08 bis 0,5 variiert; $k_z > 1$ bedeutet, daß im Geschwindigkeitssignal der Sonde nach Gl. (4.30) der Beitrag der Querströmung (cross flow) ein größeres Gewicht hat als der Beitrag der Frontalströmung (end

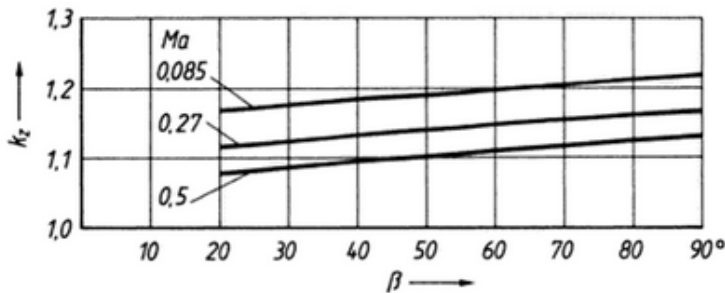


Bild 4.19. Richtungsfaktor k_z in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β und der Mach-Zahl Ma ($\alpha = 0^\circ$)

flow). Die eingeführten Richtungs faktoren sind Korrekturfaktoren in der Richtcharakteristik der Hitzdraht- oder Heißfilmsonde. Ihr Einfluß nimmt mit dem Winkel zu und ist am größten bei $\alpha = 90^\circ$ bzw. $\beta = 90^\circ$:

$$k_y(90^\circ) = v_{\text{eff}}/v_y, \quad k_z(90^\circ) = v_{\text{eff}}/v_z. \quad (4.34)$$

Bild 4.20 zeigt ihre Abhängigkeit von der Mach-Zahl Ma . Bemerkenswert ist die Abnahme von k_z unter Eins für $Ma > 0,8$. Das heißt, daß hier das Gewicht der Querströmung (v_z) geringer wird als das der Frontalströmung (v_x).

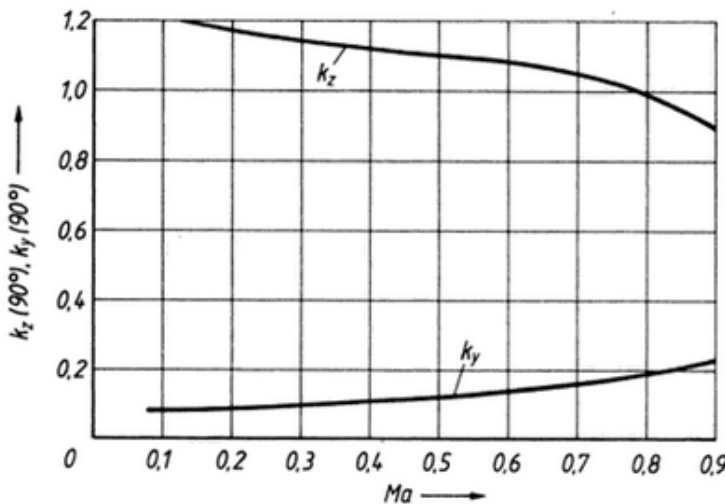


Bild 4.20. Richtungs faktoren k_y bei $\alpha = 90^\circ$ und k_z bei $\beta = 90^\circ$ in Abhängigkeit von der Mach-Zahl Ma

Die experimentellen Werte nach [4.17] ergeben die in den **Bildern 4.21** und **4.22** dargestellten Richtungsempfindlichkeiten der Sonde. Die Diagramme enthalten die Meßwerte v_{eff} im CTA-Betrieb bei unterschiedlichen Winkelstellungen der Sonde im konstanten Luftstrom. Bezugswert ist der Geschwindigkeitswert $v_{\text{eff}}(0)$ bei $\alpha = \beta = 0$. Darin kennzeichnen

- $k_y(\alpha) \cdot \sin \alpha$ die Abweichung der Sondencharakteristik vom Kosinusverhalten (Kosinus-Gesetz: gestrichelte Linie $k_y = 0$)
- $k_z(\beta) \cdot \sin \beta$ die Abweichung der Sondencharakteristik von der Zylindersymmetrie (gestrichelte Linie $k_z = 1$).

Die Abweichungen sind an den Rändern am größten (90°-Positionen der Sonden), z. B. 22% bei $Ma = 0,085$ in der Querstromcharakteristik nach Bild 4.22. Der am Rand

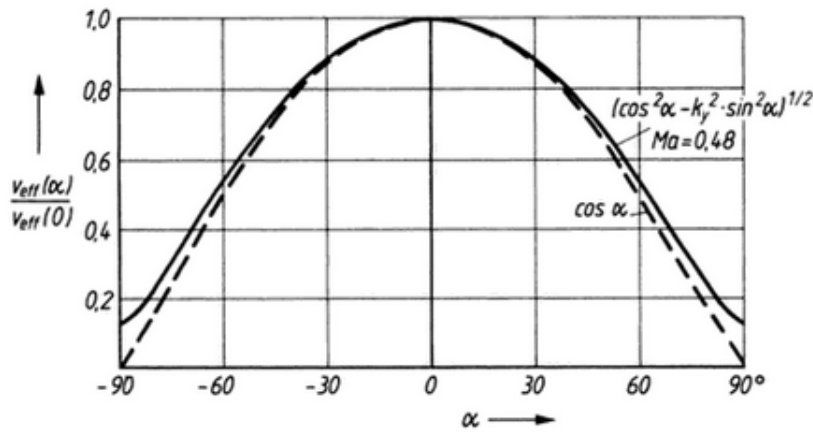


Bild 4.21. Richtungsempfindlichkeit einer Hitzdrahtsonde in der xy -Ebene nach Bild 4.16 ($v_z = 0$)

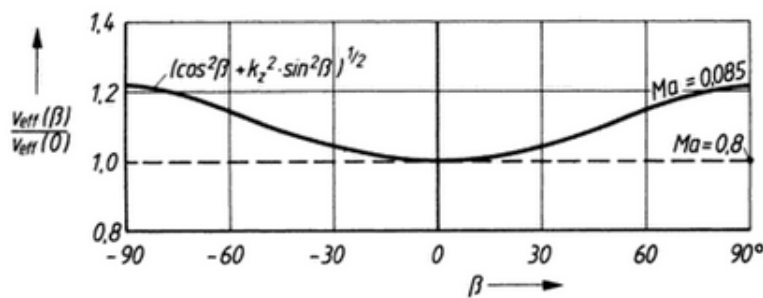


Bild 4.22. Richtungsempfindlichkeit einer Hitzdrahtsonde in der xz -Ebene nach Bild 4.17 ($v_y = 0$)

markierte Punkt $Ma = 0,8$ bedeutet, daß bei dieser Strömungsgeschwindigkeit $k_z(90^\circ) = 1$ ist und die Sonde nahezu unabhängig vom Anströmwinkel β arbeitet. Dagegen ist bei $Ma = 0,8$ der Richtungsfaktor $k_y(90^\circ) = 0,2$ (Bild 4.20), d. h. eine entsprechend größere Abweichung vom Kosinusverhalten in der xy -Ebene.

Die Richtungsfaktoren sind sondenspezifische Korrekturfaktoren. Sie hängen vom Längen-Durchmesser-Verhältnis, vom Grad der Verschmutzung und von der Kontaktierung des Meßelementes sowie von der Anordnung der Halterungen ab. Die aktuellen Werte werden durch Kalibrierung ermittelt. Kenntnisse über ihre Abhängigkeiten sind für Fehlerbetrachtungen wichtig.

4.5. Zeitverhalten thermischer Anemometer

Zur Untersuchung stationärer Strömungen, insbesondere der Turbulenz, muß das Anemometer schnell genug den Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit folgen können. Die Zeiten, die die Trägheit charakterisieren, hängen ab von

- der Eigenzeitkonstante des Meßelementes,
- der Meßschaltung des Anemometers,
- den Brückenkapazitäten einschließlich Kabel,
- der Schleifenverstärkung.

Zeitliche Änderungen des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes am Meßelement führen zu Änderungen der Temperaturen und Temperaturverteilungen im Meßelement selbst. Charakteristische Zeiten für den Wärmetransport in ausgewählten typischen Hitz-

drähten und Heißfilmen sowie der Einfluß des Wärmeabflusses über die Halterungen werden von *Hoffmeister* in [4.19] angegeben.

Die Zeitkonstanten τ (bezogen auf den 3-dB-Abfall der Meßsignalamplitude) lassen sich aus einer Differentialgleichung ableiten, die die Energiebilanz am zylindrischen Meßelement beschreibt. Ohne Berücksichtigung des Wärmeabflusses über die Halterung erhält man nach [4.19]

- für den Konstant-Strom-Betrieb (Index KS)

$$\tau_{KS} = (D^2 \cdot \varrho_S \cdot c_S \cdot \bar{R}_S) / (R_F \cdot 4 \cdot \overline{Nu} \cdot \bar{\lambda}_F) \quad (4.35)$$

- für den Konstant-Temperatur-Betrieb (Index KT)

$$\tau_{KT} = \frac{(D^2 \cdot \varrho_S \cdot c_S \cdot \bar{R}_S) / (R_F \cdot 4 \cdot \overline{Nu} \cdot \bar{\lambda}_F)}{1 + 2 \cdot g_T \cdot \bar{R}_S \cdot (\bar{R}_S - \bar{R}_F) / (\alpha \cdot \bar{R}_F^2)} \quad (4.36)$$

D, ϱ_S, c_S Durchmesser, Dichte und Wärmekapazität des Meßelementes

R_S, R_F Widerstand des Meßelementes bei der Sensor-Arbeitstemperatur T_S und bei der Fluidtemperatur T_F

Nu Nusselt-Zahl

λ_F Wärmeleitfähigkeit des Fluids

g_T Übertragungsfaktor im Regelkreis des CTA

α Temperaturkoeffizient des Widerstandes

$(\bar{})$ zeitlicher Mittelwert.

■ Für zwei typische Beispiele

- Hitzdrahtsonde in Luft (HD),
 - Wolframdraht mit Platinfilm $D = 5 \mu\text{m}$, $l = 1 \text{ mm}$ (Länge)
- Heißfilmsonde in Wasser (HF),
 - Quarzfaser mit Nickelfilm $D = 70 \mu\text{m}$, $l = 1,25 \text{ mm}$

sind die Zeitkonstanten τ_{KS} und τ_{KT} in **Tafel 4.3** angegeben.

Tafel 4.3. Sensordaten und berechnete Zeitkonstanten nach den Gln. (4.35) und (4.36) für zwei Beispiele:

		Hitzdraht in Luft	Heißfilm in Wasser
D	m	$5 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$
l	m	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
l/D		200	17,8
ϱ_S	kg/m ³	$19,3 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$
c_S	Ws/(kg · K)	141,5	782,8
ϑ_S	°C	180	40
$\bar{R}_S/\bar{R}_F$		1,8	1,08
$\bar{v}$	m/s	10	1
Re		3,31	69,3
$\overline{Nu} \cdot \bar{\lambda}_F$	W/(m · K)	$31,7 \cdot 10^{-3}$	5,4
λ_F	W/(m · K)	$2,42 \cdot 10^{-2}$	0,565
g_T	K ⁻¹	0,33	0,33
α	K ⁻¹	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Zeitkonstanten im Konstant-Strom-Betrieb:			
τ_{KS}	s	$0,97 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
τ_{KS}^*	s	$1,48 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{-4}$
Zeitkonstanten im Konstant-Temperatur-Betrieb:			
τ_{KT}	s	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
τ_{KT}^*	s	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$

Bei Berücksichtigung des Wärmeabflusses über die Halterung entstehen zusätzliche Terme in den Gln. (4.35) und (4.36), die nicht mit angegeben sind. Die Korrekturen der Zeitkonstanten sind in τ_{KS}^* und τ_{KT}^* enthalten (Hoffmeister [4.19]).

Die Ergebnisse zeigen:

- Im Konstant-Temperatur-Betrieb arbeitet ein Meßelement wesentlich trägheitsarmer als im Konstant-Strom-Betrieb (bis zu 3 Größenordnungen).
- Die Zeitkonstante verkleinert sich im CTA-Betrieb, wenn die Übertemperatur ($T_s - T_F$) erhöht wird. Der Nenner in Gl. (4.36) entspricht der Schleifenverstärkung g in Gl. (4.16) und beträgt $g \approx 500$ beim Hitzdraht und $g \approx 13$ beim Heißfilm (bei gleichem Übertragungsfaktor $g_T = 0,33 \text{ K}^{-1}$) in obigen Beispielen.
- Die Korrektur der Zeitkonstanten wächst mit dem Wärmeabfluß über die Halterung, d. h. mit der Übertemperatur ΔT der Sonde. Mit $\Delta T = 20 \text{ K}$ ist sie bei der Heißfilmsonde nahezu vernachlässigbar, mit $\Delta T = 160 \text{ K}$ liegt sie bei der Hitzdrahtsonde in der gleichen Größenordnung wie die Zeitkonstante selbst. Die Größe der Korrektur hängt vom Verhältnis des Konvektionswärmestromes zum Gesamtwärmeabfluß ab.

Das zeitliche Verhalten des Meßwertes am Ausgang des Anemometers (Brückenspannung oder Brückenstrom) zur Meßgröße Strömungsgeschwindigkeit am Eingang beschreibt die Amplitudenfunktion $A(j \cdot \omega \cdot \tau)$. Darin sind τ die Zeitkonstante des Anemometers und $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ die Frequenz der Schwankung der Strömungsgeschwindigkeit

$$v(t) = \bar{v} + v'(t)$$

$\bar{v}$ Mittelwert

$v'(t)$ zeitliche Schwankung

Unter der Voraussetzung

$$(\overline{v'^2})^{1/2}/\bar{v} \ll 1 \quad (4.37)$$

kann angenommen werden, daß sich die Schwankung linear auf den Meßwert überträgt (Kleinsignalverhalten des Anemometers). Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit stellt den Arbeitspunkt ein. Daraus ergibt sich der Proportionalitätsfaktor zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße. Die zeitliche Übertragung der Meßgröße läßt sich im Frequenzgang von Amplitude und Phase des Meßsignals darstellen.

$$A(j \cdot \omega \cdot \tau) = A(0)/(1 + j \cdot \omega \cdot \tau) \quad (4.38)$$

$A(0)$ Amplitude des Meßsignals bei $f \ll 1/(2 \cdot \pi \cdot \tau)$ (z. B. $f = 0$).

Die relative Amplitudenschwächung ist

$$|A(j \cdot \omega \cdot \tau)/A(0)| = 1/(1 + \omega^2 \cdot \tau^2)^{1/2}. \quad (4.39)$$

Die Verschiebung der Phase zwischen Eingangs- und Ausgangssignal ist

$$\varphi = \arctan(\omega \cdot \tau). \quad (4.40)$$

Bild 4.23 zeigt den Frequenzgang von Amplitude und Phase einer 5- μm -Hitzdrahtsonde in Luft bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von 1, 10 und 100 m/s. Die Amplitudenschwächung ist im üblichen Dämpfungsmaß

$$20 \log |A(j \cdot \omega \cdot \tau)/A(0)|$$

aufgetragen. Bei der Grenzfrequenz f_g ist die Amplitude auf das $1/\sqrt{2}$ -fache abgesunken (3-dB-Abfall, gestrichelte Linie)

$$f_g = 1/(2 \cdot \pi \cdot \tau). \quad (4.41)$$

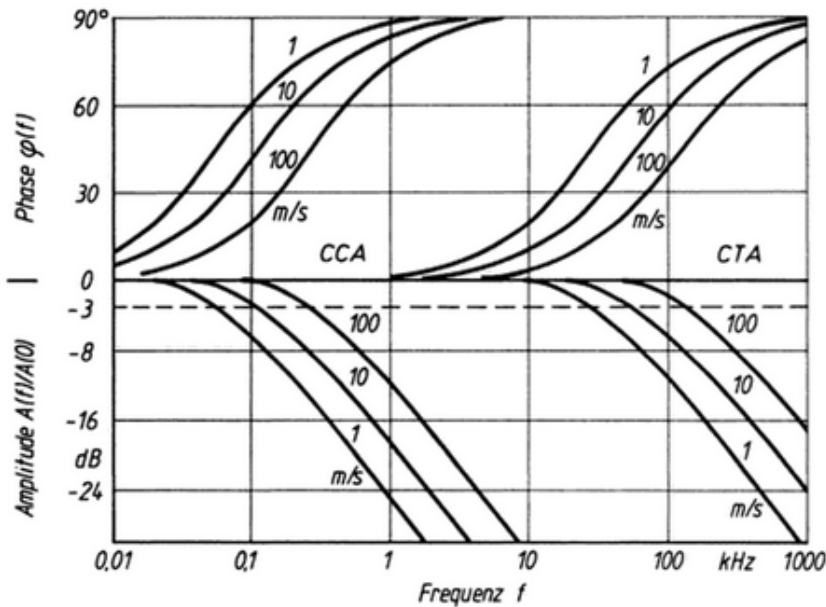


Bild 4.23. Frequenzgang der Amplitude $A(f)$ und Phase $\varphi(f)$ einer 5- μm -Hitzdrahtsonde in Luft links Konstant-Strom-Betrieb (CCA), rechts Konstant-Temperatur-Betrieb (CTA) Parameter ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit $\bar{v}$

Die Zeitkonstanten aus Tafel 4.3 in Gl. (4.41) eingesetzt ergeben Grenzfrequenzen für die Hitzdrahtsonde in Luft:

$$f_g(\text{CTA}) = 57 \text{ kHz} \quad \text{bei } \bar{v} = 10 \text{ m/s}$$

$$f_g(\text{CCA}) = 0,11 \text{ kHz} \quad \text{bei } \bar{v} = 10 \text{ m/s}$$

und für die Heißfilmsonde in Wasser

$$f_g(\text{CTA}) = 4,7 \text{ kHz} \quad \text{bei } \bar{v} = 1 \text{ m/s}$$

$$f_g(\text{CCA}) = 0,36 \text{ kHz} \quad \text{bei } \bar{v} = 1 \text{ m/s}.$$

Diese Werte werden weit übertroffen von Sonden, die bei höheren Arbeitstemperaturen und größeren Strömungsgeschwindigkeiten arbeiten. Das zeigt **Tafel 4.4** mit Daten kommerzieller Sensoren.

Die Grenzfrequenz wird experimentell nach dem sogenannten „square wave test“ bestimmt. Dazu speist man in den Brückenregelkreis ein Rechtecksignal ein, das wie eine Geschwindigkeitsänderung auf das System wirkt (**Bild 4.24**). Bei kleiner Signalamplitude (Kleinsignalverhalten des Systems) entsteht am Anemometerausgang das Antwortsignal nach Bild 4.24. An der abfallenden Flanke des Ausgangsimpulses $U(t)$ wird die Zeit gemessen, in der die Spannungsamplitude auf den e-ten Teil gesunken ist. Die Grenzfrequenz ergibt sich nach Gl. (4.41).

Diese Methode liefert nur für kleine dynamische Störungen richtige Werte. Sie setzt eine lineare Übertragung voraus.

Die elektronische Simulation berücksichtigt nicht

- Grenzschichtänderungen am Meßelement,
- Temperaturverteilungen im Meßelement,
- dynamische Wirkungen von Halterungen und Schutzschichten.

Ihre Einflüsse auf das Meßergebnis nehmen mit der Amplitude und Frequenz der Geschwindigkeitsschwankungen zu. Sie führen zu größeren Abweichungen, insbesondere wenn die zu messenden Frequenzen größer als $\frac{1}{10}$ der kritischen Frequenz des Meßsystems sind [4.19].

Tafel 4.4. Daten kommerzieller Hitzdraht- und Heißfilm-Sensoren (TSI [4.12]) für Strömungsgeschwindigkeitsmessungen in Luft (L) und Wasser (W)

Sensor	D μm	l mm	l_H mm	$v_{\min}$ m/s	$v_{\max}$ m/s	$\vartheta_{F_{\max}}$ $^{\circ}\text{C}$	$\vartheta_{S_{\max}}$ $^{\circ}\text{C}$	R_s Ω	$f_g(\text{CTA})$ kHz	$f_g^p(\text{CCA})$ Hz
W-Draht + Pt-Film	L 4	1,25	1,5	0,15	200	150	300	10,8	600	750
Pt-Draht	L 5	1,25	1,5	0,15	100	750	800	11,2	500	450
Pt-Film	L 25	0,25	0,75	0,15	350	150	425	9	200	70
Quarzfaser	W			0,03	10		80	5,8		850
Pt-Film	L 51	1,0	1,67	0,15	350	150	425	9	250	20
Quarzfaser	W			0,03	10		80	6,4		320
Split-Pt	L 152	2,0	3,5	0,15	350	150	350	je 14	20	3
Quarzfaser	W			0,03	1,5		80	je 6,4		60
Metall- mantel	L 400	2,5	6,3	0,15	66	100	125	13	0,01	9
	W			0,015	1,5		80	10,5		9

 D Durchmesser des Drahtes bzw. der Filmfaser l Sensorlänge l_H Gesamtlänge (Abstand Haltespitzen) $v_{\min}, v_{\max}$ minimal bzw. maximal meßbare Strömungsgeschwindigkeit $\vartheta_{F_{\max}}$ maximale Fluidtemperatur $\vartheta_{S_{\max}}$ maximale Arbeitstemperatur des Sensors R_s Widerstand des Sensors bei Arbeitstemperatur f_g, f_g^p Grenzfrequenz im CTA-Betrieb bzw. im CCA-Betrieb

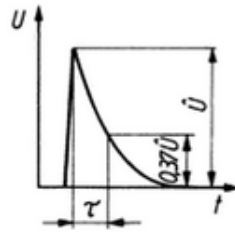
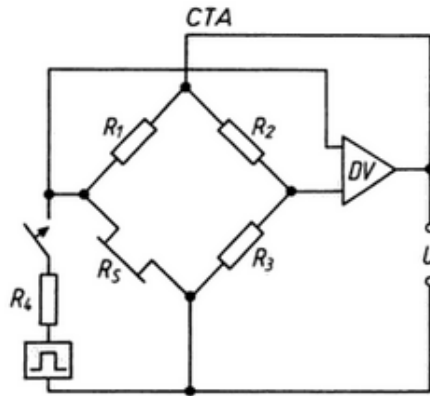


Bild 4.24. Bestimmung der Grenzfrequenz eines Konstant-Temperatur-Anemometers durch Rechtecksignaltest