

MIKRO-AUSBLASUNG ZUR WIDERSTANDSREDUZIERUNG UND ZUR RELAMINARISIERUNG VON TURBULENTEN GRENZSCHICHTEN

MICRO-BLOWING FOR DRAG REDUCTION AND RELAMINARIZATION OF TURBULENT BOUNDARY LAYERS

V. Motuz, E.-S. Zanoun, L. Jehring, Ch. Egbers

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre (LAS) Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Siemens-Halske-Ring 14, D-03046 Cottbus

Schlagworte: Grenzschicht, Mikro-Ausblasung, LDA, Relaminarisierung,
Key words: boundary layers, micro-blowing, LDA, relaminarization

Zusammenfassung

Es wurde eine experimentelle Anlage zur Grenzschichtuntersuchung entlang einer porösen Platte, deren Eigenschaften durch eine Mikro-Ausblasung beeinflusst wird, am LAS entwickelt und gebaut. Zur Grenzschichtuntersuchung im Reynoldszahlbereich $Re_x < 4 \times 10^6$ wurde eine konventionelle Laser-Doppler Anemometrie (LDA) eingesetzt. Die experimentelle Ergebnisse zeigen, dass ein Einsatz der Mikroausblasungstechnologie (MBT), auf der die entwickelte Anlage basiert, eine Widerstandsreduzierung an einer porösen Platte bis 60 % im Vergleich zur glatten Platte erreichen lässt. Eine Relaminarisierung der turbulenten Grenzschicht durch Einsatz der MBT ist ebenfalls möglich.

Das Ziel dieser Arbeit ist eine gründliche Untersuchung von beiden physikalischen Phänomenen und zwar laminar-turbulenter Übergang und Widerstandsreduzierung einer porösen Platte beim Einsatz der Mikroausblasungstechnologie.

Einleitung

Durch die viskose Haftung des Fluids an der Körperoberfläche entsteht der Reibungswiderstand und als Folge bildet sich um den umströmten Körper eine Grenzschicht. Diese Grenzschicht hat im Allgemeinen sowohl laminaren als auch turbulenten Charakter. Im Gegensatz zur laminaren Grenzschicht bestimmt sich die turbulente Grenzschicht durch den hochenergetischen Impulsaustausch in vertikaler Richtung und hat ein völligeres Geschwindigkeitsprofil. Dies bedeutet, dass der Geschwindigkeitsgradient an der Wand in einer turbulenten Grenzschicht größer ist als in der laminaren Grenzschicht. Da die Schubspannung dem Geschwindigkeitsgradienten proportional ist, steigt sie an der Wand stark an und somit steigt auch der Reibungswiderstand an.

Der Anteil des Reibungswiderstands bei modernen Verkehrsflugzeugen beträgt nach wie vor ca. 50% des Gesamtwiderstandes. Eine Reduktion dieses Widerstandes würde zu einem deutlich geringeren Gesamtwiderstand führen, was wiederum zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauches und damit zu einer erheblichen Kostenreduktion und Nutzlasterrhöhung führen würde. Ein weiterer Vorteil wäre zudem die Reduktion des CO₂-Ausstoßes der Flugzeugantriebe.

Eine effektive Methode um den Reibungswiderstand zu reduzieren und damit eine Gesamtwiderstandsreduzierung zu erreichen ist die Grenzschichtbeeinflussung. Um die Grenzschicht an einer umströmten Oberfläche zu beeinflussen, werden bereits viele Beeinflussungsverfahren eingesetzt. In der Praxis haben sich zwei Verfahren als sehr

effektiv erwiesen. Zum einen ist dies die Absaugung von energiereicher Grenzschichtströmung, zum anderen die Energetisierung der Grenzschichtströmung durch Ausblasen von energiereichem Fluid.

Grenzschichtbeeinflussung mittels Ausblasen

Eine poröse Wand, die für das Fluid durchlässig ist, ermöglicht die Grenzschicht durch kontinuierliches Absaugen bzw. Ausblasen zu beeinflussen. Beim Absaugen wird das energieschwache Fluid aus der Grenzschicht entfernt, wodurch eventuell die Ablösung vermieden werden kann. Umgekehrt führt eine Lufteinblasung in die Grenzschicht der Grenzschicht Energie zu und dadurch können die Wandschubspannung und damit der Reibungswiderstand reduziert werden (Schlichting 1997). Die Experimente mit Einblasung der Luft in eine turbulente Grenzschicht, die von Hwang (Hwang 2004) durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass man durch den Einsatz der Mikroausblasungstechnologie eine Reduzierung des Reibungswiderstands von bis zu 60 % im Vergleich zur undurchlässigen Wand erreichen kann.

Im Fall einer porösen Wand bleibt die Haftbedingung $u_w=0$ an der Wand wie im Fall einer undurchlässigen Wand weiterhin gültig. Wird das Fluid durch eine poröse Oberfläche aber abgesaugt oder ausgeblasen ändert sich die v -Komponente der Geschwindigkeit ($v_w < 0$) – beim Absaugen und ($v_w > 0$) – beim Ausblasen entsprechend. In beiden Fällen bleiben die Prandtlische Grenzschichtgleichungen unverändert gültig. Es ändert sich nur die Randbedingung an der Wand:

$$\bar{y} = 0: u^* = 0, \bar{v} = \bar{v}_w(x^*) \quad (1)$$

und

$$v_w = \frac{\bar{v}_w(x)}{V} \sqrt{\text{Re}} \quad (2)$$

wobei \bar{y} die Grenzschicht-Koordinate, u^* die Geschwindigkeitskomponente in x -Richtung, \bar{v}_w die Geschwindigkeitskomponente in y -Richtung, V die y -Komponente der Geschwindigkeit in der Außenströmung und Re die Reynolds-Zahl sind.

Experimentelle Anlage und Versuchsaufbau

Am Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre (LAS) der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus wurde eine experimentelle Anlage zur Untersuchung des Einflusses von Mikro-Ausblasung bzw. Absaugung auf den Reibungswiderstand und auf die gesamte Widerstandsreduzierung eines umströmten Körpers in einer turbulenten Strömung bei verschiedenen Druckgradienten entwickelt und gebaut (Abb. 1a). Der Hauptteil der Anlage ist ein auswechselbares Testmodul mit den Abmaßen $125 \times 250 \text{ mm}^2$ mit poröser Oberfläche. Das Testmodul besteht aus einem Unterteil, das eine Einführung für Luft oder ein anderes Gas enthält und auch zur Befestigung der oberen porösen Platte genutzt wird. Die auswechselbare poröse Platte des Testmoduls besteht aus Edelstahlblechen, die durch ein Elektronenstrahlverfahren perforiert wurden mit verschiedenen Parametern. In dieser Arbeit wurde eine Edelstahlplatte der Dicke von 1 mm mit einem Durchmesser der Mikro-Löcher von $180 \mu\text{m}$ und einer Porosität (freie Lochoberfläche) von 18 % eingesetzt. Das Aspektverhältnis ist 5,5 (Verhältnis von Plattendicke zum Lochdurchmesser). Eine schematische Darstellung des Testmoduls mit einer auswechselbaren porösen Platte ist in Abb. 1 b) dargestellt. Zwischen dem Unterteil und der mikroporösen Platte wurde eine

druckausgleichende Vorrichtung angebracht, die aus zwei 2mm dicken, aus hochdichtem Polyethylen (HDPE) gefertigten Platten besteht. Weiterhin sind Drahtsiebe mit einer Maschenweite von 0,7mm verbaut. Das Testmodul wurde in eine 19 mm dicke, 595 mm breite und 950 mm lange Aluminiumplatte mit elliptischer Vorderkante eingebaut. Das Testmodul kann man an 4 verschiedenen Positionen entlang der Aluminiumplatte einsetzen. Die Aluminiumplatte mit dem eingebauten Testmodul wurde in einem Windkanal Göttinger Bauart parallel zur Strömung montiert. Der Windkanal erzielt eine maximale Reynoldszahl von $Re_x=1 \times 10^4 - 3.5 \times 10^6$. Die Turbulenzintensität der Strömung ist kleiner als 0.5%. Die Grenzschichtbeeinflussung durch kontinuierliches Ausblasen wurde in dieser Arbeit im Strömungsgeschwindigkeitsbereich von 10 bis 36 m/s untersucht. Die Position des Testmoduls bis zur Vorderkante der Aluminiumplatte und die Anströmungsgeschwindigkeiten umfassen einen Reynoldszahlbereich von $Re_x=1 \times 10^4 - 1.8 \times 10^6$. Um eine turbulente Grenzschicht bereits bei niedrigen Geschwindigkeiten zu erzeugen, wurden im Abstand von $x=50$ mm sogenannte "tripping devices" eingesetzt.

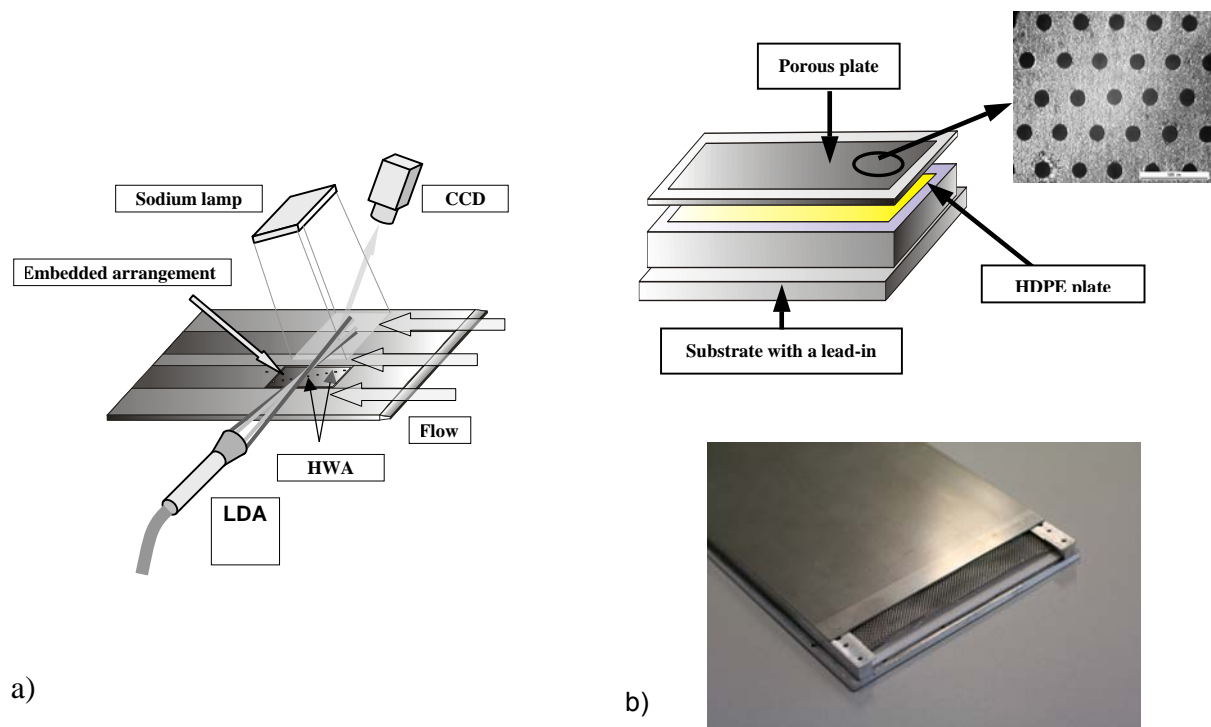


Abb.1: Experimentaufbau: a) Aluplatte mit eingebautem Testmodul und eingesetzter Messtechnik; b) Testmodul mit perforierter Platte

Für verschiedene Anströmungsgeschwindigkeiten in verschiedenen x -Positionen, mit x = Abstand zur Vorderkante der Aluminiumplatte, wurden drei Messungen des Geschwindigkeitsprofils durchgeführt. Die erste auf der glatten Oberfläche der Aluminiumplatte, die zweite auf der porösen Oberfläche des Testmoduls ohne Ausblasen und die dritte auf der porösen Oberfläche des Testmoduls mit Ausblasen.

Alle Messungen des Geschwindigkeitsprofils wurden mittels der Laser-Doppler-Anemometrie (Dantec Dynamics) in Rückstreuanordnung ausgeführt. Während der Messungen wurde die Arbeitstemperatur durch eine eingebaute Kühlanlage im Windkanal mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ konstant gehalten.

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Der Reibungsbeiwert ergibt sich aus dem Geschwindigkeitsgradienten an der Wand ($y = 0$) nach der Formel:

$$\frac{c_f}{2} = \left(\frac{u_\tau}{\bar{U}_\infty} \right)^2 \quad (3)$$

wobei \bar{U}_∞ die freie Anströmungsgeschwindigkeit ist. In der Nähe der Wand bezieht man alle Größen auf die Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_τ :

$$u_\tau = \sqrt{\nu \frac{\partial U(y)}{\partial y}} \quad (4)$$

wobei ν die kinematische Viskosität und U die mittlere Strömungsgeschwindigkeit sind. Die Wandschubspannung τ_w lässt sich ähnlich wie die Grenzschichtdicke nach dem Reibungsgesetz von Newton abschätzen:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_w \quad (5)$$

wobei der Index w den Wert an der Wand beschreibt und μ die dynamische Viskosität ist. Die zur Normalisierung des Wandabstands:

$$y^+ = y \frac{u_\tau}{\nu} \quad (6)$$

und der lokalen Geschwindigkeit:

$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad (7)$$

benötigte Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_τ , wurde mittels der als "Clauser-Chart" (Clauser 1956) bekannten Methode mit den Konstanten des logarithmischen Wandgesetzes $\kappa=4.0$, $B=5.1$, vorgeschlagen von Fernholz und Finley (Fernholz, Finley 1996) berechnet, da es schwierig war exakte wandnahe Daten zu messen.

Bei der Auswertung der Messdateien des Geschwindigkeitsprofils der turbulenten Grenzschicht wurde das Verhalten des überdeckenden Bereiches („buffer layer“) des Geschwindigkeitsprofils, sowohl mit dem logarithmischen Wandgesetz als auch mit dem Potenzgesetz dargestellt.

Im Folgenden werden die ersten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen der Strömungsbeeinflussung durch die kontinuierliche Ausblasung dargestellt und analysiert. Die Auswertung der wandnahen LDA-Messdateien hat sehr interessante Wandreibungsbeiwerte sowie eine Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Reynoldszahlbereich $245 < Re_\theta < 10^3$ ergeben, wobei θ durch die Kalkulierung des Geschwindigkeitswerts ermittelt wurde. Die Messungen wurden für freie Anströmungsgeschwindigkeiten von 10, 20 und 30 m/s in

X-Positionen 0.33, 0.43, 0.53, und 0.7 m durchgeführt. Die in Abbildung 2 vorgestellte Wandschubspannungsreibung wurde aus dem Wert des Geschwindigkeitsgradienten in der Nähe der Wand (nach Formel (4) für jede oben geschriebene Messungsreihe ermittelt.

Der Vergleich des Wandreibungsbeiwerts entlang einer ebenen Oberfläche (Abb. 2) zeigt eine gute Übereinstimmung mit beiden Kurven sowohl der laminaren als auch der turbulenten Strömung. Andererseits liegt die Kurve des Wandreibungsbeiwerts im Fall der Mikro-Ausblasung unter der Kurve des Wandreibungsbeiwerts für turbulente Strömung mit einer Reduktion des Wandreibungswiderstands bis 38 %.

Einige ausgewählte Beispiele des Profils des Geschwindigkeitsbeiwerts sind in Abb.2. gezeigt. Sowohl für glatte Oberflächen als auch für poröse Oberflächen mit Mikro-Ausblasen wurden die in dieser Arbeit dargestellten Mittelwerte des Geschwindigkeitsprofils durch Parameter der wandnahen Strömung (u_τ und $l_c = \nu/u_\tau$, siehe Formel (6) und (7)) normiert. Die Abb. 3. zeigt ganz deutlich, sowohl ein Geschwindigkeitsprofil im Bereich relativ niedriger Reynoldszahlen, als auch eine Wirkung der Mikro-Ausblasung auf das Geschwindigkeitsprofil bzw. Wandreibungsbeiwert. Die alle in Abb. 3a dargestellte Kurven für die glatte Platte zeigen eine gute Übereinstimmung mit dem logarithmischen Wandgesetz ($k=0.41$ und $B=5.5$) aus früheren experimentellen Dateien (siehe Bradshaw 1995).

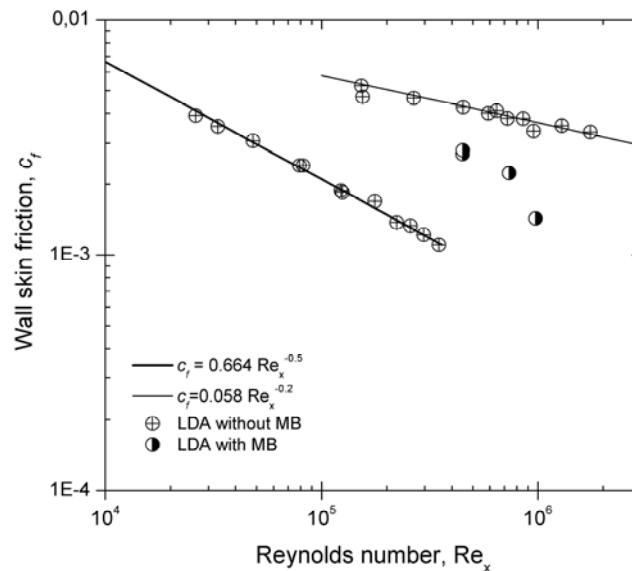


Abb. 2. Wandreibungsbeiwert entlang einer glatten und poröse Oberfläche ohne und mit Mikro-Ausblasung im Vergleich zu den durch Kalkulation erhaltene Ergebnisse (aus Literatur) für laminare und turbulente Strömung

Ein Vergleich des Geschwindigkeitsprofils auf der porösen Oberfläche mit Ausblasung mit dem Geschwindigkeitsprofil auf einer glatten Oberfläche (Abb. 3d) weist eine erwartende und aufsteigende Verschiebung des Geschwindigkeitsprofils auf der porösen Oberfläche mit Ausblasung auf. Die kontinuierliche Ausblasung ändert die wandnahe Strömungsstruktur und reduziert damit die Wandschubspannung. Diese Wandschubspannungsreduzierung verursacht die Neigungsänderung der Kurve des logarithmischen Wandgesetzes.

Da die Dateien der Mittelwerte des Geschwindigkeitsprofils, sowohl an einer glatten Oberfläche, als auch auf der porösen Oberfläche mit Ausblasung im niedrigen Bereich der Reynoldszahlen ermittelt wurden, gibt es in den präsentierten Ergebnissen in dieser Arbeit einige Abweichungen vom logarithmischen Wandgesetz. Die nächste Phase unserer Untersuchungen der Grenzschichtbeeinflussung durch kontinuierliche Ausblasung soll aber einen höheren Reynoldszahlbereich abdecken. Des Weiteren sollen andere Messverfahren, z.B. Wandschubspannungswaage, eingesetzt werden, damit noch unklare Fragen bezüglich

des Grenzschichtverhaltens an einer ebenen Platte mit durchlässigen Oberflächen untersucht werden können. Die Abb.3c und 3d zeigen auch eine Änderung des Geschwindigkeitsprofils außerhalb der Grenzschicht, bzw. hinter dem Bereich des logarithmischen Wandgesetzes. Es ist deutlich zu sehen, dass ein Unterschied im Verhalten des Mittelwerts des Geschwindigkeitsprofils an einer glatten und einer porösen Platte mit Ausblasung existiert.

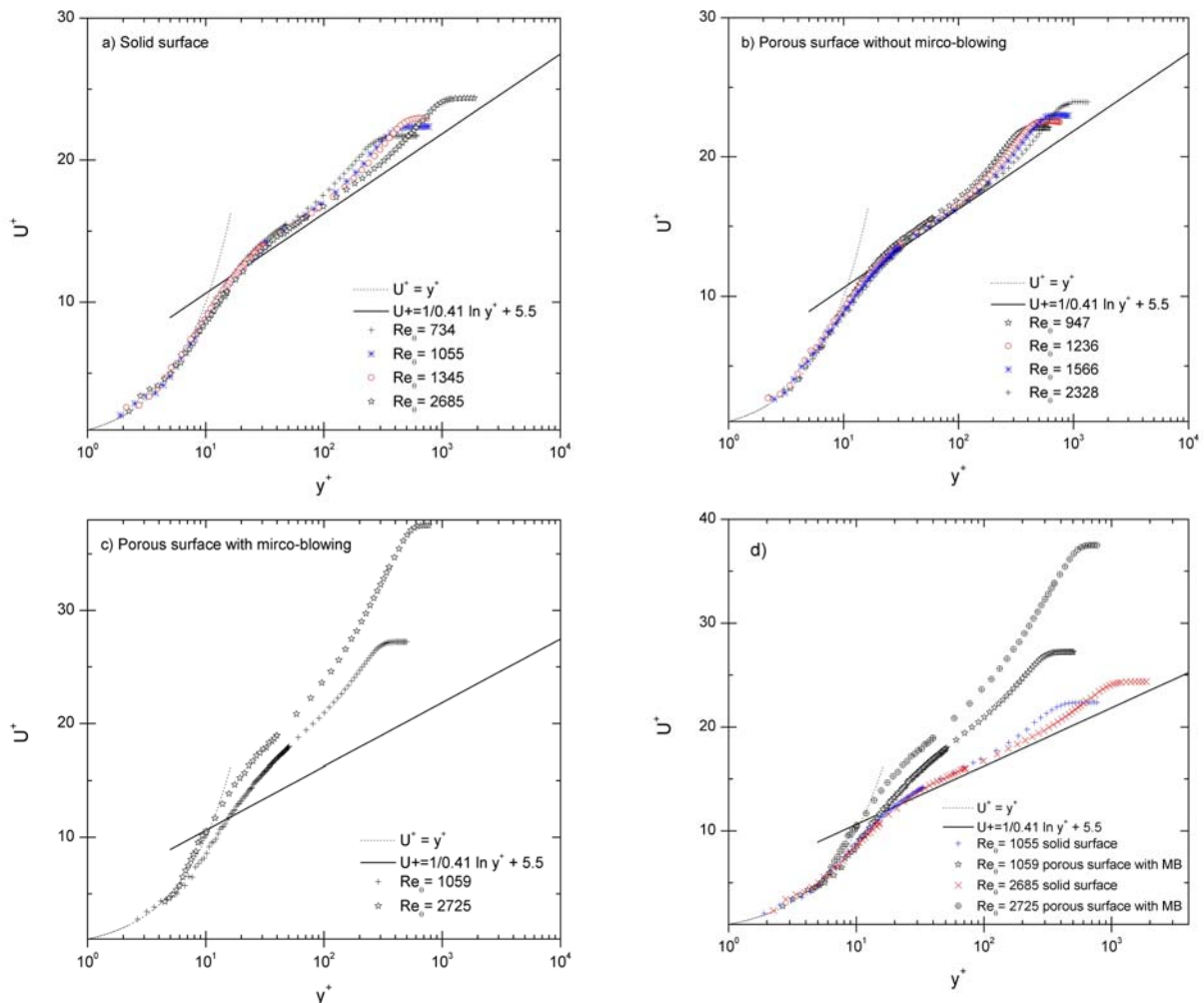


Abb.3. Die normierten (durch Parameter der wandnahen Strömung u_τ und $l_c = \eta/u_i$) Mittelwerte des Geschwindigkeitsprofils im Vergleich zum Geschwindigkeitsprofil nach logarithmischem Wandgesetz: a) an der glatten Oberfläche; b) an der porösen Oberfläche ohne Mikro-Ausblasung; c) an der porösen Oberfläche mit Mikro-Ausblasung; d) an der glatten Oberfläche und an der porösen Oberfläche mit Mikro-Ausblasung

Zusammenfassung und Ausblick

Die durchgeführte Untersuchung der Grenzschichtbeeinflussung durch kontinuierliches Ausblasen hat gezeigt, dass eine Anwendung der Mikroausblasungstechnologie zur Grenzschichtbeeinflussung sehr effektiv ist. Die Ausblasung führt in die Grenzschicht Energie zu, ändert die wandnahe Strömungsstruktur und reduziert damit die Wandschubspannung. In der turbulenten Strömung wurde, sogar im niedrigen Bereich der Reynoldszahlen ($Re_x = 9.76E+5$), der Reibungswiderstand an einer porösen Platte mit Ausblasen bis 58 % im Vergleich zur glatten Platte reduziert.

Da beim Ausblasen die v -Komponente der Geschwindigkeit $v_w > 0$ ist, bringt es Schwierigkeiten bei der Anwendung konventioneller Laser-Doppler Anemometrie zur Untersuchung der Grenzschicht, bei der man nur ein 1D-LDA-System einsetzen kann.

Es ist die poröse Oberfläche mit anderen Parametern und anderen Messmethoden zur Untersuchung der Grenzschichtbeeinflussung durch kontinuierliches Ausblasen einzusetzen.

Dankesworte

Die Untersuchung wurde im Rahmen des Projekts „International Graduate School der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zum Thema Verdichter Technologien & Materialien“ durchgeführt.

Literatur

Bradshaw, P. and Huang, G. The law of the wall in turbulent flow, Proc. R. Soc. London A. 1995, 451, pp. 165-188.

Clauser, F.H., 1956: "The turbulent boundary layer", Advances in Applied Mechanics, 4, pp.1–51.

Fernholz, H.H., Finley, P.J., 1996: "The incompressible zero-pressure-gradient turbulent boundary layer: An assessment of the data", Prog. Aerospace Sci, 32, pp. 245-311.

Hwang, D., "Review of research into the concept of the microblowing technique for turbulent skin friction reduction". Progress in Aerospace Sciences 40 (2004) 559-575.

Schlichting, H., Gersten, K., 1997: Grenzschicht-Theorie, 9., völlig Neubearb. u. erw. Aufl., Springer, Heidelberg.