

TURBULENTE GRENZSCHICHTSTRÖMUNG AN EINER GLEICHMÄßIG PERFORIERTEN WAND MIT MIKRO-AUSBLASEN

TURBULENT BOUNDARY LAYER FLOW OVER UNIFORM PERFORATED SURFACE WITH MICRO- BLOWING

V. Motuz, L. Jehring, Ch. Egbers

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre (LAS), BTU Cottbus
Siemens-Halske-Ring 14, D-03046 Cottbus, Germany

Schlagworte: turbulente Grenzschicht, Mikro-Ausblasen, LDA.

Key words: turbulent boundary layers, micro-blowing, LDA.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit sind Ergebnisse der Untersuchung von turbulenten Grenzschichtströmungen über einer durchlässigen Wand, deren Oberfläche durch gleichmäßige Perforation eine Mikrostruktur hat, dargestellt. Die Ergebnisse betreffen sowohl den Fall ohne als auch den Fall mit Ausblasen durch die poröse Oberfläche.

Der Einsatz des Laser Doppler Anemometers (LDA) zur Untersuchung einer turbulenten Grenzschicht über einer perforierten Wand hat es möglich gemacht, die Profile der Strömungsgeschwindigkeit an verschiedenen Positionen und in verschiedenen Höhen über der Platte mit hoher räumlichen Auflösung zu ermitteln. Die Messergebnisse zeigen, dass die Profile der Strömungsgeschwindigkeit, die auf der Höhe von bis zu ca. 100 µm oberhalb der Wandoberfläche und entlang der Platte in der Stromab-Richtung gemessen wurden, der Struktur der Wandoberfläche bzw. der Ordnung der Öffnungen in der Wand folgen. Die Höhe, auf der man das Oberflächenprofil noch fühlt, hängt von der Geschwindigkeit der freien Strömung und vom Ausblasvolumen ab.

Einleitung

Das gleichmäßige Ausblasen oder Absaugen („Transpiration“) ist ein wirksames Verfahren zur Beeinflussung der turbulenten Grenzschichten und zwar zur Reduzierung des Reibungswiderstandes. Eine Durchlässigkeit der Wand kann man sowohl durch die Eigenschaften des Wandmaterials (wie z.B. poröse Polyethylen- oder Metallschäume) als auch durch eine entsprechende Materialverarbeitung (wie z.B. Bohren mehrerer Feinlöcher in einer Platte, Perforation) erreichen. Der Unterschied zwischen den Wänden, deren Durchlässigkeit durch verschiedene Verfahren erzielt wurde, liegt in erster Linie an der Material- und Oberflächenstruktur. Die ersten experimentellen Untersuchungen zur Grenzschichtbeeinflussung durch die Transpiration an durchlässigen Wänden wurden an den porösen Materialien wie z.B. gesinterte Bronze oder gesintertes Polyethylen in 50-er Jahren durchgeführt (siehe z. B. (Mickley 1954), (McQuaid 1967)). Seit den 90-er Jahren wurde auch eine gleichmäßig perforierte Metallplatte als eine durchlässige Wand verwendet (Hwang 1996), (Braslow 1999). Je nachdem wie groß der Durchmesser der Öffnungen ist und wie hoch die Durchlässigkeit der perforierten Platte sowie die Aspektverhältnisse sind, kann man die durch diese Platte ausblasende Strömung näherungsweise als gleichmäßige Strömung oder als ein Ausblasen durch einzelne Öffnungen betrachten. Die Grenzschichteneigenschaften hängen von diesen Plattenparametern und von der Ausblasrate stark ab, siehe (Hwang 1997), (Hwang 1998), (Bertolotti 2006).

Mehrere sowohl experimentelle ((Catherall 1965), (Jeromin 1966)) als auch numerische (z.B. Kudriavtsev 2001) Untersuchungen zur Grenzschichtbeeinflussung durch Ausblasen durch eine durchlässige Wand gehen davon aus, dass das Ausblasen über einer umströmten Oberfläche gleichmäßig verteilt ist. Der Grund dafür ist folgender: zum Einen fordert eine genaue Berechnung der Grenzschicht über einer Wand mit mehreren kleinen Öffnungen, durch die ausgeblasen wird, einen riesigen Zeitaufwand. Zum Anderen reicht es bei experimentellen Untersuchungen aus, nur integrale Parameter wie z.B. Wandreibungskoeffizienten zu bestimmen. Aus diesem Grund wird eine Grenzschicht über einer Wand mit Ausblasen entweder für den Fall des gleichmäßigen Ausblasens oder für den Fall des Ausblasens nur durch einige einzelne Öffnungen berechnet (Thomas 1990), (Lin 1998), (Menon 2005).

Bei der Untersuchung der Auswirkung des Ausblasens durch eine gleichmäßig perforierte Wand auf eine turbulente Grenzschichtströmung wurde festgestellt, dass das ermittelte Profil der Strömungsgeschwindigkeit von der Position an der Wandoberfläche abhängt. Das Ausblasen durch eine Wand, die mehrere einzelne Öffnungen hat, setzt sich tatsächlich immer aus mehreren einzelnen Strömungsstrahlen zusammen, deren Eigenschaften sowohl durch die Parameter des Ausblasens als auch durch die Wandparameter festgelegt werden. Beide Parametergruppen tragen einen eigenen Anteil zu den Eigenschaften des gesamten Ausblasens und als Folge auch zur Beeinflussung der Grenzschichtströmung, bei. Unter diesem Gesichtspunkt ist es sinnvoll, eine Grenzschichtströmung über einer perforierten Wand mit Ausblasen in der sich zwei senkrecht zueinander orientierte Strömungen queren, detaillierter zu untersuchen.

Experimentelle Anordnungen

Zur Untersuchung einer turbulenten Grenzschichtströmung über einer durchlässigen Wand ohne und mit Ausblasen wurde die experimentelle Anlage, die in (Motuz 2009) ausführlich beschrieben ist, eingesetzt. Einige wichtige Experimentdetails und Parameter der Wand sind dennoch zu erwähnen. Die durchlässige Wand des Testmoduls besteht aus einer von einem Elektronenstrahl gleichmäßig perforierten Edelstahlplatte mit Öffnungen von 180 μm , einer Durchlässigkeit von ca. 18 % und einer Stärke von 1.05 mm (Abb.1). Die Anordnung der Öffnungen an dieser Platte stellt eine Sechseckform dar, bei der eine Reihe der Öffnungen im Vergleich zur nächsten Reihe versetzt ist. Der Abstand zwischen den Öffnungsmittelpunkten von zwei nebeneinander liegenden Öffnungsreihen beträgt 360 μm . Der Abstand zwischen den Mitten zweier nebeneinander liegender Öffnungen in einer Reihe beträgt 400 μm . Die meisten Experimente dieser Untersuchung wurden bei einer Geschwindigkeit der freien Strömung U_∞ von ca. 20 m/s und einige bei $U_\infty=10$ m/s durchgeführt. Die Ausblasrate wurde im Bereich von 0 bis 0.069 $(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}^2$ variiert. Die Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit wurde mittels eines LDA-Messsystems in Rückwärtsstreuanordnung der Fa. Dantec Dynamics realisiert. Die Messsonde des verwendeten LDA-Messsystems hatte eine Sendelinse mit einer Brennweite f von 310 mm. Bei einer Laserwellenlänge λ von 488 nm, einem Laserstrahldiameter $2r_0$ von 1.35 mm und einem Schnittwinkel θ von 7.14 Grad nach (1) hat das Messvolumen folgende Abmessungen $dx = 0.143$ mm, $dy = 0.143$ mm und $dz = 2.332$ mm.

$$dx = \frac{2r_1}{\cos \theta / 2}; \quad dy = \frac{4f\lambda}{\pi r_0}; \quad dz = \frac{2r_1}{\sin \theta / 2} \quad (1)$$

wobei $2r_0$ und $2r_1 = \frac{2\lambda f}{\pi r_0}$ - der Durchmesser der Taille des Laserstrahls respektive vor und

nach der Fokussierung durch die Sendelinse. Das Abmaß des Detektionsvolumens ist um ca. 30% kleiner als das Abmaß des Messvolumens.

Das für die Positionierung der LDA Messsonde eingesetzte 3D-Traversierungssystem der Fa. Isel hat eine minimale Schrittweite von $6.35 \mu\text{m}$. Ein kleines Detektionsvolumen zusammen mit dem präzisen Traversierungssystem bietet bei der Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit eine sehr gute räumliche Auflösung und erlaubt die Untersuchung von Strömungen in einem ganz kleinen Bereich an der Oberfläche eines umströmten Körpers, was im Fall von Grenzschichtuntersuchungen besonders wichtig ist.

Das Oberflächenprofil einer perforierten Platte kann man näherungsweise mit einer D-Rauhigkeit vergleichen. Die Anordnung der Öffnungen an der Platte ist so, dass die Plattenoberfläche eine periodische Struktur mit einem flachen Teil an der Stelle der festen Wand und mit einer starken Vertiefung im Öffnungsbereich besitzt. Die beiden Teile haben die gleiche Länge. Diese Länge beträgt in unserem Fall ca. $180 \mu\text{m}$, und ist ungefähr doppelt so groß, wie der Durchmesser des Detektionsvolumens der LDA-Sonde. Dies bedeutet, dass man die Strömung direkt über der perforierten Platte mittels des vorhandenen LDA-Messsystems mit hoher räumlicher Auflösung untersuchen kann, siehe Abb.1 rechts.

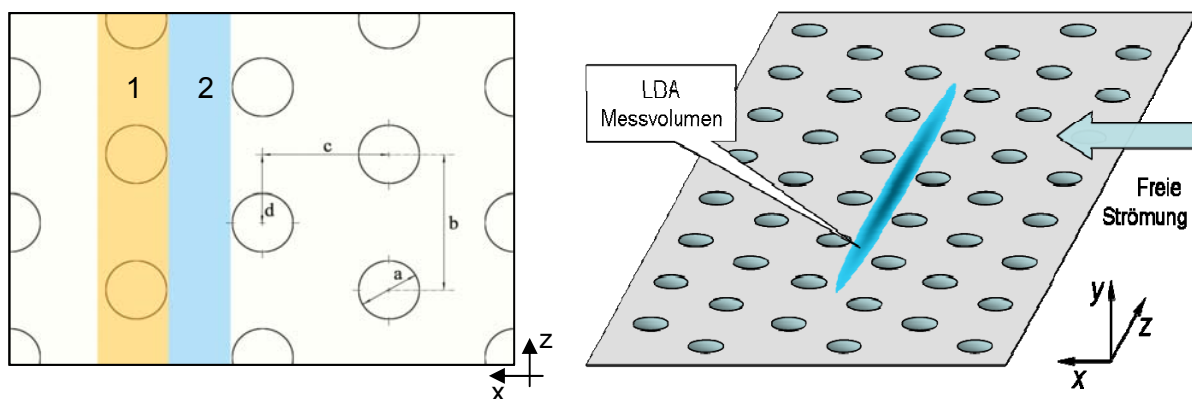


Abb. 1. Eine schematische Darstellung der gleichmäßig perforierten Wand des Testmoduls und einer möglichen Position des LDA-Messvolumens über dieser Wand (rechts). $a=180 \mu\text{m}$, $b=400 \mu\text{m}$, $c=360 \mu\text{m}$, $d=200 \mu\text{m}$.

Infolge dessen, dass die Oberfläche der Platte durch die vorhandenen Öffnungen gleichmäßig strukturiert ist, hängt das Profil der Strömungsgeschwindigkeit stark von der Position an der Platte ab, besonders im Bereich, der ganz nah zur Wand ist. Bei einer Positionierung der Messsonde an einer durch die Öffnungsreihe in der Platte gebildeten (quasi) Vertiefung (siehe Streifen 1 in Abb.1), wird die Strömung durch die Änderung der Oberflächengeometrie wesentlich geändert. An der Stelle, die der festen Wand entspricht (siehe Streifen 2 in Abb.1), hat das Geschwindigkeitsprofil eine klassische Blasius-Form. Das Messen der Strömungsgeschwindigkeit an der Position, die einer Übergangszone zwischen dem flachen Teil und der Vertiefung entspricht, führt zu großen Messfehlern.

Ergebnisse und Diskussion

Die Notwendigkeit der richtigen Wahl der Messposition bei der Ermittlung des Profils der U-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit $U(y)$ über einer durchlässigen Wand mit Ausblasen hat erfordert, eine Stelle an dieser perforierter Wand zu finden, an der der Einfluss der Oberflächenstruktur auf das ermittelte Profil minimal wird. Aus diesem Grund wurde ein Profil der U-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit entlang der perforierten Platte $U(x)$ im Bereich der viskosen Unterschicht bzw. in der Höhe von unter $100 \mu\text{m}$ über der Oberfläche des Testmoduls vermessen.

Das Verhalten des Strömungsgeschwindigkeitsprofils $U(x)$ entlang der gleichmäßig perforierten Wand (Abb. 2) hat die durch die Öffnungsreihen gebildete periodische Struktur der

Wandoberfläche bestätigt. Das Photo einer im Experiment getesteten perforierten Platte mit 250-facher Vergrößerung im Hintergrund des in der Abb. 2 dargestellten Diagramms macht den Zusammenhang zwischen der Oberflächenstruktur und dem Profil der Strömungsgeschwindigkeit $U(x)$ noch anschaulicher.

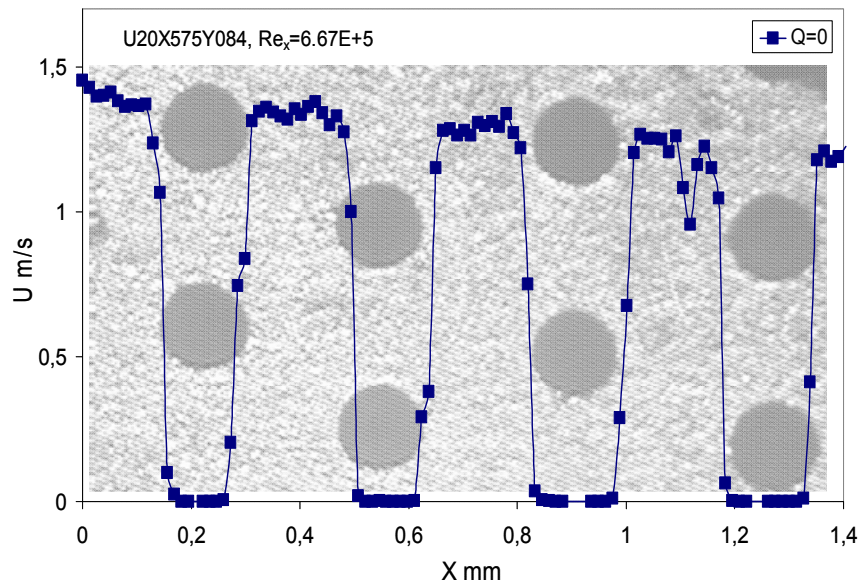


Abb. 2. Profil der U-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit über einer gleichmäßig perforierten Wand entlang der X-Achse und in Höhe von ca. $80\ \mu\text{m}$ über der Wandoberfläche. Im Hintergrund ist ein Photo einer im Experiment getesteten perforierten Platte mit 250-facher Vergrößerung dargestellt. $U_\infty=20\ \text{m/s}$, $Re_x=6.67E+5$.

In der viskosen Unterschicht hat die Strömung eine sehr kleine kinetische Energie, weswegen jede minimale Störung eine Änderung der Strömungsstruktur hervorruft. Die Öffnungen in der umströmten Wand treten eindeutig als Störungsfaktor auf. Das zweidimensionale Diagramm in der Abb. 3a zeigt, wie sich das Profil der Strömungsgeschwindigkeit $U(x,y)$ von der Position in x-Richtung an der perforierten Wand ändert. In diesem Diagramm ist gut zu sehen, dass die Änderungen im Geschwindigkeitsprofil nur am Anfang des Öffnungsbereichs beginnen. Eine Absenkung des Profils der Strömungsgeschwindigkeit $U(x)$ über den Öffnungsreihen auf der Platte auf einer Höhe unter $100\ \mu\text{m}$ bzw. in der viskosen Unterschicht kann nur durch eine Änderung im Profil der Wandoberfläche und einem niedrigeren Druck in den Öffnungen der umströmten Wand verursacht sein. Als Folge passiert eine scharfe Änderung der Strömungsrichtung an diesen Stellen und eine lokale Verlangsamung der wandnahen Strömung.

Um sicher zu sein, dass die periodische Form des Profils $U(x)$ im Bereich der viskosen Unterschicht sich auf die ganze Oberfläche der perforierten Wand bezieht, wurde das Geschwindigkeitsprofil über einer Fläche, die ca. drei Öffnungsreihen in x-Richtung und ca. 2,5 Öffnungen in z-Richtung bedeckt, ermittelt. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigen ganz deutlich (siehe Abb. 3a), dass das Profil $U(x,z)$ im Bereich der viskosen Unterschicht über einer gleichmäßig perforierten Wand eine periodische Form hat, die die Struktur der Wandoberfläche wiedergibt. Die kleinen „Zacken“ am unteren Teil des Profils in der z-Richtung entsprechen den Öffnungen in einer Öffnungsreihe an der Platte. Eine Verschiebung der „Zacken“ in der mittleren Vertiefung um ca. $200\ \mu\text{m}$ im Vergleich zur äußeren Vertiefungen bestätigt noch Mal, dass das Profil der Strömungsgeschwindigkeit $U(x,z)$ dem Profil der Wandoberfläche folgt.

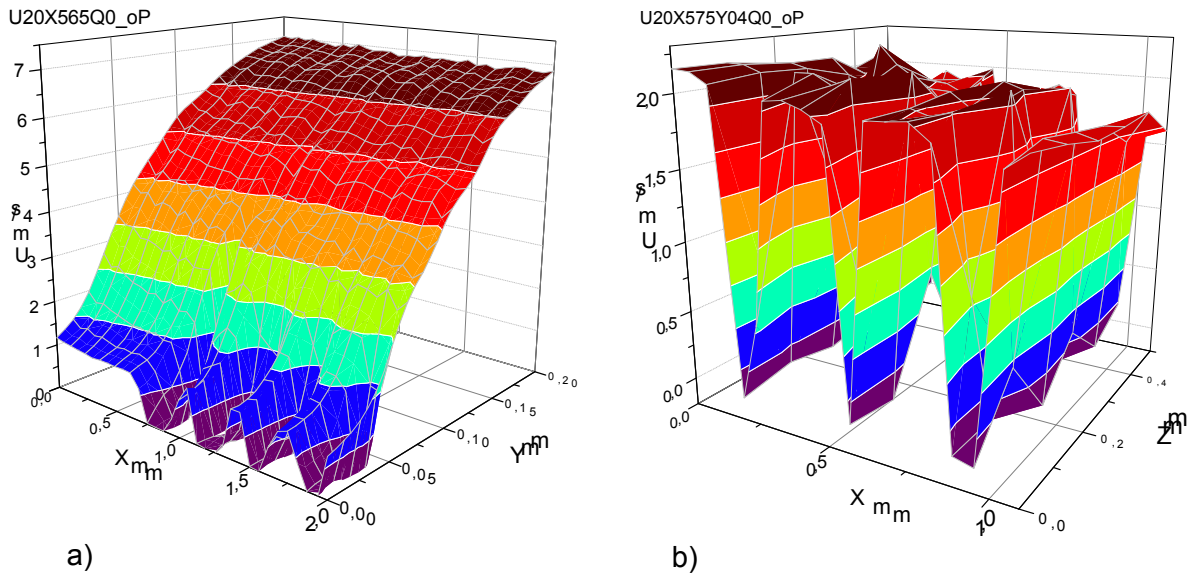


Abb. 3. Profil der x-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit über der perforierten Wand des Testmoduls in der viskosen Unterschicht. $U_\infty=20$ m/s. a) xy-Ebene am Anfang des Öffnungsreihenbereichs, ohne Ausblasen; b) xy-Ebene, Ausblasen $0,014$ (m³/s)/m².

Weitere Vermessungen des Profils der Strömungsgeschwindigkeit $U(x)$ in der viskosen Unterschicht über der gleichmäßig perforierten Wand wurden für den Fall mit Ausblasen durchgeführt. Das in der Abb. 4a dargestellte Diagramm zeigt die erwartete Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit über der durchlässigen Wand im Fall mit Ausblasen.

Eine Zahl der registrierten Bursts („Count“ bei Dantec), die man mit Hilfe des LDA für jeden Messpunkt bekommen kann, charakterisiert die Zahl der Partikel, die während einer einzelnen Messung das LDA-Messvolumen durchqueren. Da die zur LDA-Messung verwendeten Partikel ein Bestandteil der Strömung sind, kann das Diagramm, das den Zusammenhang zwischen der Anzahl der registrierten Bursts und der Position an der Wandoberfläche darstellt, (siehe Abb. 4b), eine wichtige Information zum Verständnis des Strömungsverhaltens in der viskosen Unterschicht über einer durch die Mikro-Öffnungen strukturierten Wandoberfläche liefern.

Die maximale Anzahl der registrierten Bursts pro Messung ist aber durch die Messprogrammeinstellungen, die sowohl die Messdauer als auch die maximale Burstzahl pro Messung festlegen, definiert. In diesem Zusammenhang ist eine Datenrate objektiver als die Anzahl der registrierten Bursts, weil sie sich auf die Messzeiteinheit bezieht.

Die Datenrate ist berechnet als

$$\text{Datenrate} = \frac{\text{Anzahl registrierter Bursts}}{\text{Messzeit}} \quad (2)$$

Der Abfall der Kurve des Geschwindigkeitsprofils $U(x)$ in Abb. 4a, sowie ein scharfer Anstieg der Zahl der registrierten Bursts in Abb. 4b und der Datenraten in Abb. 5 an der Grenze zwischen fester Oberfläche und Öffnung und umgekehrt an der Grenze zwischen Öffnung und fester Oberfläche sind bedingt durch die Tatsache, dass an dieser Stelle eine Änderung der Oberflächegeometrie und ein Druckunterschied eine Änderung der Strömungsrichtung und eine hohe Turbulenz durch eine Wirbelentstehung auslösen. Man muss aber nicht ausschließen, dass diese Tatsache möglicherweise zu einer Erhöhung der Partikelkonzentration an diesen Stellen, sowie in der Öffnung selbst führen kann. Eine niedrigere Lage der Kurven

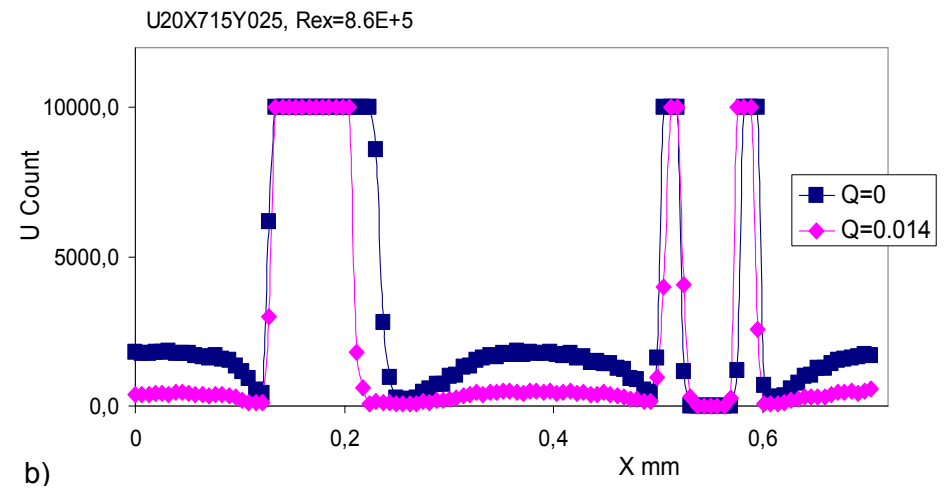
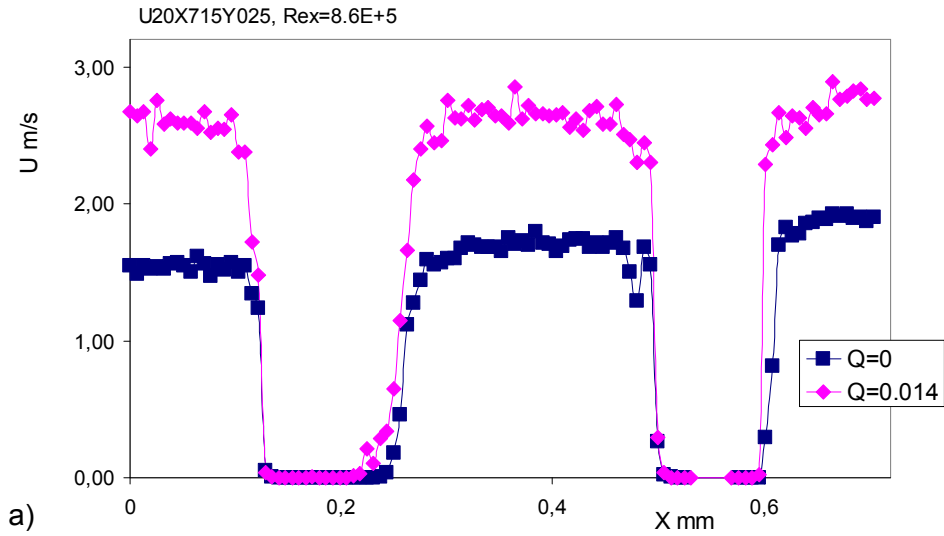


Abb.4. Profil der x-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit (a) und Zahl der registrierten Bursts (b) über perforierter Wand des Testmoduls entlang der X-Achse ohne und mit Ausblasen. $U_\infty=20$ m/s, $Re_x=8.6E+5$, $Q=0.014$ ($m^3/s/m^2$).

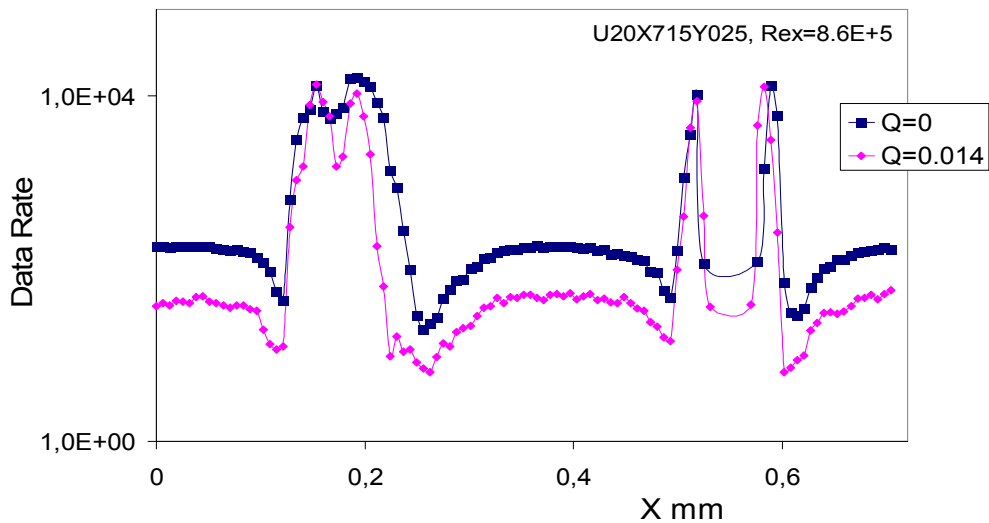


Abb. 5. Zahl der registrierten Bursts pro Messzeiteinheit in Abhängigkeit von der Position an der perforierten Wand in der Höhe von ca. $30 \mu m$.

der Anzahl der registrierten Bursts in Abb. 4b und der Datenrate in Abb. 5 an der Stelle fester Oberfläche für den Fall mit Ausblasen kann man durch die Erhöhung der Strömungs- bzw. Partikelgeschwindigkeit erklärt werden, was zu einer kleineren Zahl der Partikeln, die das LDA-Messvolumen durchqueren, führt. Diese Erklärung des Verhaltens der Kurven stimmt in hohem Maße mit den Ergebnissen der numerischen Untersuchung zur Mikro-Ausblasen durch einzelne Mikro-Öffnungen von Menon (Menon 2005) überein.

Die Auswirkung der Ausblasensparameter auf die Eigenschaften der Grenzschichtströmung ist nicht ein Teil dieses Berichts und wird in einem anderen Artikel geschildert.

Schlussfolgerung

Es wurde eine Grenzschichtströmung über einer durchlässigen Wand, die eine durch Elektronenstrahlen gleichmäßig perforierte Edelstahlplatte darstellt, ohne und mit Ausblasen untersucht. Die mittels LDA ermittelten Profile der Strömungsgeschwindigkeit $U(x)$, $U(x,y)$ und $U(x,z)$ lassen einige wichtige Schlussfolgerungen zu. Das LDA-Verfahren zur Untersuchung der Grenzschichtströmungen über mikrostrukturierten Oberflächen bzw. über den Strukturen geeignet, wenn deren Größe von derselben Größenordnung ist wie das LDA-Messvolumen. Die im wandnahen Bereich ermittelten Profile der Strömungsgeschwindigkeit zeigen, dass diese Profile durch die Struktur der Oberfläche der Wand mit den Mikro-Öffnungen vorbestimmt sind. Die Profile $U(x)$ in einer Höhe unter $100\ \mu\text{m}$ über der Wandoberfläche folgen der Anordnung der Öffnungen in der perforierten Wand. Das Profil der Strömungsgeschwindigkeit $U(x,y)$ zeigt, dass man die Mikrostrukturen nur in der viskosen Unterschicht bzw. bis zur Höhe von ca. $100\ \mu\text{m}$ „fühlt“. Aus der Form des Profils der Strömungsgeschwindigkeit $U(x,z)$ folgt, dass das Ausblasen durch eine gleichmäßig perforierte Wand als ein „Ensemble“ von einzelnen Strahlen zu betrachten ist und im Fall von Unterschallströmungen gleichmäßiges Ausblasen nur als grobe Näherung angenommen werden darf. Sowohl die Profile der Strömungsgeschwindigkeit $U(x,z)$ als auch die Diagramme der Anzahl der registrierten Bursts sowie der Datenrate zeigen, dass in der viskosen Unterschicht an der Grenze zwischen fester Wand und dem Öffnungsbereich eine starke Änderung der wandnahen Strömungsstruktur auftritt.

Literatur

- Bertolotti, F. P. (2006). Perforated Skin Structure for Laminar-Flow Systems. United States Patent. USA, Airbus Deutschland GmbH, Hamburg (DE). US 7,152,829 B2: 24.
- Braslow, A. L. (1999). "A History of Suction-Type Laminar-Flow Control with Emphasis on Flight Research." Monographs in Aerospace History 13: 84.
- Catherall, D., Stewartson, K., Williams, P.G. (1965). "Viscous flow past a flat plate with uniform injection." Proc. Roy. Soc. London A 284: 370-396.
- Hwang, D. P. (1996). A Proof of Concept Experiment for Reducing Skin Friction by Using a Micro-Blowing Technique. Cleveland, Ohio, Lewis Research Center. TM 107315: 1-13.
- Hwang, D. P. (1998). Skin Friction Reduction by Microblowing Technique. U. S. Patent. USA, NASA. 5803410: 16.
- Hwang, D. P., Biesiadny, T. J. (1997). Experimental Evaluation of the Penalty Associated with Micro-Blowing for Reducing Skin Friction, National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center. TM 113174: 12.
- Jeromin, L. O. F. (1966). An Experimental Investigation of the Compressible Turbulent Boundary Layer with Air Injection. R&M 3526: 64.
- Kudriavtsev, V., Braun, M. J., Hendricks, R. C. (2001). Virtual Experiments on Drag Reduction. 48th Annual Conference of Canadian Aeronautics and Space Institute (CASI), 8th Aerodynamics Section Symposium, Toronto, Canada.
- Lin, Y. L., Chyu, M. K., Shih, T. I. P., Willis, B. P., Hwang, D. P. (1998). Skin-friction reduction through micro blowing. 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit

- McQuaid, J. (1967). Experiments on Incompressible Turbulent Boundary Layers with Distributed Injection. R&M 3549: 57.
- Menon, S., Feiz, H. (2005). Micro Blowing Simulations Using a Coupled Finite-Volume Lattice-Boltzmann LES Approach, Georgia Institute of Technology: 62.
- Mickley, H. S., Ross, R. C., Squyers, A. L., Stewart, W. E. (1954). Heat, Mass, and Momentum Transfer for Flow over a Flat Plate with Blowing or Suction. NACA TN 3208.
- Motuz, V., Zanoun, E.-S., Jehring, L., Egbers, Ch. (2009). Mikro-Ausblasung zur Widerstandsreduzierung und zur Relaminarisierung von turbulenten Grenzschichten Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Erlangen.
- Thomas, J. L., Anderson, W.K., Krist, S.T. (1990). "Navier-Stokes computations of vertical flows over low-aspect-ratio wings." AIAA JOURNAL 28: 205-212.