

# Neues Sensorkonzept zur Bestimmung der aerodynamischen Wandschubspannung

**Edgar Augenstein\***, **Christoph Egbers\***, **Silke Eckert<sup>a</sup>**, **Maik Hartmann<sup>a</sup>**,  
**Helge Mischke<sup>o</sup>**, **Wolfgang Rehak<sup>o</sup>**

\* Lehrstuhl Aerodynamik und Strömungslehre, BTU Cottbus

<sup>a</sup> Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH

<sup>o</sup> ASI Advanced Semiconductor Instruments GmbH

## Motivation

Parallel zur Entwicklung der Computer-Technologie wurden in den vergangenen Jahrzehnten enorme Fortschritte auf dem Gebiet der numerischen Strömungsmechanik erzielt. In manchen Bereichen sind die Simulationsverfahren soweit, dass sie komplexe Strömungsvorgänge vorhersagen können, für deren Validierung es jedoch nur wenige experimentelle Verfahren gibt. Eines dieser Probleme stellt die Bestimmung von Strömungsdaten in der viskosen Unterschicht aerodynamischer Grenzschichten dar. Insbesondere die Bestimmung der turbulenten Wand-Schubspannung und der turbulenten kinetischen Energie sind eine große Herausforderung an die experimentelle Strömungsmechanik. Mit dem vorliegenden Artikel soll das Konzept für einen neuartigen Sensor zur Ermittlung der turbulenten Wandschubspannung vorgestellt werden.

## Problemstellung

Der Reibungswiderstand eines umströmten Körpers kann aus der Integration der aerodynamischen Wandschubspannung über die gesamte Oberfläche des Körpers erfolgen. Mit der Kenntnis der Verteilung der Wandschubspannung an einem solchen Körper kann ein erster Schritt zur Optimierung seiner Formgebung gemacht und somit der Reibungswiderstand reduziert werden.

Zur Bestimmung der aerodynamischen Wandschubspannung gibt es eine Vielzahl experimenteller Ansätze, die mehr oder weniger in die Struktur der viskosen Unterschicht eingreifen. Prinzipiell kann zwischen direkten und indirekten Verfahren zur Erfassung der lokalen Wandschubspannung unterschieden werden. Zu den direkten Methoden zählt die Aufnahme der an der Wand tangential angreifenden Strömungskräfte mit Hilfe einer Waage, deren Kraftaufnehmer (Schwimmer) bündig zur Oberfläche angeordnet ist. Die Auslenkung des Schwimmers kann z.B. durch einen Piezoaufnehmer, induktiv oder optisch gemessen werden.

Die indirekten Verfahren beruhen im wesentlichen auf der Bestimmung des wandnahen Geschwindigkeitsprofils. Die Ermittlung der Geschwindigkeiten in

## 53.2

unmittelbarer Wandnähe ist für sondengestützte Verfahren (z.B. Prestonrohr, Hitzdraht-Anemometrie) nur mit Einschränkungen möglich. Da in der viskosen Unterschicht ein linearer Zusammenhang zwischen der dimensionslosen Geschwindigkeit  $u^+$  und dem dimensionslosen Wandabstand  $y^+$  existiert, kann das Geschwindigkeitsprofil hin zur Wand durch Extrapolation ermittelt werden. Die dimensionslosen Werte sind gegeben durch  $u^+ = \frac{U}{u_\tau}$  und  $y^+ = \frac{y^* u_\tau}{\nu}$ , mit der

Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ , der kinematischen Viskosität  $\nu$  des Fluids und dessen Dichte  $\rho$ . Die Wandschubspannung wird über den Zusammenhang

$$\tau_w = \mu \frac{dU}{dy}$$

direkt an der Wand ( $y=0$ ) ermittelt. Dabei stellt  $\mu$  die dynamische Viskosität des Fluids dar,  $\tau_w$  ist die zeitlich gemittelte Wandschubspannung parallel zur Hauptströmungsrichtung. Für die mathematische Beschreibung turbulenter Strömungen wird auf den Reynolds'schen Ansatz der Aufteilung der momentanen Strömungsgrößen in einen Mittelwert und einen Schwankungsanteil zurück gegriffen:  $u_i = \overline{u_i} + u_i'$  und  $\tau_i = \overline{\tau_i} + \tau_i'$ . Die Indizes  $i$  stehen für die unterschiedlichen Richtungskomponenten der jeweiligen Strömungsgröße.

Ein Problem der optischen Verfahren zur indirekten Bestimmung der Wandschubspannung ist das Fehlen einer hinreichenden Anzahl von Seedingpartikeln in der viskosen Unterschicht. Es kann i.a. nur ein zeitlicher Mittelwert bestimmt werden, für eine tatsächliche Bestimmung der Fluktuationsgrößen ist die Partikeldichte und somit die Datenrate meist zu gering.

Als Verfahren zur Bestimmung der Fluktuationsgrößen an der Wand des umströmten Körpers hat sich die Oberflächen-Heißfilm-Technik bewährt. Das physikalische Prinzip basiert, wie bei der klassischen Hitzdraht-Anemometrie, auf der Analogie zwischen dem lokalen konvektiven Wärmetransport vom beheizten Sensor in die Strömung und der lokalen Wand-Schubspannung an dieser Stelle. Für die Heißfilm-Anemometrie wird das Sensorelement in einer Wheatstone Brücke verschaltet. Die anliegende Brückenspannung heizt das Sensorelement auf eine Temperatur  $T_S$ , die höher liegt als die Umgebungstemperatur  $T_\infty$ . In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit wird Wärme an das Fluid abgegeben. Die Regelspannung, die notwendig ist, um den Sensor auf konstanter Temperatur zu halten ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Um quantitative Aussagen zu erhalten, müssen Heißfilm Sensoren vor ihrem Einsatz kalibriert werden. Von Bruun [1] wurde das für die Hitzdraht-Anemometrie geltende „King's Law“ für Oberflächen-Heißfilme in folgender Form adaptiert:

$$\frac{E^2}{(T_S - T_\infty)} = A + B(\tau_w)^{1/3}.$$

Dabei ist  $E$  die messbare Brückenspannung, die Koeffizienten  $A$  und  $B$  müssen über Kalibriermessungen angepasst werden. Neben dem Wärmeübergang an das

strömende Fluid erfolgt bei Hitzdrahtmessungen in Wandnähe oder bei der Messung mit Oberflächen-Heißfilmen ein zusätzlicher, nur schwer zu quantifizierender Wärmestrom in das Testmodell. Die turbulenten Fluktuationen der Wand-Schubspannung  $\tau_w'$  werden dadurch unterschätzt. Ohne Maßnahmen zur ständigen in situ Kalibrierung können die ermittelten Werte für die Wandschubspannung  $\tau_w$  und die zugehörigen Fluktuationen  $\tau_w'$  nur qualitativ betrachtet werden (Desgeorges et al. [4]). Für den Fall der klassischen Hitzdraht-Anemometrie in Nähe einer wärmeleitenden Wand haben Durst et al. [5] das Driften des Messsignals durch eine in situ Kalibrierung mit Hilfe eines Laser-Doppler-Anemometers realisiert. Dabei ist die Hitzdrahtsonde unmittelbar hinter dem Messvolumen des LDA-Systems angeordnet.

### Idee des neuen Sensorkonzepts

Das Konzept für den neu zu entwickelnden Schubspannungs-Sensor beruht auf der Kombination der bekannten Messprinzipien des Heiß-Film-Anemometers (HFA) mit einem miniaturisierten Laser-Doppler-Anemometer (MLDA) in einem Sensormodul. Durch das Zusammenführen dieser beiden Messtechniken sollen die bereits erwähnten Nachteile der Einzelkomponenten durch das jeweils komplementäre Teilsystem ausgeglichen werden.

Hitzdraht- bzw. Heißfilm-Anemometer sind wesentliche Elemente in der experimentellen Turbulenzforschung. Diese thermo-elektrischen Verfahren liefern zuverlässige Informationen über die Geschwindigkeit und die turbulenten Fluktuationen bei der Untersuchung freier turbulenter Strömungen. Probleme ergeben sich bei der Heißfilm-Anemometrie in der unmittelbaren Nähe fester Wände. Hier lassen sich, begründet durch schwer zu quantifizierende Wärmeströme in den Festkörper, nur qualitative Angaben machen (Desgeorges et al. [4]).

Bei der Anwendung von optischen Anemometrie-Verfahren in Grenzschichtströmungen besteht das Problem, dass bedingt durch eine zu geringe Dichte der benötigten Seeding-Partikel, die hochfrequenten turbulenten Fluktuationen nur bedingt bestimmt werden können. Wenn überhaupt, so kann eine quantitative Aussage in der Nähe fester Wände nur über die mittlere Geschwindigkeit, ermittelt über einen relativ langen Zeitraum, getroffen werden. Zur Ermittlung der Wand-Schubspannung wurden bereits verschiedene optische Systeme vorgeschlagen, die auf dem Prinzip der Laser-Doppler-Anemometrie beruhen (z.B.: Czarske et al. [2] und Gharib et al. [7]). Auch hier gelten die genannten Restriktionen bezüglich der Streupartikel. Dieses Problem verschärft sich, je größer die Geschwindigkeit der Anströmung wird.

Für die geplante Kombination der genannten Techniken in einem gemeinsamen Sensormodul z.B. zur Anwendung in Windkanalmodellen, ist zu beachten, dass konventionelle LDA-Systeme zu groß für eine solche Modellintegration sind. Bezüglich der Miniaturisierung von LDA-Systemen bestehen Erfahrungen an verschiedenen Institutionen im deutschsprachigen Raum. Zu nennen sind hier die Aktivitäten am ZARM Bremen (Fechtman et al. [6]), am Laser Zentrum Hannover (Czarske et al. [2]) sowie die Arbeiten von Damp [3] am Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis.

## **Geplante Realisierung**

Die Umsetzung des Projekts erfolgt in enger Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Aerodynamik und Strömungslehre (LAS) mit den Projektpartnern Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH (Astro) sowie der Advanced Semiconductor Instruments GmbH (ASI). Die Arbeiten lassen sich grob unterteilen in die fünf Schwerpunkte: Miniaturisiertes LDA-System, Heißfilm-Sensor-Array, Kombination zum Sensormodul, aerodynamische Erprobung und Kalibrierung.

Das Systemdesign für die Miniaturisierung des LDA erfolgt am LAS und bei Astro, die fertigungstechnische Umsetzung liegt bei Astro. In der ersten Bearbeitungsphase wird ein festbrennweitiges LDA entwickelt, aufgebaut und zur Erprobung im Windkanal bereitgestellt. Ein Konzept zur Versorgungselektronik der Laserdiode sowie des Detektors für einen dezentralen Einsatz wird erarbeitet. Die Anforderungen an den mechanischen Aufbau werden definiert. Besonderer Wert wird dabei auf Kompaktheit und Robustheit gelegt.

Die Entwicklung und Fertigung der Heißfilm-Sensortechnik erfolgt im wesentlichen bei ASI und dem LAS. In diesem Schritt werden geeignete Materialkombinationen sowohl für das Substrat wie auch für die Zuleitung und den eigentlichen Sensor untersucht und ausgewählt. Ein weiterer Schwerpunkt ist in der Kontaktierung und im mechanischen Aufbau zu sehen.

Die Integration der Einzelkomponenten zu einem gemeinsamen miniaturisierten Sensormodul wird am LAS mit Unterstützung beider Projektpartner durchgeführt. Besonderer Wert wird dabei auf einen kompakten und robusten Systemaufbau gelegt. Weiterhin wird untersucht werden, wie sich die Einzelkomponenten durch thermische und/oder elektrische Effekte des Systems gegenseitig beeinflussen

Die Modellintegration und die aerodynamische Erprobung sowohl der einzelnen Komponenten als auch des Gesamtmoduls wird am Windkanal des LAS in Cottbus durchgeführt werden.

Die Entwicklung der Methoden zur in situ Kalibrierung des Heißfilmarrays durch das LDA-Modul wird am LAS durchgeführt werden.

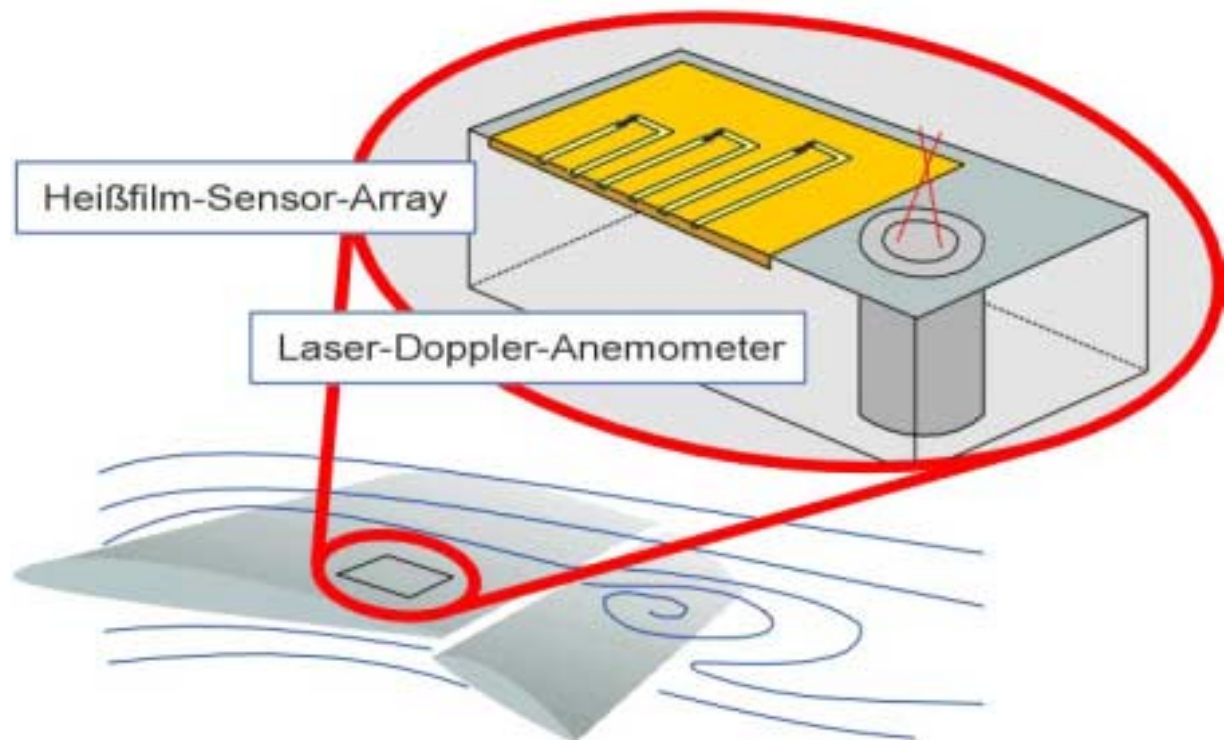
## **Mögliche Einsatzgebiete des neuen Sensors**

Aufgrund des hohen Miniaturisierungsgrades des Sensormoduls erschließt sich für den Messeinsatz eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Neben der Erweiterung der wissenschaftlichen Erkenntnis im Bezug auf turbulente Vorgänge in der Strömungsgrenzschicht sind auch Ergebnisse mit wirtschaftlicher Relevanz zu erwarten. Mit Hilfe der zu entwickelnden Strömungssensoren können experimentelle aerodynamische Untersuchungen auch außerhalb von Windkanälen durchgeführt werden. Nach dem heutigen Stand der Technik ist es kaum möglich, quantitative Strömungsuntersuchungen, z.B. an Originalflugzeugen, durchzuführen. Bei Applikation der geplanten Sensormodule an Versuchsträgern im Originalmaßstab lässt sich ein enormes aerodynamisches Optimierungspotential erschließen. Die Schwierigkeit, die strömungsmechanischen Ähnlichkeitsgesetze einzuhalten, lässt sich somit entschärfen. Dies hat letztlich nicht nur wirtschaftliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch zukünftiger Luftfahrzeuge, sondern indirekt, durch Vermeidung von Schadstoffemissionen, auch umweltpolitische Relevanz.

Die Triebwerksindustrie wird in Zukunft verstärkt versuchen, turbulente Strömungen aktiv zu beeinflussen. Als Beispiel sind aktive Maßnahmen zur Lärminderung am Fan oder am Triebwerksstrahl zu nennen. Hierfür werden in der Entwicklungsphase Messsysteme wie das hier vorgestellte miniaturisierte Sensormodul benötigt.

Ein weiteres Anwendungsgebiet ist in der Fahrzeug-Aerodynamik zu sehen. Bis heute ist es nicht in ausreichender Qualität möglich, die Straßenfahrt von Kraftfahrzeugen im Windkanal zu simulieren. Besonderes Augenmerk zielt dabei auf die Fahrt bei Seitenwind, die Nachbildung der Unterbodenströmung oder die instationäre Fahrzeugaerodynamik. Durch die Applikation von miniaturisierten Strömungssensoren an Versuchsfahrzeugen oder Prototypen im Originalmaßstab lässt sich ein enormes aerodynamisches Optimierungspotential erschließen.

Prinzipiell kann das Sensormodul zur Untersuchung sämtlicher weiterer Strömungsprobleme optisch transparenter Fluide zum Einsatz kommen, bei denen die turbulente Wandschubspannung relevant ist (z.B. verfahrenstechnische Anwendungen in der Lebensmittel- und chemischen Industrie).



Prinzipskizze des geplanten Sensormoduls

### Dank

Die Arbeiten zu diesem Projekt werden im Rahmen des nationalen Luftfahrtforschungsprogramms III vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

## Literatur

- [1] Bruun, H.H.: Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis, Oxford University Press, 1995
- [2] Czarske, J.; Büttner, L.; Razik, T.; Müller, H.; Dopheide, D.; Becker, S.; Zanoum, E.S.; Durst, F.: Messung der Wandschubspannung mit einem ortsauflösenden LDA-Profilesensor; GALA-Jahrestagung 2002, Rostock; September **2002**.
- [3] Damp, S.: Einsatz eines modifizierten Miniatur-LDAs zur hochaufgelösten Grenzschichtmessung, 5. GALA-Fachtagung 1996, 11. bis 13. Sept. **1996**, DLR Berlin.
- [4] Desgeorges, O.; Lee, T.; Kafyeke, F.: „Multiple hot-film sensor array calibration and skin friction measurement”, Exp. in Fluids, Vol. 32 **2002**, pp. 37-43.
- [5] Durst, F.; Zanoun, E.-S.; Pashtrapanska, M.: „In situ calibration of hot wires close to highly heat-conducting walls”, , Exp. in Fluids, Vol. 31 **2001**, pp. 103-110.
- [6] Fechtmann, C., Mahnken, M., Beyer, W. & Egbers, C.: Entwicklung stark miniaturisierter Laser-Doppler-Anemometer für die Integration in Windkanalmodellen; GALA- Jahrestagung 2000, Freising-Weihenstephan; September **2000**.
- [7] Gharib, M.; Modares, D.; Fourchette, D.; Wilson, D.: "Optical Microsensors for Fluid Flow Diagnostics". AIAA, January **2002**, AIAA Paper No. AIAA-2002-0252.