Einfluss der Reynoldszahl auf die Kalibrierkurven

von pneumatischen Strömungssonden

Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Willinger Institut für Thermodynamik und Energiewandlung Technische Universität Wien Getreidemarkt 9 / 302, A-1060 Wien Tel.: ++43/1/58801/31312, Email: reinhard.willinger@tuwien.ac.at

Einleitung

Pneumatische Strömungssonden dienen bei der Entwicklung von thermischen Turbomaschinen zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit. Als aktiver Teil der pneumatischen Strömungssonde (Sondenkopf) dient ein stumpfer Körper (Kugel, Kegel, Pyramide, Keil), der mit Bohrungen für die Druckmessung versehen ist. Nach der Anzahl der Druckbohrungen unterscheidet man Dreilochsonden für ebene Strömungen Fünflochsonden für räumliche Strömungen. Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors aus den drei bzw. fünf Bohrungsdrücken ist vor der eigentlichen Messung eine Kalibrierung der Sonde unter definierten Bedingungen durchzuführen. Diese erfolgt üblicherweise in einem Freistrahl mit bekannter (konstanter) Geschwindigkeit. Neben der experimentellen Kalibrierung bietet sich die numerische Strömungssimulation (CFD) zur Vorausberechnung der Kalibrierkurven von pneumatischen Strömungssonden an. In den Komponenten von thermischen Turbomaschinen treten Strömungsbedingungen auf, die von denen im Freistrahl deutlich abweichen. In diesem Zusammenhang sind die Reynoldszahl [2, 3], die Machzahl, der Turbulenzgrad, Geschwindigkeitsgradienten [6] sowie ein möglicher Wandeinfluss [7] zu nennen. Diese Einflüsse lassen sich bei einer experimentellen Kalibrierung teilweise nur schwer berücksichtigen, so dass auch in diesen Fällen die numerische Strömungssimulation eine interessante Alternative darstellt.

Sondengeometrie, Bohrungskoeffizienten und Kalibrierkoeffizienten

Abbildung 1 zeigt ein Photo der untersuchten Dreilochsonde. Es handelt sich um eine gekröpfte Sonde (Kobrasonde) mit einer charakteristischen Abmessung d = 2,4 mm und einem Flankenwinkel $\delta = 30^{\circ}$. Die Definition der Geometrieparameter, die Nummerierung der Druckbohrungen "1", "2" und "3" sowie die Definition des Strömungswinkels $\Delta\beta$ ist aus Abb. 2 ersichtlich. Der an der Bohrung "*i*" anliegende Druck p_i unterscheidet sich um einen bestimmten Anteil des dynamischen Drucks vom statischen Druck p in der Strömung. Für näherungsweise inkompressible Strömung (Ma < 0,2) können daher Bohrungskoeffizienten

$$k_i = \frac{p_i - p}{\rho w^2 / 2} \quad i = 1, 2, 3 \tag{1}$$

definiert werden, die dimensionslose Druckdifferenzen darstellen. Mit der Dreilochsonde können Strömungswinkel, Totaldruck und statischer Druck einer ebenen Strömung gemessen werden. Die Zuordnung dieser drei Größen zum Anströmwinkel $\Delta\beta$ erfolgt durch Kalibrierkoeffizienten. In der vorliegenden Arbeit wird die Definition von Treaster und Yocum [5] für den Richtungskoeffizienten k_{β} , den Totaldruckkoeffizienten k_t und den statischen Druckkoeffizienten k_s , angepasst an eine Dreilochsonde, verwendet:

$$k_{\beta} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \overline{p}} = \frac{k_2 - k_3}{k_1 - \overline{k}}$$
(2)

$$k_{t} = \frac{p_{1} - p_{t}}{p_{1} - \overline{p}} = \frac{k_{1} - 1}{k_{1} - \overline{k}}$$
(3)

$$k_s = \frac{\overline{p} - p}{p_1 - \overline{p}} = \frac{\overline{k}}{k_1 - \overline{k}} \tag{4}$$

Durch

$$\overline{p} = \frac{p_2 + p_3}{2}$$
 bzw. $\overline{k} = \frac{k_2 + k_3}{2}$ (5)

sind ein mittlerer Druck bzw. ein mittlerer Bohrungskoeffizient definiert.







Experimentelle Kalibrierung

Die experimentelle Kalibrierung bei konstanter Geschwindigkeit erfolgt in einem Freistrahlwindkanal mit einem Düsendurchmesser von 120 mm. Die Sonde wird 130 mm stromab der Düse angeordnet und in einem Winkelbereich $\Delta\beta$ =±30° bei einer repräsentativen Sondenreynoldszahl $Re_d \approx 7400$ kalibriert. Die Sondenreynoldszahl Re_d wird mit der Zuströmgeschwindigkeit w und der charakteristischen Abmessung d der Sonde gebildet. Nähere Einzelheiten über die experimentelle Kalibrierung sind den Diplomarbeiten von Chondrokostas [1] und Lerena Diaz [4] zu entnehmen. Die Messdatenerfassung bei der experimentellen Kalibrierung der Sonde erfolgt mittels der Software LabVIEW (National Instruments).

Methode der Stromlinienprojektion

Zum Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen und den Resultaten der CFD-Simulation werden die Bohrungs- und Kalibrierkoeffizienten auch mit der Methode der Stromlinienprojektion berechnet. Diese einfache Methode beruht auf der Annahme, dass der Geschwindigkeitsvektor der Zuströmung auf die drei Bohrungen der Sonde projiziert wird. Die Geschwindigkeitskomponente normal auf die Oberfläche der Sonde liefert einen entsprechenden Anteil des dynamischen Drucks, der zum statischen Druck addiert wird und als Bohrungsdruck wirksam wird. Unter dieser Annahme folgt für die drei Bohrungskoeffizienten:

$$k_1 = \cos^2 \Delta \beta, \quad k_2 = \sin^2(\delta + \Delta \beta) \text{ und } k_3 = \sin^2(\delta - \Delta \beta).$$
 (6)

In weiterer Folge lassen sich aus den Gl. (2) bis (5) die Kalibrierkoeffizienten nach der Methode der Stromlinienprojektion ermitteln.

Numerische Simulation

Grundgleichungen

Zu lösen sind die Grundgleichungen für ebene, inkompressible Strömung (Ma < 0,2). Um den Einfluss der Reynoldszahl auf die Ergebnisse zu untersuchen, werden sowohl laminare als auch turbulente Berechnungen durchgeführt. Durch die Umströmung des stumpfen Sondenkopfes entsteht eine periodisch instationäre Strömung, die in den Grundgleichungen ebenfalls zu berücksichtigen ist.

Numerisches Lösungsverfahren, Finite-Elemente Netz

Die Lösung der Grundgleichungen erfolgt mittels der Methode der Finiten-Elemente unter Anwendung des Programmpakets FIDAP8.7.4 am Cluster für Strömungsdynamik und Finite-Elemente des ZID der TU Wien. Die implizite Zeitintegration (2. Ordnung) wird mit einem dimensionslosen Zeitschritt

$$\Delta t^* = \Delta t \frac{w}{d} = 0,1\tag{7}$$

durchgeführt. Nach einer bestimmten Einschwingdauer, die unter Umständen bis zu 3000 Zeitschritte betragen kann, stellen sich periodische Strömungszustände ein. Die auftretende Frequenz wird in dimensionsloser Form als Strouhalzahl bezeichnet und beträgt

$$Sr = \frac{fd}{w} \approx 0,136.$$
(8)

Dieser Wert entspricht praktisch der Strouhalzahl bei der Umströmung eines Zylinders mit quadratischem Querschnitt. Wie aus den Gl. (7) und (8) ersichtlich ist, wird eine Periode durch etwa 70 Zeitschritte aufgelöst. Turbulente Berechnungen werden mit einem einfachen algebraischen Turbulenzmodell unter Annahme einer konstanten Mischungsweglänge $l_m =$ 0,1*d* durchgeführt. Der Berechnungsbereich besteht aus einem Rechteck 38,5 *d* mal 25 *d* (Abb. 3). Die längere Seite des Rechtecks liegt parallel zu Hauptströmungsrichtung und der Eintrittsrand ist 15 *d* stromauf des Sondenkopfes angeordnet. Abbildung 4 zeigt das Finite-Elemente Netze in unmittelbarer Nähe des Sondenkopfes mit Berücksichtigung der Druckbohrungen. Die gesamte Knotenzahl eines Netzes beträgt etwa 24000. Der Durchmesser der Druckbohrungen beträgt 0,5 mm und ist im Vergleich zur charakteristischen Abmessung der Sonde d = 2,4 mm zu sehen.



Abbildung 3: Berechnungsbereich



Abbildung 4: Finite-Elemente Netz

Randbedingungen

Während an der Oberfläche des Sondenkopfes und in den Druckbohrungen generell die Haftbedingung gilt, wird am Austrittsrand des Rechengebietes immer ein konstanter statischer Druck vorgegeben ("Traction-Free Condition"). Im Abstand von 25 d normal zur Hauptströmungsrichtung weist das Rechengebiet Ränder mit periodischen Randbedingungen auf (Abb. 3). Die Eintrittsrandbedingungen werden entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung gewählt:

Konstante Reynoldszahl:

Am Eintrittsrand wird entsprechend einer Sondenreynoldszahl $Re_d = 7400$ die Zuströmgeschwindigkeit eingestellt. Die Richtung der Zuströmung wird zwischen $\Delta\beta = 0^{\circ}$ und $\Delta\beta = 30^{\circ}$ in Schritten von 5° variiert. Aufgrund der Symmetrie brauchen negative Strömungswinkel nicht gesondert berücksichtigt werden.

Variable Reynoldszahl:

Für eine Anströmung mit $\Delta\beta = 0^{\circ}$ ("abgeglichene Sonde") werden am Eintrittsrand verschiedene Zuströmgeschwindigkeiten vorgegeben, sodass eine Bereich für die Sondenreynoldszahl $Re_d = 750$ bis 13000 abgedeckt wird.

Konvergenz und Rechenzeiten

Sämtliche Berechnungen, einschließlich Pre- und Postprocessing, werden am Cluster für Strömungsdynamik und Finite-Elemente abgewickelt. Als Gleichungslöser wird in FISOLV der segregated iterative Löser verwendet. Die Berechnung für einen Zeitschritt gilt als konvergiert, wenn der relative Fehler 0,0001 unterschreitet. Typische Rechenzeiten für 1500 Zeitschritte betragen etwa 7 h (laminar) bis 15 h (turbulent). Da für die anschließende Auswertung für jeden Zeitschritt alle Strömungsgrößen abgespeichert werden müssen, entstehen Dateien mit einer Größe von etwa 2 GB. Zur Auswertung der zeitlichen Verläufe der Strömungsgrößen wird die Software IDL (Research Systems Inc.) verwendet.

Ergebnisse

Die Abb. 5 bis 7 zeigen die Bohrungskoeffizienten k_1 , k_2 und k_3 in Abhängigkeit des Strömungswinkels $\Delta\beta$ für eine Sondenreynoldszahl $Re_d = 7400$. Der Bohrungskoeffizient k_1 (Abb. 5) wird durch die Methode der Stromlinienprojektion im Vergleich zur Messung gut wiedergegeben. Die Ergebnisse der CFD-Simulationen zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit der Messung. Erwartungsgemäß sind die Unterschiede zwischen laminarer und turbulenter Berechnung gering, da der Druck an der Bohrung "1" relativ unabhängig von Reibungseffekten ist.

Bei den Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 ergeben sich teilweise erhebliche Unterschiede zwischen der Messung, der Methode der Stromlinienprojektion und den CFD-Simulationen (Abb. 6 und 7). Deutliche Differenzen ergeben sich vor allem bei den leeseitigen Bohrungskoeffizienten. Das sind k_2 bei $\Delta\beta$ <0° und k_3 bei $\Delta\beta$ >0°. Die CFD-Simulationen liefern an diesen Flanken des Sondenkopfes massive Ablösungen und daher deutlich zu geringe Bohrungskoeffizienten. Mit Ausnahme von $\Delta\beta = \pm 15^{\circ}$ liefert die laminare Rechnung im Vergleich zur turbulenten Rechnung kleinere Werte für k_2 bzw. k_3 . Im Vergleich zur turbulenten Rechnung zeigt die laminare Rechnung größere Ablösegebiete. Die leeseitigen Bohrungskoeffizienten werden durch die Methode der Stromlinienprojektion deutlich zu hoch berechnet. Da dieses Verfahren keine Strömungsablösung zulässt, ergeben sich in jedem Fall positive Werte für die Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 .



Abbildung 5: Bohrungskoeffizienten k₁

1.0

0.8

0.6 0.4

0.2 0.0

-0.2

-0.4

-0.6

-0.8

-1.0

-30

-20

 $\overline{}$

Bohrungskoeffizient k2



Abbildung 8: Richtungskoeffizienten k_β



Abbildung 6: Bohrungskoeffizienten k₂

0

Strömungswinkel $\Delta\beta$ [°]

-10

Messung

10

CFD (laminar)

CFD (turbulent)

20

30

Stromlinienprojektion

Abbildung 9: Totaldruckkoeffizienten kt



Abbildung 7: Bohrungskoeffizienten k₃



20

30

Für die praktische Anwendung der pneumatischen Strömungssonde sind die Kalibrierkoeffizienten k_{β} , k_t und k_s von Interesse, die für die Sondenreynoldszahl $Re_d = 7400$ in den Abb. 8 bis 10 dargestellt sind. Eine relativ gute Übereinstimmung zwischen der Messung, der Methode der Stromlinienprojektion sowie der CFD-Simulation liegt beim Richtungskoeffizienten k_{β} und beim Totaldruckkoeffizienten k_t vor. Durch die laminare CFD-Simulation wird die Richtungsempfindlichkeit der Sonde im Bereich $-10^{\circ} < \Delta\beta < 10^{\circ}$ stark überbewertet. Deutliche Abweichungen zwischen den verschiedenen Verfahren ergeben sich beim statischen Druckkoeffizienten k_s (Abb. 10). Entsprechend Gl. (4) geht dort die Summe der Bohrungskoeffizienten k_2 und k_3 in den Zähler ein, die sowohl durch die Methode der Stromlinienprojektion als auch durch die CFD-Simulationen nur mangelhaft wiedergegeben wird.

Für die abgeglichene Sonde $(p_2 - p_3 = 0)$ wurde vom Sondenhersteller im Rahmen einer experimentellen Kalibrierung ein dynamischer Druckkoeffizient

$$k_d = \frac{p_t - p}{p_1 - p_2} = \frac{1}{k_1 - k_2}$$
(9)

bestimmt. Abbildung 11 zeigt das Ergebnis dieser experimentellen Kalibrierung im Geschwindigkeitsbereich w = 5 bis 85 m/s. Das entspricht einem Reynoldszahlbereich $Re_d = 800$ bis 13500. Man erkennt, dass der dynamische Druckkoeffizient mit steigender Geschwindigkeit bis etwa 20 m/s stark abfällt. Für Geschwindigkeiten w > 60 m/s ist der dynamische Druckkoeffizient praktisch konstant und entspricht etwa dem Wert der Stromlinienprojektion bei $\Delta \beta = 0$:

$$k_d = \frac{1}{\cos^2 \delta} = 1,33.$$
 (10)

Im Geschwindigkeitsbereich w = 20 bis 60 m/s treten starke Schwankungen des dynamischen Druckkoeffizienten k_d auf. Anzumerken ist weiters, dass in Abb. 11 bei den Messdaten zwischen steigender und fallender Geschwindigkeit w unterschieden wird. Zur Interpretation von Abb. 11 ist in Abb. 12 der dynamische Druckkoeffizient als Ergebnis der CFD-Simulationen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit dargestellt. Die laminare Rechnung ergibt einen abfallenden dynamischen Druckkoeffizienten mit steigender Geschwindigkeit. Der dynamische Druckkoeffizient der turbulenten Rechnung ist nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit und liegt stets über dem Niveau der laminaren Rechnung. Die Pfeile in Abb. 12 sollen andeuten, dass bei einer Steigerung der Geschwindigkeit, ausgehend von sehr kleinen Geschwindigkeiten, mit laminarer Strömung zu rechnen ist. Andererseits ist bei abnehmender Geschwindigkeit, ausgehend von hohen Geschwindigkeiten, eine turbulente Umströmung des Sondenkopfes zu erwarten. Damit können die starken Schwankungen des gemessenen dvnamischen Druckkoeffizienten in Abb. 11 im mittleren Geschwindigkeitsbereich als Folge einer Transition über eine laminare Ablöseblase an der Spitze des Sondenkopfes gedeutet werden.



Abbildung 11: Dynam. Druckkoeffizient k_d (Messung)

Abbildung 12: Dynam. Druckkoeffizient k_d (CFD-Simulation)

Schlussfolgerungen und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die Möglichkeit des Einsatzes der CFD-Simulation zur Vorausberechnung der Kalibrierkurven einer pneumatischen Dreilochsonde weiter untersucht. Grundsätzlich liefert die CFD-Simulation qualitativ richtige Ergebnisse. Unsicherheiten werden durch die Turbulenzmodellierung sowie durch die geometrische Abweichung der Geometrie des Sondenkopfes von der idealen Geometrie verursacht. Im mittleren Geschwindigkeits- bzw. Reynoldszahlbereich verursacht ein wechselnder Übergang von laminarer zu turbulenter Umströmung des Sondenkopfes starke Schwankungen im dynamischen Druckkoeffizienten. Diese Vorgänge werden derzeit im Rahmen einer Diplomarbeit experimentell weiter untersucht.

Literatur

[1] Chondrokostas C.: Calibration of Pneumatic Five-Hole Probes in the Free-Jet Wind Tunnel. Diplomarbeit, TU Wien (Dezember 2005)

[2] Dominy R.G., Hodson H.P.: In Investigation of Factors Influencing the Calibration of Five-Hole Probes for Three-Dimensional Flow Measurements. ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 513 - 519

[3] Lee S.W., Jun S.B.: Effects of Reynolds Number on the Non-Nulling Calibration of a Cone-Type Five-Hole Probe. ASME Paper GT2003-38147

[4] Lerena Diaz D.: Experimental Calibration of Three-Hole Pressure Probes with Different Probe Head Geometries. Diplomarbeit, TU Wien (September 2003)

[5] Treaster A.L., Yocum A.M.: The Calibration and Application of Five-Hole Probes. ISA Transactions, Vol. 18, No. 3, pp. 23 – 34 (1979)

[6] Willinger R., Haselbacher H.: A Three-Hole Pressure Probe Exposed to Velocity Gradient Effects – Experimental Calibration and Numerical Simulation. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03), Budapest, Hungary (September 3 – 6, 2003)

[7] Willinger R.: A Three-Hole Pressure Probe Exposed to Wall Proximity Effects: Experimental, Numerical and Analytical Investigation. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'06), Budapest, Hungary (September 6 - 9, 2006)