

- BACKGROUND ORIENTED SCHLIEREN - MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DES OPTISCHEN VERFAHRENS ZUR QUANTITATIVEN DICHTEGRADIENTENBESTIMMUNG

T. Nafz, M. Ochs, H.-J. Bauer
Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstr.12, 76128 Karlsruhe
Deutschland

ABSTRACT

To measure density gradients in airflows no commercially available solutions exist. Common methods of measuring density gradients in gaseous media are Mach-Zehnder interferometry and differential interferometry. Those methods are to be manually built up of many expensive optical components which have to be adjusted properly. Another less complex way to measure density gradients is the long known Schlieren technique. An extension of this method is the Background-Oriented-Schlieren method which was first published in a patent of G.E.A Meier in 1999 [6]. This method uses computer algorithms to quantitatively evaluate measurements and benefits from the fast development of computer resources. Since then, many papers were published about BOS, which underline the power of this technique. Nevertheless a detailed description of how the different set-up parameters influence the quality of the BOS method was not found, though this knowledge is essential for quantitative measurements.

In this research the different set-up parameters of the BOS are identified and their influence on the quality of the measurement results is assessed. The optimized measurement technique is validated by measuring a known density gradient field, realised by a thermal boundary layer of a heated copper surface. The measurement results are compared to the analytical solution. The verified BOS set-up is then applied to a transonic airflow around a turbine blade in a wind tunnel test section. The measured density gradients by BOS are used to determine the absolute density which is compared to values derived by static pressure measurements.

1. EINLEITUNG

Der Wunsch nach immer höheren Leistungsdichten von Flugtriebwerken bei gleichzeitiger Erhöhung des Wirkungsgrades führt zur Anhebung des Gesamtdruckverhältnisses in Verbindung mit einer höheren Turbineneintrittstemperatur. Bauteile, die der Heißgasströmung ausgesetzt sind, müssen daher filmgekühlt werden. Die Erhöhung der Leistungsdichte bringt zusätzlich einen höheren spezifischen Arbeitsumsatz pro Turbinenstufe mit sich, was zu transsonischen Strömungszuständen führen kann. Das supersonische Abströmgebiet ist hierbei durch schräge Verdichtungsstöße geprägt, die sich an der Hinterkante der Schaufeln bilden. Der druckseitige

Verdichtungsstoß interagiert mit dem Kühlfilm auf der Saugseite des benachbarten Profils.

Am *Institut für Thermische Strömungsmaschinen* wird die Interaktion zwischen einem schrägen Verdichtungsstoß und einem Kühlfilm hinsichtlich des aerothermischen Verhaltens in einem generischen Versuchsaufbau experimentell untersucht [9]. Das Wissen um das vorliegende Strömungsfeld ist hierbei essentiell. Bislang wurden Mach-Zahl Verteilungen anhand von statischen Druckmessungen entlang der Messoberfläche ermittelt. Ein Schlierenaufbau ermöglichte eine qualitative Aussage über die wandfernen Bereiche, sowie die Stoß-Kühlfilminteraktion. Für ein besseres Verständnis ist allerdings eine quantitative Information über die vorliegenden Dichtegradienten von großem Vorteil. Hierfür bietet sich das „Background Oriented Schlieren“ (BOS) an, eine 1999 von Meier [6] zum Patent angemeldete Messtechnik, welche eine quantitative Bestimmung von Dichtegradienten in zweidimensionalen Strömungen ermöglicht.

Diese Messtechnik wurde in ihren Grundzügen von Richard u. a. [12] und Meier [7] beschrieben und fand bereits mehrfach Anwendung. So wurde das BOS zur Untersuchung der Strömung einer Überschalldüse, sowie zur Untersuchung von Wirbeln an Helikopter-Rotorblättern im Schwebeflug angewandt [12]. Weiterhin wurde das BOS bereits zur Analyse von Randwirbeln an einer Flügelspitze [3] und zur Untersuchung eines Dichtegradientenfeldes hinter einem umströmten Zylinder für verschiedene Reynoldszahlen [11] eingesetzt. Zur Helium-Luft Konzentrationsmessung innerhalb einer Helium-Gasfahne [3], sowie für die Untersuchung von Überschallströmungen in einer Turbinenstufe [5] wurde das BOS ebenfalls verwendet. Quantitative Anwendungen des BOS wurden bei der Untersuchung einer Überschallströmung an einem achsensymmetrischen Kegel [17] und einer transsonischen Strömung um einen zweidimensionalen Keil [1] realisiert. Weiterhin wurde das Verfahren zur Untersuchung von Stoss-Wirbelinteraktionen an unterschiedlichen Flugkörpern verwendet [4]. Eine systematische Untersuchung der Einflussparameter wurde jedoch nicht gefunden. Das Wissen um den Einfluss der Systemkomponenten hinsichtlich der Leistungsfähigkeit des Verfahrens ist für die quantitative Analyse jedoch essentiell.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst die Grundlagen des BOS beschrieben, die relevanten Einfluss-

parameter identifiziert und systematisch anhand von ausgewählten Experimenten quantifiziert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um das System hinsichtlich seiner Genauigkeit zu optimieren und an einem bekannten Referenzfall zu validieren. Abschließend werden Messungen am transsonischen Wärmeübergangskanal des Instituts vorgestellt.

2. FUNKTIONSWEISE DES BOS-VERFAHRENS

Änderungen der Dichte ρ von Luft führen zu einer Änderung des Brechungsindex n nach Gl. (1) [14]:

$$(1) \quad n - 1 = G \cdot \rho$$

Im Bereich des sichtbaren Lichtes kann die mittlere Gladstone-Dale Konstante $G = 227,47 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ mit einem maximalen Fehler von 1,45% angegeben werden. Aufgrund der Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit dem Brechungsindex werden Lichtstrahlen beim Durchlaufen von Dichtegradienten kontinuierlich abgelenkt. Für kleine Ablenkwinkel ($\varepsilon \approx \tan(\varepsilon)$) ergibt sich der folgende Zusammenhang [10]:

$$(2) \quad \varepsilon \approx \tan \varepsilon = \int_0^L \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz$$

In zweidimensionalen Schlierenobjekten ($n \neq n(z)$), reduziert sich der Ablenkwinkel in x- und y-Richtung zu:

$$(3) \quad \varepsilon_x \approx \frac{L}{n} \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \varepsilon_y \approx \frac{L}{n} \frac{\partial n}{\partial y}$$

Das Background Oriented Schlierenverfahren (BOS) beruht auf dieser Strahlablenkung. Die wesentlichen Vorteile des BOS gegenüber konventionellen Methoden, wie der Mach-Zehnder-Interferometrie, Differentialinterferometrie oder der konventionellen Schlierenmethode, sind der robuste optische Aufbau und die computer-basierte quantitative Auswertung der Messergebnisse. Des Weiteren können Dichtegradienten in x- und y-Richtung mit einer einzigen Messung erfasst werden.

2.1. Optischer Aufbau

Der optische Aufbau des BOS-Verfahrens besteht aus einem beleuchteten Hintergrund, einem idealerweise zweidimensionalen Schlierenobjekt und einer Digitalkamera mit geeignetem Objektiv (Bild 1).

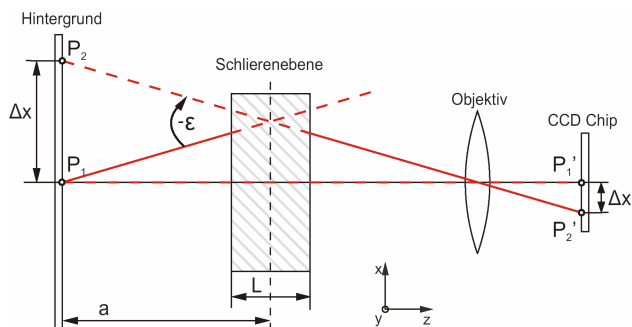


Bild 1. Optischer Aufbau des BOS-Verfahrens

Für eine Messung wird ein Referenzbild ohne Schlierenobjekt und ein Schlierenbild mit Schlierenobjekt aufgenommen. Aufgrund der Strahlablenkung durch Dichtegradienten erscheinen Bereiche des Schlierenbildes gegenüber dem Referenzbild verschoben. Entsprechend Bild 1 wird im ungestörten Bild Punkt P_1 auf P_1' abgebildet. Im von der Schliere gestörten Bild wird Punkt P_1 auf P_2' abgebildet. Im Schlierenbild erscheint P_1 somit um $\Delta x'$ auf dem Chip verschoben. Durch Korrelation des Schlierenbildes mit dem Referenzbild kann eine Verschiebung u in Kamerapixel detektiert werden. Um die tatsächliche Verschiebung Δx auf dem Hintergrund in Metern berechnen zu können, muss der Umrechnungsfaktor des Hintergrundes M_H in m/Pixel bekannt sein. Der Ablenkwinkel ε kann danach durch

$$(4) \quad \varepsilon = -\frac{\Delta x}{a} = -\frac{u \cdot M_H}{a}$$

ermittelt werden. Über Gl. (3) kann so die Änderung des Brechungsindex $\partial n / \partial x$ und mit Gl. (1) schließlich der Dichtegradient $\partial \rho / \partial x$ der Schliere berechnet werden.

2.2. Bildanalyse

Um die Verschiebungen im Schlierenbild gegenüber dem Referenzbild zu ermitteln, werden diese in Analysefelder aufgeteilt und durch einen Algorithmus verglichen. Für die Charakterisierung der Übereinstimmung hat sich der euklidische Abstand $d_E^2(x, y)$ bewährt [15]. Es handelt sich hierbei um die Summe der quadratischen Abstände zwischen der Intensitätsfunktion S des Schlierenbildes und R des Referenzbildes.

$$(5) \quad d_E^2(x, y) = \sum_{(i,j)} [S(i+x, j+y) - R(i, j)]^2$$

Hierbei sind x und y die Laufkoordinaten in Richtung der Koordinaten der Bildmatrix (i, j) . Wird der euklidische Abstand minimiert, so sind x und y an dieser Stelle die gesuchten Verschiebungen u und v des Analysefeldes in i - und j -Richtung. Unter der Annahme gleichverteilter Signalenergie S im Schlierenbild, ist zur Minimierung von $d_E^2(x, y)$ nur noch die Kreuzkorrelation $C(x, y)$ in wertediskreter Form zu maximieren (Gl. (7)).

$$(6) \quad C(x, y) = \sum_{(i,j)} [S(i+x, j+y) \cdot R(i, j)]$$

Die Kreuzkorrelation wird auf alle Analysefelder angewandt, so dass schließlich ein äquidistantes Gitter entsteht, welches für jedes Gitterfeld eine Verschiebung enthält. Mit diesem Algorithmus können prinzipiell Verschiebungen um ganzzahlige Pixellängen detektiert werden, Verschiebungen im Subpixelbereich werden durch eine statistische Abschätzung ermittelt [16]. Der Bildvergleich durch Kreuzkorrelation findet sehr häufig Anwendung in der Particle Image Velocimetry (PIV) und wird im Folgenden auch als PIV-Algorithmus bezeichnet.

3. EINFLUSS DES OPTISCHEN AUFBAUS

Wesentliche Parameter des optischen Aufbaus sind die Gestaltung des Hintergrundes, sowie die Wahl der Kamera und der Beleuchtung. Das verwendete Objektiv und die geometrischen Abstände der optischen Komponenten wirken sich entscheidend auf die Sensitivität des Verfahrens aus.

3.1. Wahl des Hintergrundes

PIV-Algorithmen zum Bildvergleich beruhen auf der Übereinstimmung von Grauwertverteilungen zwischen Referenz- und Schlierenbild. Eine sich wiederholende Grauwertverteilung im Hintergrundbild ist zu vermeiden, da diese zu einem Maximum in der Kreuzkorrelation führt, und somit das Ergebnis verfälschen kann. Eine ideale Gleichverteilung von Grauwerten ist deshalb Voraussetzung. Um den gesamten Dynamikbereich der Kamera zu nutzen, sollte der Hintergrund so gewählt werden, dass in den Schlieren- und Referenzbildern Grauwerte zwischen weiß (255) und schwarz (0) vorhanden sind. Da die Auflösung der Kamera die Matrizengröße der zu vergleichenden Bilder vorgibt, muss die Auflösung des Hintergrundes an die der Kamera angepasst werden. Zur Bestimmung einer optimalen Hintergrundauflösung wird im Folgenden mit der dimensionslosen Kennzahl KHV (Kamerapixel zu Hintergrundpixel Verhältnis) gearbeitet. In MatLab wurden Schwarz-Weiß-Bilder mit statistisch gleichverteiltem Muster (Bild 2) der KHV=1, 4, 16, 36, 100 erstellt.



Bild 2. Ausschnitt aus einem generisch erzeugten binären Rauschbild

Die so erstellten Hintergrundbilder wurden mit einer Spiegelreflexkamera des Typs Nikon D100 fotografiert und die Intensitätsverteilung anhand der unkomprimierten digitalen Bilder analysiert (Bild 3,4,5).

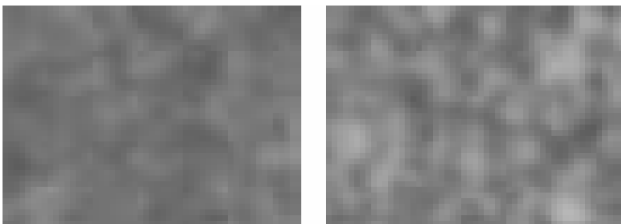


Bild 3. Fotografien: KHV=1 (li.), KHV=4 (re.)

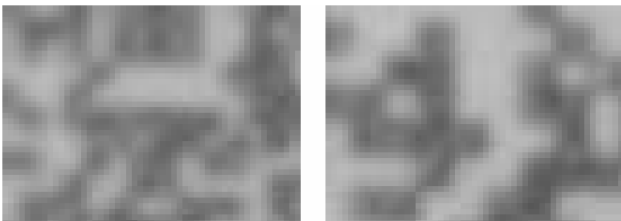


Bild 4. Fotografien: KHV=16 (li.), KHV=36 (re.)

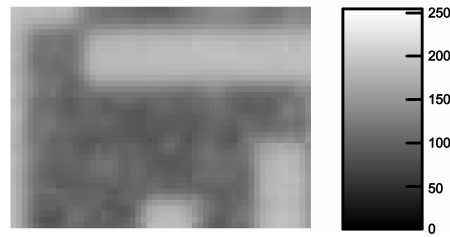


Bild 5. Fotografie: KHV=100 (li.), Skalierung (re.)

Durch die Fotografie der binären Hintergrundbilder erfolgt eine Unterteilung des Übergangsbereiches zwischen schwarzen und weißen Pixeln in Grauwerte. Dieser Bereich ist umso differenzierter, je mehr Kamerapixel für ein Hintergrundpixel zur Verfügung stehen. So zeigt das Bild des Hintergrundes mit KHV=1 kaum Kontraste und erscheint einheitlich grau. Bei den Bildern der Hintergründe mit KHV=36 und KHV=100 sind die Pixel auf dem Hintergrundbild so groß, dass Verschiebungen innerhalb dieser Gebiete nur schlecht ermittelt werden können. Die Bilder mit KHV=4 und KHV=16 zeigen ein fein verteiltes Muster mit guter Ausnutzung der Grauwertpalette.

Um eine quantitative Aussage über das optimale KHV treffen zu können, wurden die bedruckten Hintergründe auf eine Aluminiumplatte aufgeklebt, welche gemäß Bild 6 verschiebbar auf einer Optikschiene befestigt wurde.

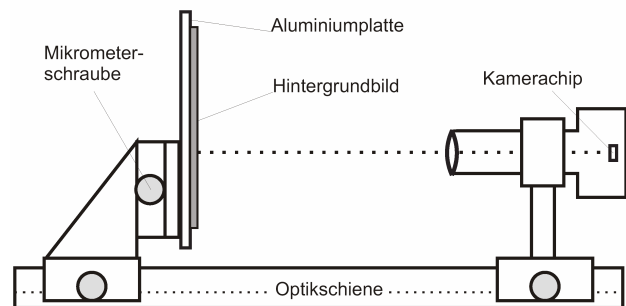


Bild 6. Versuch zur Ermittlung des optimalen KHV

Die digitale Spiegelreflexkamera (Nikon D100) wurde ortsfest gehalten, während die Aluminiumplatte über eine Mikrometerschraube senkrecht zur Optikschiene um diskrete Beträge verschoben wurde, so dass eine PIV-Auswertung an allen Stellen auf dem Hintergrund den gleichen Verschiebungsbetrag ermitteln müsste. Um Verzerrungen am Bildrand zu minimieren, wurde in dieser Arbeit ein Objektiv der festen Brennweite 200mm des Typs Nikon Micro 200mm/4 verwendet. Um die Verzerrungen dieses Objektivs, für eine eventuelle digitale Korrektur quantifizieren zu können, wurde das Objektiv in einem Vorversuch auf Verzerrungen überprüft. Durch das Objektiv wurden keine Verzerrungen hervorgerufen, so dass keine Verzerrungskorrektur notwendig war.

Die Größe der Bildausschnitte, sowie die Analysefeldgröße und die Überlappung wurden für alle KHV so eingestellt, dass jeweils 3600 Messpunkte errechnet wurden. Auf diese Weise konnte eine sichere statistische Aussage bezüglich des Einflusses der verschiedenen KHV getroffen werden. Die so aufgenommenen Bilder wurden mit einem PIV-

Algorithmus ausgewertet und deren Standardabweichung berechnet. Bild 7 zeigt die für jede Verschiebung und jeden Hintergrund berechneten relativen Standardabweichungen logarithmisch über den Verschiebungswerten aufgetragen.

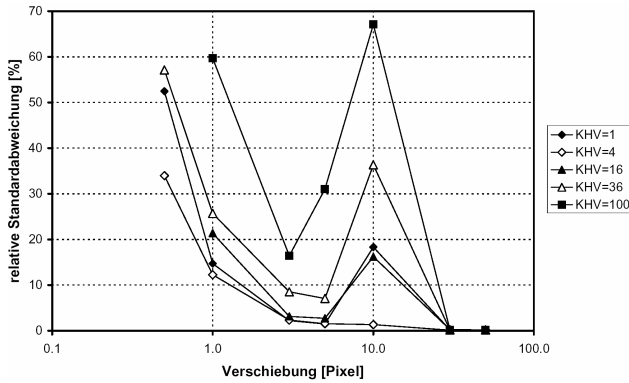


Bild 7. Relative Standardabweichung der ermittelten Verschiebungen bei verschiedenen KHV

Der Hintergrund mit KHV=4 führt bei allen Verschiebungen zu der geringsten Standardabweichung, weshalb dieses Hintergrundverhältnis für die folgenden Versuche verwendet wurde. Der Verlauf der relativen Standardabweichung für KHV=4 zeigt, dass größere Verschiebungen mit einer höheren Sicherheit detektiert werden als kleinere. Verschiebungen unterhalb einer ganzen Pixellänge konnten nur sehr unsicherheitsbehaftet detektiert werden.

3.2. Sensitivität

Der PIV-Algorithmus kann nur Verschiebungen in einem bestimmten Pixelbereich mit vertretbarer Genauigkeit detektieren, wobei die zu messende Verschiebung nicht größer sein darf als eine halbe Analysefeldlänge. Daher müssen die zu erwartenden Dichtegradienten vor einer BOS-Messung abgeschätzt und die Sensitivität des optischen Aufbaus entsprechend angepasst werden. In vorhergehenden Untersuchungen lieferten Analysefelder der Dimension (64x64)Pixel die besten Ergebnisse. Die maximal erkennbare Verschiebung beträgt hierfür 32 Pixellängen. Aus Gl. (1) und Gl. (3) ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Dichtegradient und Ablenkwinkel:

$$(7) \quad \varepsilon = \frac{L}{G \cdot \rho + 1} \cdot G \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

Hierbei ist $\rho = \rho(x, y)$ die Dichte an der jeweiligen Stelle (x, y) und somit nicht konstant. Bei 20°C und 1 bar ($\rho_{\text{Luft}} = 1,188 \text{ kg/m}^3$) beträgt $G \cdot \rho + 1 = 1,00027$, so dass der Term mit einem Fehler von 0,027% zu 1 gesetzt und der vereinfachte Zusammenhang

$$(8) \quad \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\varepsilon}{L \cdot G}$$

verwendet werden kann. Die Sensitivität S eines optischen BOS-Aufbaus ergibt sich mit Gl. (4) zu:

$$(9) \quad S = \frac{u}{\partial \rho / \partial x} = - \frac{L \cdot G \cdot u}{\varepsilon} = - \frac{a \cdot L \cdot G}{M_H}$$

Für ein zu vermessendes Schlierenobjekt mit gegebener Durchlaufänge L , sowie mittlerer Gladstone-Dale Konstante G für weißes Licht und vorgegebenem Ausschnitt ist die Sensitivität nach Gl. (9) lediglich durch die geometrischen Größen a und M_H des optischen Aufbaus beeinflussbar. Die Sensitivität nimmt mit steigendem Abstand a der Schliere zum Hintergrund und sinkendem Abbildungsverhältnis des Hintergrundes M_H zu. Diese beiden Größen sind gemäß Bild 8 jedoch voneinander abhängig.

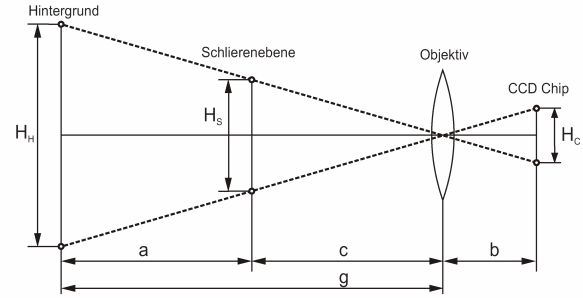


Bild 8. Geometrie des optischen BOS-Aufbaus

Das Hintergrund-Abbildungsverhältnis M_H errechnet sich aus dem Quotient der Höhe H_H des fotografierten Ausschnittes und der Anzahl Pixel n_y des CCD-Chip in vertikaler Richtung.

$$(10) \quad M_H = \frac{H_H}{n_y}$$

Die Höhe des Hintergrundausschnittes H_H ist über

$$(11) \quad H_H = \frac{a + c}{b} H_C$$

von den geometrischen Abständen a und c , der Bildweite b , sowie von der geometrischen Höhe H_C des CCD-Chips abhängig. Der Abstand c vom Objektiv zur Schlierenebene bestimmt den sichtbaren Ausschnitt aus der Schlierenebene und damit den messbaren Bereich des Schlierenobjektes, der für ein zu messendes Objekt meist vorgegeben ist. Die Bildweite b errechnet sich aus der Linsengleichung und der Brennweite f zu

$$(12) \quad b = \frac{f \cdot (a + c)}{a + c - f}$$

so dass sich für die Sensitivität des optischen Aufbaus S

$$(13) \quad S = - \frac{a \cdot L \cdot G \cdot f \cdot n_y}{(a + c - f) \cdot H_C}$$

ergibt. Die Werte für L , G , n_y , c und H_C sind i.d.R. vorgegeben. Die wesentlichen Einflussparameter der Sensitivität sind daher die Brennweite f des Objektivs, sowie der Abstand a zwischen Hintergrund und Schlierenebene. Die Abstufungen der erhältlichen Objektive mit fester Brennweite sind für eine Feinabstimmung zu grob. Daher wurde die Vorauslegung der Sensitivität über die Objektivbrennweite abgeschätzt und die Feineinstellung durch Variation des Abstandes a realisiert. Bei der Vorauslegung muss bei größerer Brennweite des Objektivs und gleich bleibendem Ausschnitt jedoch der Abstand c vergrößert werden.

4. VALIDIERUNG AN EINER THERMISCHEN GRENZSCHICHT

Um das BOS-Messverfahren zu validieren wurde ein Schlierenobjekt mit bekannten Dichtegradienten verwendet. Hierfür wurde eine laminare Temperaturgrenzschicht an einer ebenen vertikalen Platte gewählt. Um eine konstante Oberflächentemperatur realisieren zu können wurde ein elektrisch beheizter Kupferblock verwendet. Das Dichtegradienten- und Temperaturfeld wurde vermessen und mit analytisch berechneten Dichtegradienten und Temperaturen verglichen.

4.1. Laminare Temperaturgrenzschicht an einer ebenen Platte

An einer vertikal orientierten, halb unendlich ausgedehnten ebenen Platte mit homogener Oberflächentemperatur, entsteht aufgrund der treibenden Temperaturdifferenz ein konvektiver Wärmeübergang zwischen Oberfläche und umgebender Luft. Die Grenzschichtdicke δ der laminaren Strömungsgrenzschicht kann durch Gl. (14) beschrieben werden [2].

$$(14) \quad \frac{\delta}{x} = 3,93 \cdot \left(\frac{0,952 + \text{Pr}}{\text{Pr}^2} \right)^{1/4} Gr_x^{-1/4}$$

Die Grashof-Zahl in x-Richtung errechnet sich gemäß:

$$(15) \quad Gr_x = \frac{g \cdot \beta \cdot x^3 \cdot (T_0 - T_\infty)}{\nu^2}$$

Hierbei ist β der thermische Ausdehnungskoeffizient von Luft, T_0 die Oberflächentemperatur der Platte, T_∞ die Umgebungstemperatur und ν die kinematische Viskosität der Luft. Der Temperaturverlauf innerhalb der Grenzschicht kann damit über

$$(16) \quad \frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2$$

bestimmt werden. Bild 9 zeigt die durch obige Gleichungen berechnete Grenzschichtdicke über der Höhe x einer Platte aufgetragen, sowie den Temperaturverlauf innerhalb der Grenzschicht

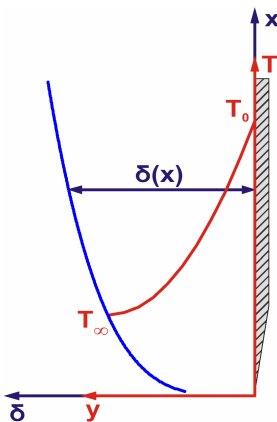


Bild 9. Laminare Grenzschichtdicke und Temperaturverlauf an einer ebenen Platte

Unter Verwendung der idealen Gasgleichung und der Gln. (14-16) können analytische Dichtegradientenfelder für beliebige Oberflächentemperaturen berechnet und mit den Messungen verglichen werden.

4.2. Versuchsaufbau

Der oben beschriebene Referenzfall wurde unter Verwendung eines Hintergrundes mit KHV=4, einer digitalen Spiegelreflexkamera des Typs Nikon D100, einem Halogenstrahler und einem beheizbaren Kupferblock gemäß Bild 10 auf einem Optiktisch aufgebaut.

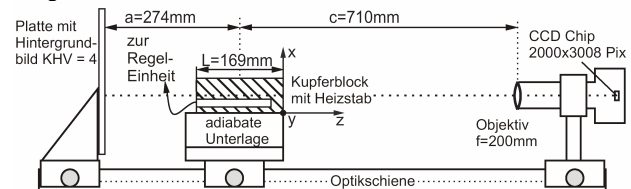


Bild 10. BOS - Aufbau zur Vermessung der laminaren Temperaturgrenzschicht an der Seitenfläche eines beheizten Kupferblocks

Der verwendete Kupferblock der Abmaße (169x75x60)mm wurde über einen Heizstab elektrisch aufgeheizt und dessen Temperatur über eine Regeleinheit konstant gehalten. Kupfer besitzt mit $\lambda=380\text{W/(mK)}$ eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, weshalb die Temperatur über die gesamte Oberfläche als homogen verteilt angenommen werden kann.

Die Abmaße des eingebauten CCD-Chips betrugen (23,7x15,6)mm, bei einer Auflösung von (3008x2000) Pixel. Als Dateiformat wurde das unkomprimierte Tagged Image File Format (tiff) gewählt. Die Lichtempfindlichkeit wurde auf den minimalen Wert von ISO 200 eingestellt. Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Bilder wurde ein manueller Weißabgleich voreingestellt und digitale Nachbearbeitungen wie Tonwertkorrektur und Farbsättigung deaktiviert.

Die treibende Temperaturdifferenz betrug $77,4^\circ\text{C}$, so dass der maximal zu erwartende Dichtegradient mit 90kg/m^4 abgeschätzt und die Sensitivität des optischen Aufbaus zu $S=-1/3 \text{ Pixel}\cdot\text{m}^4/\text{kg}$ gewählt wurde. Hierfür wurde ein Objektiv der festen Brennweite $f=200\text{mm}$ verwendet und die lange Seite des Kupferblocks als Lauflänge $L=169\text{mm}$ durch das Schlierenobjekt gewählt. Der auszuwertende Ausschnitt wurde so gewählt, dass ein Korrekturbereich enthalten war, dessen errechnete Verschiebung als Off-Set von allen gemessenen Verschiebungen abgezogen wurde. Hierdurch konnten eventuelle Dejustierungen des Aufbaus zwischen der Aufnahme der beiden Bilder korrigiert werden

4.3. Messung und Auswertung

Die Oberflächen- und Umgebungstemperaturen wurden durch Thermoelemente auf $\pm 0,5^\circ\text{C}$ genau gemessen. Zur Messung der Oberflächentemperatur wurde ein Thermoelement in die Oberfläche des Kupferblockes eingeklebt, während die Umgebungstemperatur über ein zweites Thermoelement bestimmt wurde. Der für die

spätere Auswertung benötigte Umgebungsdruck der Luft wurde über den Luftdruckserver des Instituts abgerufen. Die Umgebungstemperatur betrug $T_{\infty}=23,3^{\circ}\text{C}$ und der Umgebungsdruck $p_{\infty}=100361\text{Pa}$. Gemessen wurde eine Seite des Kupferblocks gemäß Bild 11. Der Bereich für die Verschiebungskorrektur, der ausgewertete Schlierenbereich und die Position des Kupferblocks sind zusätzlich gekennzeichnet.

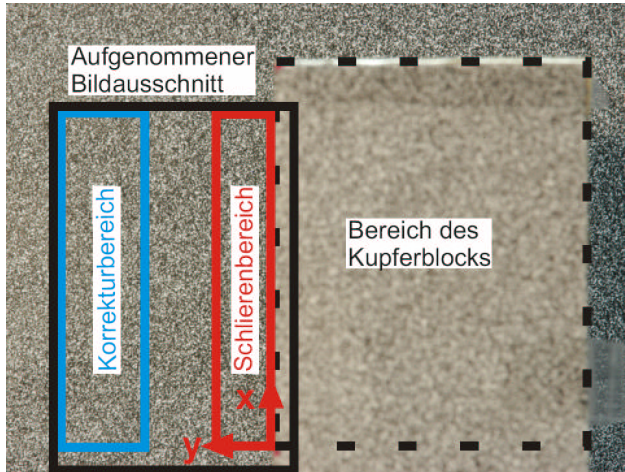


Bild 11. Aufgenommener Bildausschnitt und die ausgewerteten Bereiche

Für die Messung wurden ein Referenzbild ($T_0=T_{\infty}=23,3^{\circ}\text{C}$) und ein Schlierenbild bei der Oberflächentemperatur $T_0=100,7^{\circ}\text{C}$ aufgenommen. Für die Auswertung der Messergebnisse wurde die Sensitivität S über Gl. (9) mit Hilfe eines Maßstabes durch Auswertung der aufgenommenen Bilder bestimmt. Die Abbildungsmaßstäbe des Hintergrundes und der Schlierenebene betrugen $M_H=30,74 \cdot 10^{-6}\text{m/Pixel}$ und $M_S=20,98 \cdot 10^{-6}\text{m/Pixel}$. Basis für die Auswertung der Bildpaare bildete die MatPIV-Routine [15]. Diese kann in MatLab eingebunden werden und wurde zunächst anhand generisch verschobener Bildpaare auf ihre Genauigkeit überprüft. Der größte auftretende Fehler betrug 0,44% bei einer Verschiebung um eine Pixellänge. Die wesentlichen Einstellungen dieser PIV-Routine stellten die Analysefeldgröße und die Überlappung der Datenfelder dar, wobei die besten Ergebnisse der untersuchten Messfälle bei einer Analysefeldgröße von $(64 \times 64)\text{Pixel}$ und einer Überlappung von 93,75% erzielt wurden.

Die über die Menge aller Messpunkte gemittelte Verschiebung in y-Richtung des Korrekturbereichs von $u_{\text{Korr}}=0,17\text{Pixel}$ wurde von den ermittelten Verschiebungen des Schlierenbereiches subtrahiert. Die so entstandene Verschiebungsmatrix in y-Richtung des Schlierenbereiches wurde über Gl. (9) in eine Dichtegradientenmatrix in y-Richtung $\partial\rho/\partial y$ umgerechnet und über die x,y-Koordinaten des Kupferblocks aufgetragen. Um die Messwerte validieren zu können, wurde mit Hilfe der Gl. (14-16) eine analytische Dichtegradientenverteilung berechnet und im gleichen Koordinatensystem aufgetragen. Bild 12 zeigt die analytisch berechneten und Bild 13 die gemessenen Dichtegradienten.

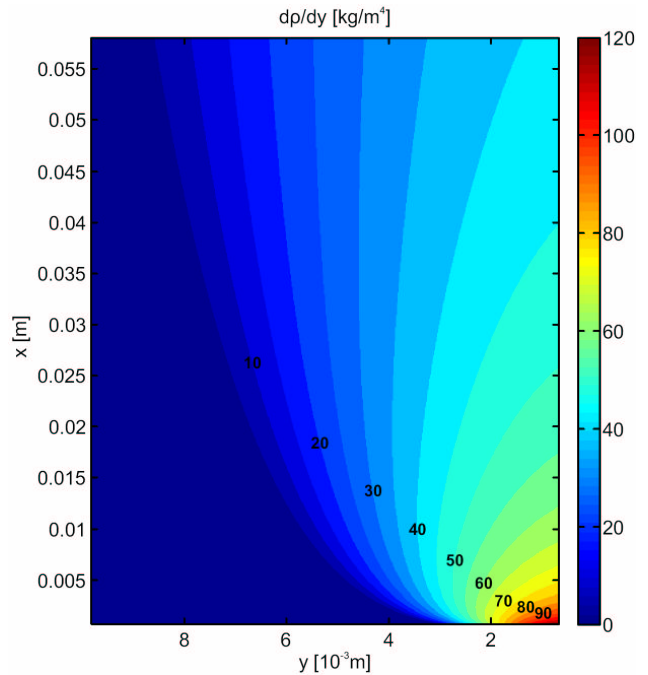


Bild 12. Analytisch berechnete Dichtegradienten in y-Richtung ($T_0=100,7^{\circ}\text{C}$)

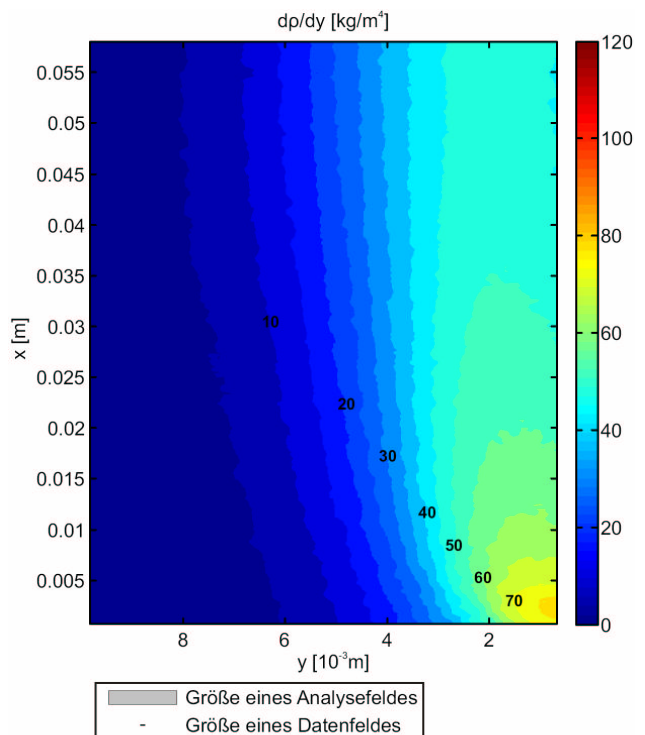


Bild 13. Gemessene Dichtegradienten in y-Richtung ($T_0=100,7^{\circ}\text{C}$)

Die Analysefeldgröße und die Größe eines Datenfeldes sind in Bild 13 exemplarisch dargestellt. Die dargestellten Dichtegradientenfelder bestehen jeweils aus einer Matrix von 685×110 Datenfeldern. Die Lauflänge in x-Richtung des Kupferblocks ist endlich, so dass sich an der Oberkante des Kupferblockes bereits eine Einschnürung einstellt. Weiterhin geht die analytische Lösung von einer infinitesimal dünnen Unterkante der Platte aus. Im aufgebauten Messfall besitzt der Kupferblock eine endliche Dicke, so dass die nahezu adiabate Unterlage

($\lambda=0,25\text{W}/(\text{mK})$) durch den Wärmeübergang an der Unterseite des Kupferblocks aufgeheizt wird und sich bereits ein Wärmeübergang an der Grenzfläche zwischen Unterlage und Umgebungsluft einstellt.

Um die berechneten und gemessenen Werte genauer vergleichen zu können, wurde eine Zeile in der Höhe $x=30\text{mm}$ aus den Dichtegradientenmatrizen extrahiert. Bild 14 zeigt den Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Dichtegradienten in dieser Höhe.

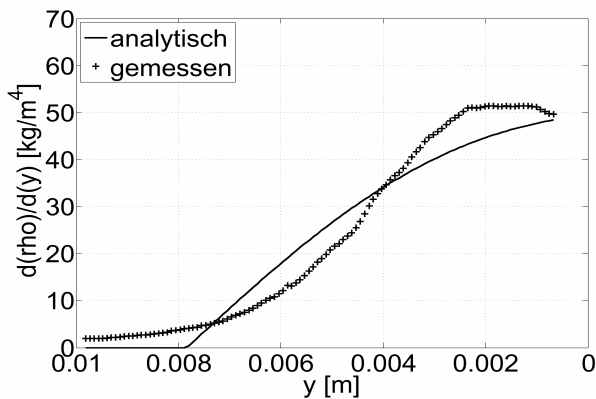


Bild 14. Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Dichtegradienten ($x=30\text{mm}$)

Um die Temperaturverteilung bestimmen zu können, wurde die gemessene Dichtegradientenmatrix durch die Euler Vorwärts Methode integriert und unter der Annahme eines idealen Gases in eine Temperaturverteilung überführt. Hierfür wurde der linke Rand der Datenmatrix mit der Umgebungstemperatur initialisiert und über den Dichtegradienten eines Datenfeldes die Temperatur des nächsten Datenfeldes bestimmt. Ein Vergleich der Messdaten mit den analytischen Werten ist in Bild 15 durch eine Gegenüberstellung des Temperaturverlaufes in der Höhe $x=30\text{mm}$ dargestellt.

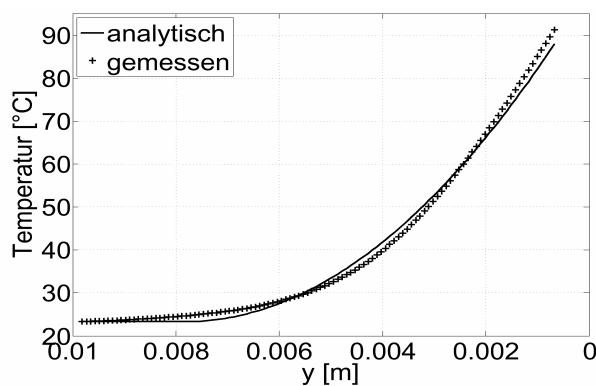


Bild 15. Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen ($x=30\text{mm}$)

Diese Messung verdeutlicht das Potential des BOS-Verfahrens. Der Dichtegradientenverlauf konnte gut dargestellt werden, wobei die Fehlerursachen überwiegend in den Differenzen zwischen dem aufgebauten Referenzfall und dessen theoretischer Beschreibung zu suchen sind. Die aus den Dichtegradienten durch Integration berechneten Temperaturen stimmen sehr gut mit den Analytischen

überein. Durch Interpolation des Temperaturverlaufes auf $y=0\text{mm}$ wurde die Oberflächentemperatur zu $377,3\text{K}$ bestimmt, was einem Fehler von $0,9\%$ entspricht. Eine quadratische Fehlerabschätzung gemäß

$$(17) \quad \Delta y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

ergibt sich zu

$$(18) \quad \Delta \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right) = \sqrt{0,0002 + 0,0084 \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)^2}$$

so dass die vorliegenden Messwerte unter Vernachlässigung des Anfangswertes im Allgemeinen mit einer Unsicherheit von $9,2\%$ behaftet sind.

5. MESSUNG EINER ÜBERSCHALLSTRÖMUNG

Das optimierte Messverfahren wurde am transsonischen Strömungskanal des *Institutes für Thermische Strömungsmaschinen* angewandt. Ein Mittelschnitt dieses Strömungskanals ist in Bild 16 abgebildet. Hierbei wurde Luft auf eine Geschwindigkeit von $\text{Ma} \approx 1,5$ beschleunigt und über eine abgewinkelte Turbinenschaufel geleitet. Wie im Schlierenbild zu sehen, breiten sich von der Schaufelhinterkante Verdichtungsstöße aus, die an der Grenzschicht der unteren Kanalwand reflektiert werden.

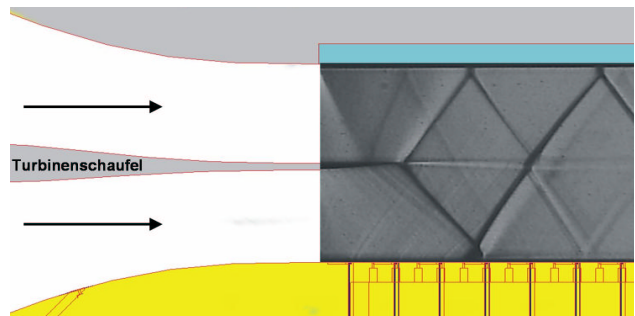


Bild 16. Mittelschnitt durch den Strömungskanal am Institut für Strömungsmaschinen und konventionelles Schlierenbild [9]

5.1. Versuchsaufbau

Der Strömungskanal verfügt über einen optischen Zugang über Seitenfenster, so dass das BOS-Verfahren gemäß Bild 17 aufgebaut werden konnte.

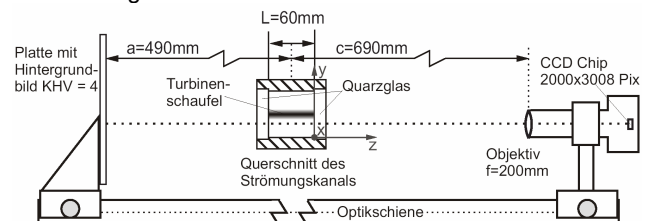


Bild 17. BOS-Aufbau zur Messung einer Überschallströmung in einem Strömungskanal

Durch die vorgenommenen Einstellungen wurde eine Sensitivität von $S=-0,167\text{Pixel}\cdot\text{m}^4/\text{kg}$ erreicht.

5.2. Messung und Auswertung

Die Auswertung des Referenzbildes ohne Strömung und des Schlierenbildes mit Strömung erfolgte analog zu Kap. 4.3 wobei jedoch keine Verschiebungskorrektur realisiert werden konnte. Bild 18 zeigt die gemessenen Dichtegradienten in Strömungsrichtung ($\partial\rho/\partial x$).

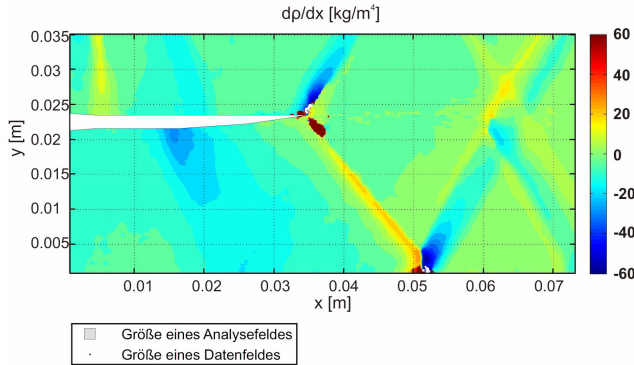


Bild 18. Dichtegradienten in x-Richtung ($Ma_{\max}=1,5$)

Die Größe eines Datenfeldes und eines Analysefeldes sind als Rechtecke gekennzeichnet. Die dargestellten Dichtegradientenfelder bestehen jeweils aus einer Matrix mit 350×737 Datenfeldern. Im Bereich der Schaufelspitze konnten in beide Achsrichtungen keine Dichtegradienten ermittelt werden, was vermutlich auf eine Verschmutzung der Quarzglasscheiben zurückzuführen ist.

Negative Dichtegradienten bedeuten eine Abnahme der Dichte und somit eine Beschleunigung der Strömung. Positive Gradienten bedeuten eine Verzögerung der Strömung in ausgewerteter Achsrichtung. Die Beschleunigung der Strömung zwischen der eingebauten Schaufel und der unteren Kanalwand ist deutlich zu erkennen. Inmitten dieser Beschleunigung ist, aufgrund des kontinuierlichen Überganges in den Überschall, eine von der Schaufel ausgehende Expansion zu erkennen. Zwischen der Schaufel und der oberen Kanalwand findet ebenfalls eine Beschleunigung statt. Hier ist deutlich eine von der Kanalwand ausgehende Verdichtung zu erkennen. Am Ende der Platte bildet sich ein rechtsdrehender Verdichtungsstoß, der sich schräg nach unten ausbreitet und an der Grenzschicht des Strömungskanals reflektiert wird. Nach der Reflektion des Stoßes zeigt sich ein Gebiet abnehmender Dichte, was wiederum auf eine Beschleunigung schließen lässt.

Die senkrecht zur Strömungsrichtung ausgewerteten Dichtegradienten $\partial\rho/\partial y$ sind in Bild 19 dargestellt. Hier sind die Strömungsgrenzschichten an der Schaufel, sowie an der unteren Kanalwand zu erkennen. Die Grenzschicht der oberen Kanalwand befindet sich außerhalb des aufgenommenen Bildbereiches. Der Nachlauf der Schaufel konnte ebenfalls sehr gut detektiert werden, wobei die Dichte zur Mitte des Nachlaufes hin abnimmt und von der Mitte nach außen zunimmt. Weiterhin sichtbar sind der Verdichtungsstoß, seine Reflektion an der Grenzschicht, sowie die nachfolgende Expansion. Diese Phänomene bewirken Dichtegradienten in beide Achsrichtungen und sind daher im Dichtegradientenfeld in x- und y-Richtung zu erkennen.

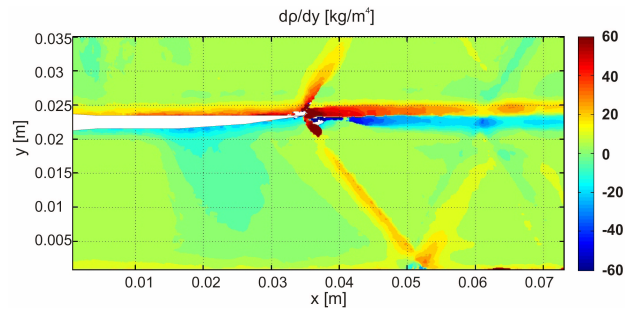


Bild 19. Dichtegradienten in y-Richtung ($Ma_{\max}=1,5$)

Bei dem durchgeführten Versuch wurden sowohl der Totaldruck $p_0=150\text{kPa}$, die Totaltemperatur $T_0=312,4\text{K}$ und die statischen Drücke p an verschiedenen Positionen der unteren Kanalwand gemessen. Über die Isentropenbeziehungen konnte somit die Dichte an den Druckmessstellen nach Gl. (19) berechnet werden.

$$(19) \quad \rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/k}$$

p_0 wurde über die ideale Gasgleichung aus T_0 und p_0 und der idealen Gaskonstanten von Luft $R=287\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ bestimmt. Die Dichteverteilung wurde über die Euler-Integrationsmethode berechnet. Hierfür sind ein Startwert und die Änderungen zum jeweils nächsten Datenpunkt notwendig. Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung des Verdichtungsstoßes konnten die Dichtegradienten innerhalb des Stoßes nicht quantitativ analysiert werden, weshalb eine Integration über den Stoß hinweg nicht möglich war. Daher wurden Startwerte vor und nach dem Verdichtungsstoß verwendet ($x_1=0,04\text{m}$, $x_2=0,065\text{m}$). Bild 20 zeigt den so bestimmten Dichteverlauf, sowie die durch statische Druckbohrungen gemessenen Werte.

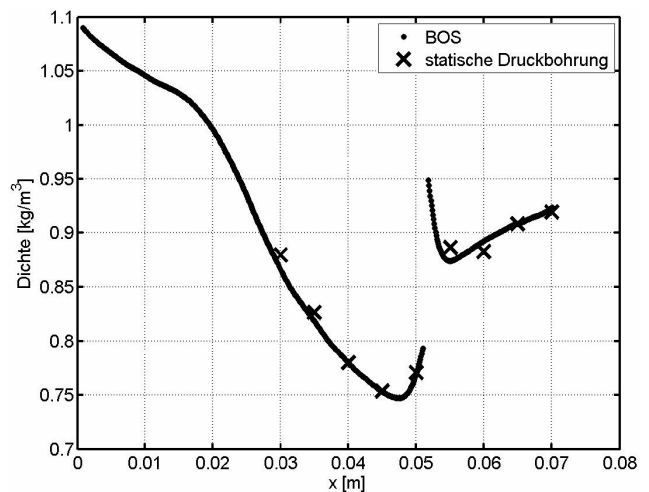


Bild 20. Dichteverlauf in der Höhe $y=2\text{mm}$

Die durch das BOS-Verfahren ermittelten Werte für die Dichte stimmen sehr gut mit den über Druckaufnehmer bestimmten Werten überein, was die Leistungsfähigkeit des BOS-Verfahrens verdeutlicht.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bei der Vermessung von Strömungen hinsichtlich Geschwindigkeits- und Dichteverteilungen wird gerne auf optische Verfahren zurückgegriffen, da diese als nichtinvasive Messtechniken das Strömungsfeld nicht verändern. Zur Bestimmung von Geschwindigkeiten haben sich die Lasermesstechniken LDV (Laser Doppler Velocimetry) sowie PIV (Particle Image Velocimetry) durchgesetzt. Dichtegradienten wurden bis vor kurzem meist aufwändig mit interferometrischen Verfahren bestimmt (Mach-Zehnder- bzw. Differential-interferometer). Eine neue Messtechnik zur quantitativen Bestimmung von zweidimensionalen Dichtegradienten wurde 1999 von Meier [6] vorgestellt - das Background Oriented Schlieren Verfahren (BOS), welches bei relativ geringem Aufwand gute Ergebnisse verspricht.

Am *Institut für Thermische Strömungsmaschinen* wird am transsonischen Wärmeübergangskanal der aerothermische Einfluss von Verdichtungsstößen auf Grenzschichten und Kühlfilmen an Turbinenschaufeln untersucht. Für eine bessere Charakterisierung des vorliegenden Strömungsphänomens sollte deshalb die Anwendbarkeit des BOS-Systems untersucht werden. Das BOS wurde bereits mehrfach als qualitatives Verfahren angewendet, wie etwa zur Visualisierung von Stoss-Wirbel-Interaktionen an Flugkörpern [4]. Quantitative Auswertungen der Dichtegradienten, z.B. einer Überschallströmung an einem achsensymmetrischen Kegel [17], wurden selten realisiert.

In der vorliegenden Arbeit wurden daher zunächst alle Systemparameter identifiziert und systematisch untersucht. Die Wahl des Bildhintergrundes und die Sensitivität des optischen Aufbaus stellten sich hierbei als die wichtigsten Parameter heraus. Als Hintergrund wurde ein Bild aus schwarzen und weißen Pixeln mit gleichverteiltem Rauschen erstellt und die dimensionslose Kennzahl KHV eingeführt. Diese gibt das Abbildungsverhältnis zwischen Hintergrundpixel und Kamerapixel an. Aufgrund der dimensionslosen Darstellung ist diese Größe auf beliebige Systemaufbauten anwendbar und ist essentiell für die Graustufenbildung der BOS-Bilder. Durch systematische Versuche hinsichtlich minimaler Standardabweichungen wurde ein Optimum bei $KHV=4$ gefunden. Aufgrund der rechnergestützten Auswertung der aufgenommenen Bilder müssen diese den Hintergrund möglichst scharf abbilden, sowie reproduzierbar und unverfälscht sein. Hierbei ergaben sich optimale Ergebnisse bei maximaler Tiefenschärfe sowie manuellem Weißabgleich. Weiterhin wurde die Notwendigkeit besonderer Vorkehrungen zur Prävention von Dejustierungen erkannt.

Es wurde außerdem experimentell festgestellt, dass kleinere Verschiebungen mit einer größeren relativen Unsicherheit behaftet sind als Größere, wobei die maximal detektierbare Verschiebung durch das verwendete Analysefeld restriktiert ist. Diese darf nicht größer sein als die halbe Kantenlänge N eines Analysefeldes. Die Sensitivität S des BOS-Aufbaus bestimmt die Größe der Verschiebungen und ist daher optimal gewählt, wenn die Verschiebungen den Dynamikbereich bis $N/2$ Pixel komplett ausnutzen. Um die

Sensitivität auf den Messfall anpassen zu können, wurde ein analytischer Zusammenhang gefunden, welcher die Sensitivität in Abhängigkeit der geometrischen Daten des BOS Aufbaus darstellt. Als wesentliche Parameter zur Veränderung der Sensitivität wurden hierbei die Brennweite des verwendeten Objektivs und der Abstand des Hintergrundes zum Schlierenobjekt identifiziert.

Basis für die Auswertung der Bildpaare bildete die MatPIV-Routine, die in MatLab integriert werden kann, so dass für die gesamte Auswertung der Bilder nur eine einzige Programmierplattform notwendig war. Die besten Ergebnisse konnten bei einer Analysefeldgröße von (64×64) Pixel und einer Überlappung von 0,9375 erzielt werden. Durch eventuelle Dejustierungen während der Messungen können sich Referenz- und Schlierenbilder verschieben, was zu einer Verfälschung der Messergebnisse führt. Durch die "Verschiebungskorrektur" konnten Fehler dieser Art wirksam behoben werden.

Das optimierte BOS-Verfahren wurde an einer analytisch beschreibbaren, laminaren thermischen Grenzschicht validiert. Die mittels BOS gemessenen Dichtegradienten zeigten bis auf kleinere Abweichungen sehr gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten. Ausgehend von der Dichte der Umgebung wurde das gemessene Dichtegradientenfeld aufintegriert und in ein Temperaturfeld überführt. Dieses stimmte sehr gut mit der analytischen Lösung überein. Die Temperatur der Kupferblockoberfläche konnte hierbei auf 0,9% genau bestimmt werden.

Abschließend wurde eine Überschallströmung am transsonischen Strömungskanal des *Instituts für Thermische Strömungsmaschinen* vermessen. Hierbei gelang es die Strömungsgrenzschichten, sowie Verdichtungsstöße und Expansionen in der Strömung sichtbar zu machen. Aus dem gemessenen Dichtegradientenfeld wurde anhand eines Startwertes der Dichteverlauf in der Freistromung berechnet. Der Vergleich mit bekannten Messpunkten zeigte eine sehr gute Übereinstimmung und verdeutlicht die Leistungsfähigkeit des quantitativen Messverfahrens.

Das BOS-Verfahren stellt eine robuste Methode dar, zweidimensionale Dichtegradienten zu quantifizieren. Im Vergleich zu anderen Verfahren werden sehr wenige Komponenten für den Versuchsaufbau benötigt. Aufgrund des Vergleichsalgorithmus stellt das BOS-Verfahren hohe Anforderungen an die Rechenkapazität, was eine Echtzeitauswertung bei hoher Auflösung unter heutigen Bedingungen praktisch unmöglich macht. Ein Nachteil beim verwendeten BOS-Aufbau ist der nicht parallele Verlauf der Lichtstrahlen zur optischen Achse.

Prinzipbedingt ist das BOS-Verfahren auf die Messung durchsichtiger Medien beschränkt. Aufgrund der Leistungsfähigkeit und des einfachen Aufbaus sind hier jedoch zahlreiche Anwendungen denkbar. Glaswaren oder andere durchsichtige Materialien können mit BOS auf ihre Qualität untersucht werden. Dies wurde z.B. bei der Qualitätsuntersuchung eines verwendeten Objektivs angewandt [8]. Die Eignung für Untersuchungen konvektiven Wärme- und Stofftransportes wurde in Kap. 4 durch die Vermessung einer thermischen Grenzschicht verdeutlicht. Weiterhin ist BOS sehr gut zur Vermessung

von Überschallströmungen, wie in Kap. 5 vorgestellt, geeignet. Ist ein Startwert vorhanden, so können absolute Dichteverläufe durch Integration bestimmt werden.

LITERATUR

- [1] Elsinga, G.E., Oudheusden, B.W. van, Scarano, F. und Watt, D.W. (2004): Assessment and Application of Quantitative Schlieren Methods: Calibrated Color Schlieren and Background Oriented Schlieren. *Experiments in Fluids* 36.
- [2] Kays, William M. und Crawford, Michael E. (1993): *Convective Heat and Mass Transfer*. McGraw-Hill, 3. Aufl. ISBN 0-07-033721-7.
- [3] Klinge, F., Kirmse, T. und Kompenhans, J. (2003): Application of Quantitative Background Oriented Schlieren (BOS): Investigation of a Wing Tip Vortex in a Transonic Wind Tunnel. *Proceedings of PSFVIP-4*, Chamonix, France.
- [4] Leopold, F. und Demeautis, C. (2004): Untersuchung von unterschiedlichen Formen der Stoss/Wirbel-Wechselwirkung mit Hilfe von Visualisierungen und LDA-Messungen. 12. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Karlsruhe.
- [5] Loose, S., Richard, H., Dewhurst, T. und Raffel, M. (2003): Background Oriented Schlieren (BOS) and Particle Image Velocimetry (PIV) applied for Transonic Turbine Blade Investigation. Institut für Strömungsmechanik, Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt (DLR).
- [6] Meier, G.E.A. (1999): Hintergrund Schlierenmessverfahren. Deutsche Patentanmeldung DE 199 42 856 A1.
- [7] Meier, G.E.A. (2002): Computerized Background Oriented Schlieren. *Experiments in Fluids* 33
- [8] Nafz, T. (2006): Background Oriented Schlieren - Möglichkeiten und Grenzen des Optischen Verfahrens zur quantitativen Dichtegradientenbestimmung, Studienarbeit, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH)
- [9] Ochs, M., Schulz, A. und Bauer, H.-J. (2006): Desing and Commissioning of a Transonic Test Section for the Investigation of Shock Wave-Film Cooling Interactions. *ASME Turbo Expo 2006*, GT2006-90468.
- [10] Oertel, Herbert sen. und Oertel, Herbert jun. (1989): *Optische Strömungsmesstechnik*. Braun. ISBN 3-7650-1012-X.
- [11] Richard, H. und Raffel, M. (2001): Principle and Applications of the Background Oriented Schlieren (BOS) Method. *Measurement Science and Technology*.
- [12] Richard, H., Raffel, M., Rein, M., Kompenhans, J. und Meier, G.E.A. (2000): Demonstration of the Applicability of a Background Oriented Schlieren (BOS) Method. 10th Symposium of Applications Laser Techniques to Fluid.
- [13] Seiler, Friedrich (2002): Skript zur Vorlesung Optische Strömungsmesstechnik. Universität Karlsruhe (TH).
- [14] Settles, Gary S. (2001): *Schlieren and Shadowgraph Techniques*. Springer. ISBN 3-540-66155-7.
- [15] Sveen, J. K. (2004): An Introduction to MatPIV v.1.6.1. Eprint no. 2, ISSN 0809-4403, Dept. of Mathematics, University of Oslo.
- [16] Sveen, J. K. und Cowen, E. A. (2004): *Advances in Coastal and Ocean Engineering - Vol. 9, PIV AND WATER WAVES*, Kap. Quantitative Imaging Techniques and their Application to Wavy Flows. World Scientific.
- [17] Venkatakrishnan, L. und Meier, G.E.A. (2004): Density Measurements using the Background Oriented Schlieren Technique. *Experiments in Fluids* 37.