

OBERFLÄCHENMESSTECHNIKEN ZUR STRÖMUNGSANALYSE AM ROSTOCKER LEITEXPERIMENT

SURFACE MEASUREMENT TECHNIQUES FOR FLOW ANALYSIS ON THE ROSTOCK LEITEXPERIMENT

A. Wolter¹⁾, A. Berns²⁾, Ch. Dobriloff³⁾, A. Leder¹⁾, E. Obermeier²⁾ und W. Nitsche³⁾

¹⁾ Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik (*IsM*), Albert-Einstein-Str. 2, 18051 Rostock

²⁾ TU Berlin, Microsensor & Actuator Technology (*MAT*), Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin

³⁾ TU Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt (*ILR*), Marchstraße 12, 10587 Berlin

Oberflächenmessverfahren, Wanddruck, Wandschubspannung, MEMS, Datenrekonstruktion
surface measuring techniques, wall pressure, wall shear stress, MEMS, data reconstruction

Einleitung

Typische Aufgaben moderner Oberflächenmesstechniken sind die Erfassung von Wanddruck-, Wandschubspannungs- oder Temperaturverteilungen. Neben klassischen Einzelsensoren kommen zunehmend Sensorarrays zum Einsatz, welche neben einer hohen örtlichen Auflösung ausgezeichnete dynamische Eigenschaften aufweisen. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“ sind am so genannten „Rostocker Leitexperiment“ verschiedene Oberflächenmesstechniken in der Erprobung. Zusammen mit laseroptischen Analysen des Strömungsfeldes werden sie künftig Aussagen zu den Rückwirkungen der freien Strömung auf die Körperoberflächen ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit werden drei dieser Oberflächenmesstechniken näher vorgestellt. Dazu wird auf ein neues Signalverarbeitungskonzept eingegangen, welches die Rekonstruktion breitbandiger und intermittenter Prozesse aus sequentiell gewonnenen Messreihen ermöglicht.

Das Konzept des Rostocker Leitexperiments

Das Rostocker Leitexperiment beinhaltet einen strömungsmechanischen Grundlagenversuch, dessen Zielstellung einerseits die experimentelle Analyse der Strömungstopologie,

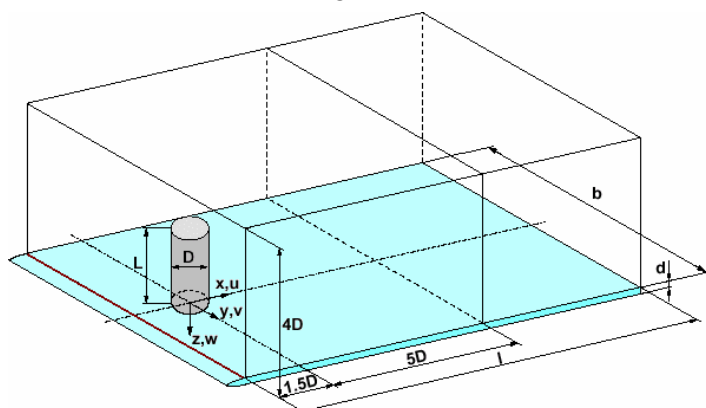


Abb. 1: Skizze zum Aufbau des Rostocker Leitexperiments

andererseits die Erprobung verschiedener Sensortechnologien ist. Das Experiment wird charakterisiert durch einen kurzen quer angeströmten Zylinderstumpf mit einem freien und einem wandbegrenzten Ende bei einem Länge-Durchmesser-Verhältnis von 2,0 (Abb. 1). Die Geschwindigkeit der Anströmung entspricht einer Reynoldszahl von $Re_D = 2,0 \cdot 10^5$. Die Strömungstopologie, vgl. Abb. 2, wird von freien Scherschichten (1) und (2), den Wandgrenzschichten auf der End-

21.2

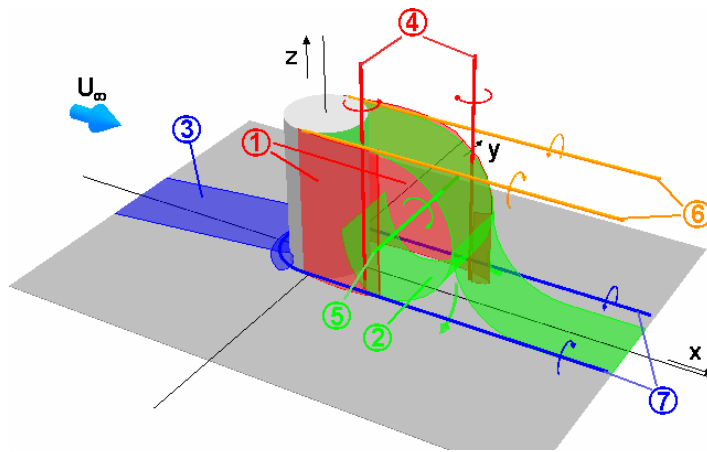


Abb. 2: Strömungstopologie am Zylinderstumpf: [Richter 2005]

scheibe (3) sowie den dreidimensionalen Wirbelstrukturen (4)-(7) bestimmt. Aus strömungsmechanischer Sicht sind insbesondere die Phänomene des turbulenten Transports und die Wechselwirkung der Wirbelstrukturen von Interesse, vgl. [Leder 1992].

Zu weiteren Details des Leitexperimentes seien folgende Publikationen empfohlen: [Jensch et al 2006] und [Wolter et al 2006], in welchen bereits Ergebnisse des Einsatzes von LDA- und PIV-Techniken sowie von Oberflächenarrays vorgestellt wurden.

Druckmessungen mit konventionellen Sensoren

Neben einer Reihe von neu entwickelten Oberflächenmessverfahren kommen an der Leitexperimentkonfiguration auch konventionelle Messtechniken zum Einsatz, die als Referenz für die anderen Verfahren zu Vergleichszwecken herangezogen werden. Als sehr zuverlässig haben sich zu diesem Zweck einfache Druckbohrungen in der Oberfläche des Versuchsmodells erwiesen. Diese werden rückseitig mit kommerziellen Drucksensoren verbunden. Für die hier vorgestellten Messungen wurden piezoresistive Miniatur-Differenzdrucksensoren der Firma Honeywell eingesetzt, die über einen Messbereich von 0,5 psi bei einer spezifizierten Reaktionszeit von max. 1 ms verfügen. Die Signalverstärkung erfolgt durch einen rauscharmen 96-Kanal-Spannungsverstärker mit Offsetkorrektur. Die Kalibrierung wird mittels einer hochpräzisen Kalibrierdruckdose manuell durchgeführt. Die Verwendung von Differenzdrucksensoren ermöglicht eine gleichzeitige Kalibrierung aller Sensoren, indem diese über einen Druckverteiler mit dem Referenzdruck der Kalibrierdruckdose beaufschlagt werden. Insgesamt kamen bei den bisher durchgeführten Untersuchungen 55 Einzelsensoren zum Einsatz. Davon entfallen zwölf auf das freie Ende des Zylinderstumpfes, 33 auf dessen Mantelfläche sowie weitere zehn auf den drehbar gelagerten Teller, auf welchem der Zylinderstumpf montiert ist (Abb. 3).

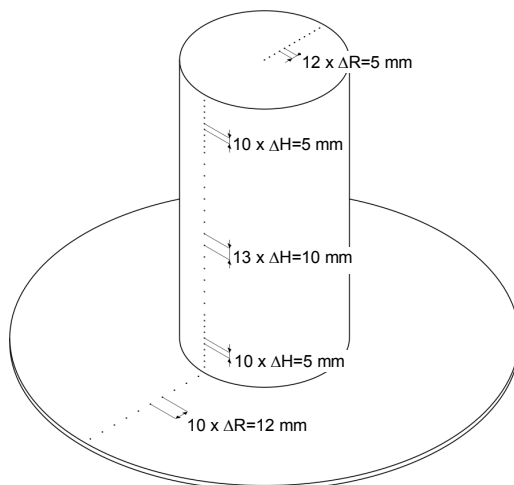


Abb. 3: Druckbohrungspositionen

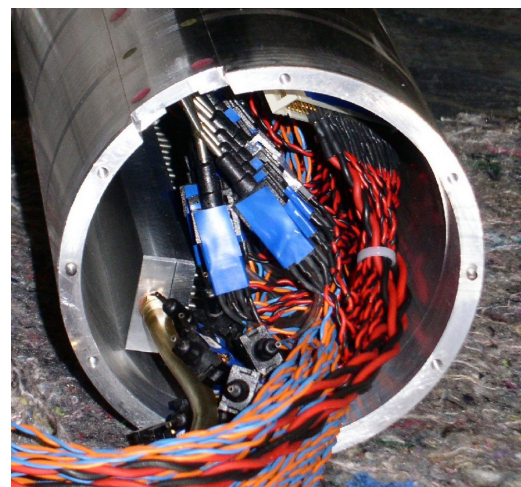


Abb. 4: Zylinder mit Drucksensoren instrumentiert

Durch die Drehung des Tellers während der Messungen ist eine Erfassung des Wanddrucks auf der gesamten Oberfläche möglich. Die geringe Größe der Einzelsensoren ermöglicht die vollständige Integration aller Sensoren direkt in den Zylinderstumpf. Dadurch befinden sich die Sensoren unmittelbar hinter den jeweiligen Druckbohrungen, so dass der bei höheren Frequenzen dämpfende Einfluss von Druckleitungen minimiert wird (Abb. 4).

Druckmessungen mit Oberflächensensoren auf MEMS-Basis

Zur messtechnischen Erfassung der Wanddruckverteilung wurden am MAT (TU Berlin) piezoresistive Drucksensoren für einen Differenzdruckbereich von ± 1000 Pa entwickelt, charakterisiert und unter Verwendung einer neuen Aufbau- und Verbindungstechnik in verschiedene Oberflächen-Arrays integriert. Abb. 5 zeigt den Zylinderstumpf des Leitexperiments, ausgestattet mit 48 Drucksensoren, integriert in insgesamt sechs Oberflächen-Sensor-Arrays.

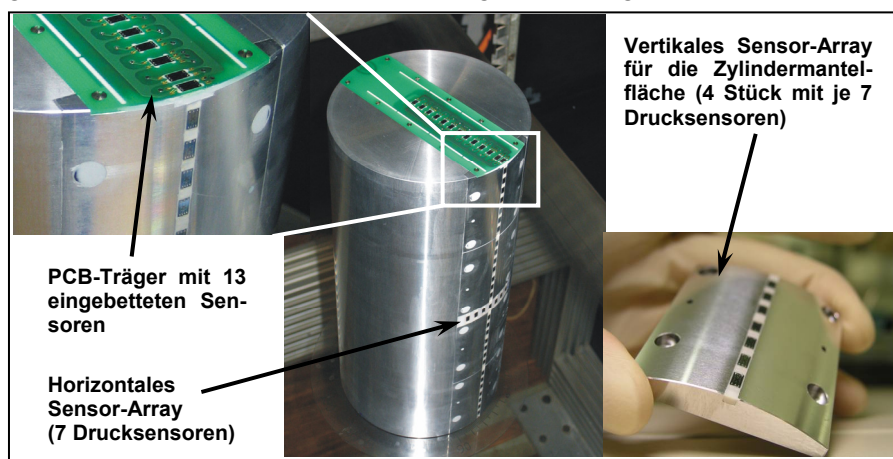


Abb. 5: Zylinderstumpf auf einer ebenen Platte ausgestattet mit insgesamt 48 MEMS Drucksensoren. Die Sensoren sind in sechs Oberflächen-Sensor-Arrays integriert.

Aufgrund der wandbündigen Anordnung der Sensoren lassen sich Bohrungen und Schläuche zur Druckankopplung, welche die Bandbreite einschränken würden, gänzlich vermeiden. Die Sensoren sind über Referenzdruckkammern mit einem Druckkalibrator verbunden und können so während der Messungen statisch kalibriert werden.

Durch Rotation des Zylinders um seine vertikale Achse lassen sich sequenziell Druckdaten auf der gesamten Oberfläche erfassen. Detaillierte Informationen über Design und Herstellungstechnologie der Sensoren sowie der Instrumentierung während der Messungen finden sich in [Berns et al 2005] und [Berns et al. 2006]. Um Unebenheiten auf der Vorderseite zu vermeiden, wurde ein Redesign mit elektrischer Rückseitenkontaktierung entwickelt (Abb. 6). Durchkontaktierungen auf dem Chip ermöglichen den oberflächenbündigen Verguss in geeignete Sensorträger (PCB).

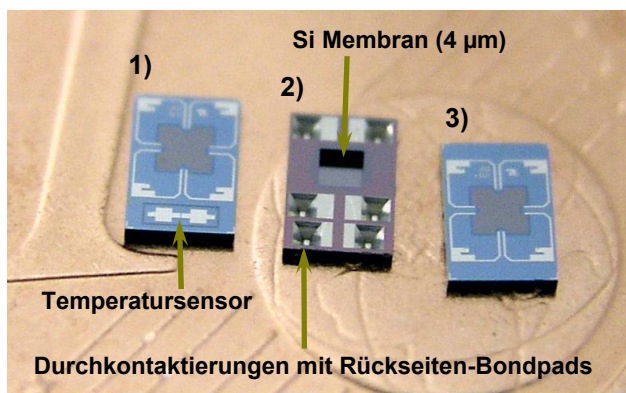


Abb. 6: Drucksensorchips (Chipfläche: 2×3 mm²). (1): Vorder- und (2): Rückseite der Ausführung mit Temperatursensor, (3): Vorderseite eines Sensors ohne Temperatursensor

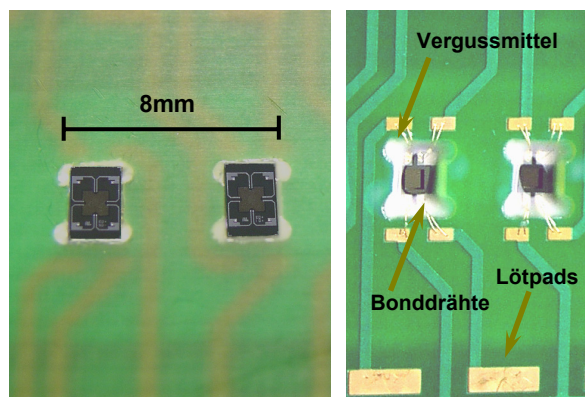


Abb. 7: Ausschnitt eines oberflächenbündig vergossenen Sensorarrays. Links ist die Vorderseite, rechts die Rückseite abgebildet.

Auf diese Weise lassen sich aus strömungstechnischer Sicht nahezu störungsfreie Oberflächen-Sensor-Arrays realisieren, mit deren Einsatz sich die Güte der Wanddruckmessdaten weiter verbessern lässt. Abb. 7 zeigt einen Ausschnitt eines Test-Sensor-Arrays, bei dem die Einzelsensoren oberflächenbündig vergossen und unter Verwendung von Bonddrähten (30 µm Golddraht) rückseitig kontaktiert sind.

Wandschubspannungsmessungen

Zur Messung der Wandschubspannung werden am Rostocker Leitexperiment Oberflächenhitzdrähte verwendet, siehe [Sturzebecher 2001] und auch [Burkhardt 2004]. Dabei handelt es sich im Prinzip um gewöhnliche Hitzdrähte mit einem Durchmesser von 5 µm, die jedoch

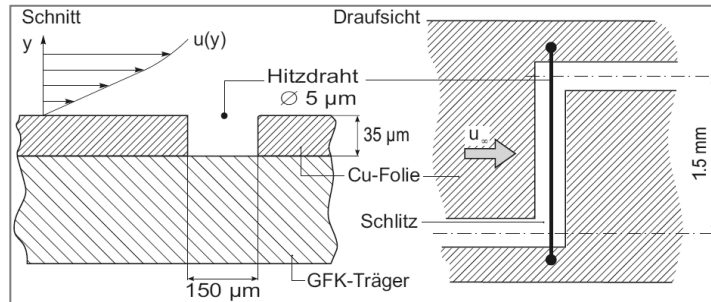


Abb. 8: prinzipieller Aufbau eines Oberflächenhitzdrahtes (überarbeitet aus [Nitsche 2006])

über einen schmalen Schlitz unmittelbar auf die zu untersuchende Oberfläche geschweißt werden (Abb. 8).

Da ein solcher Oberflächenhitzdraht einerseits eine ausgesprochene Winkelabhängigkeit in Bezug auf die Anströmrichtung besitzt und andererseits prinzipbedingt nicht in der Lage ist, zwischen einer Vorwärts- und Rückwärts-Anströmung zu unterscheiden,

wird die Oberflächenhitzdrahttechnik im Rahmen des SPP 1147 dahingehend weiterentwickelt, die lokale Wandschubspannung nach Betrag und Richtung über einem Winkelbereich von vollen 360° bestimmen zu können. Die Weiterentwicklung führt zu einer Änderung der Schlitzgeometrie in Form einer asymmetrischen Vertiefung unter dem Hitzdraht, zum anderen zu einer Kombination von drei Einzelhitzdrähten in Form einer Delta-Oberflächenhitzdrahtsonde (Abb. 9). In Abb. 10 ist für einen Einzelhitzdraht exemplarisch eine vollständige Winkel- und Wandschubspannungskalibrierung dargestellt. Der Hitzdraht wurde dabei unmittelbar gegen eine hochpräzise Wandschubspannungswaage kalibriert, die eine direkte Messung der Wandschubspannung gestattet.

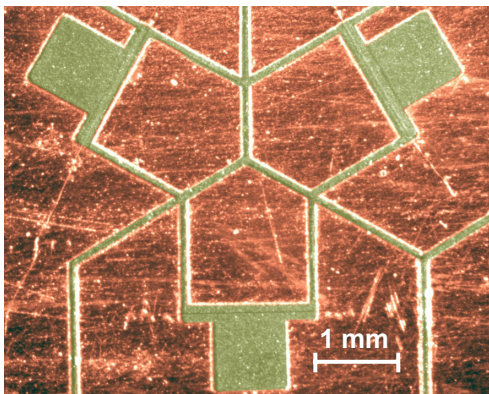


Abb. 9: Delta-Oberflächenhitzdrahtsonde

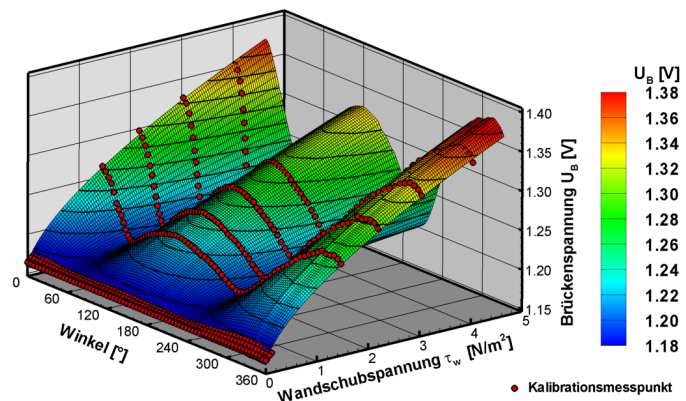


Abb. 10: Kalibrierungsfläche eines Einzelhitzdrahtes

Eine solche Kalibrierung muss für jeden Einzelhitzdraht erfolgen, daher ist diese Prozedur relativ aufwändig und zeitintensiv. Nach den Kalibrierungsmessungen wird für jeden untersuchten Anströmwinkel und für jeden Hitzdraht eine empirische Korrelation zwischen der Brückenspannung U_B und der Wandschubspannung τ_w nach (1) angenommen. Die Konstanten A , B und n werden dabei aus den Messwerten ermittelt.

$$U_B^2 = A + B \cdot \tau_w^n \quad (1)$$

Das Ergebnis sind je Delta-Sonde drei Kalibrierungsflächen (Abb. 10), aus denen später für die gemessenen Hitzdrahtbrückenspannungen U_B die jeweils möglichen Kombinationen aus Betrag und Richtung der Wandschubspannung für die Einzelhitzdrähte ermittelt werden. So entsprechen die Konturlinien in Abb. 10 z. B. den auf den jeweiligen Brückenspannungsniveaus liegenden möglichen Kombinationen für diesen Hitzdraht. Unter der Annahme, dass bei einer Messung alle drei Einzelhitzdrähte eine in Betrag und Richtung identische Wandschubspannung erfahren, kann diese aus dem gemeinsamen Schnittpunkt der drei auf die beschriebene Weise gewonnenen und auf die Winkel-Wandschubspannungsebene projizierten Konturlinien bestimmt werden.

Am Rostocker Leitexperiment kam auf dem drehbar gelagerten Teller in der Endscheibe zunächst ein Array mit 14 Delta-Sonden (entspricht 42 Einzelhitzdrähten) zum Einsatz (Abb. 12). Die Kalibrierung erfolgte auch hier direkt gegen die Wandschubspannungswaage, die zu diesem Zweck anstelle des Zylinders in der Tellermitte positioniert war (Abb. 11).

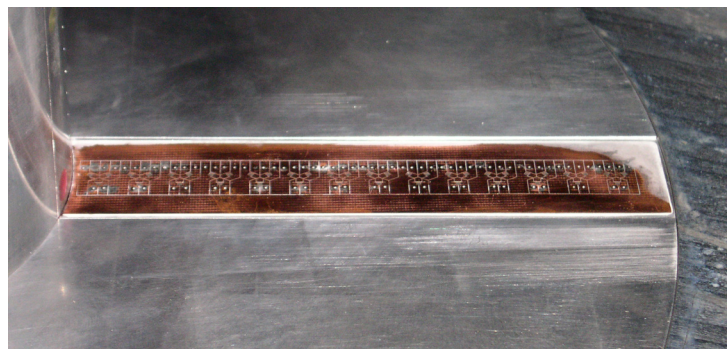
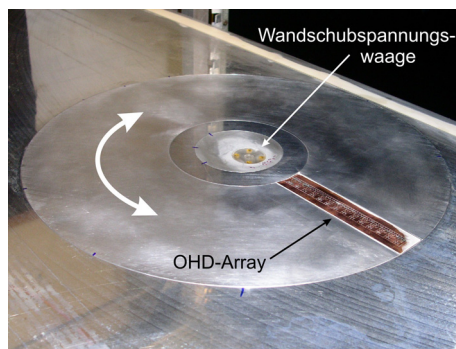


Abb. 11: Oberflächenhitzdrahtkalibrierung

Abb. 12: Oberflächenhitzdrahtarray im Drehteller

Bei der Kalibrierung wird der Teller bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten in kleinen Schritten um 360° gedreht. Dadurch ändert sich auch die relative Position der Hitzdrähte zur Wandschubspannungswaage, was durch eine auf die Vorderkante der Endscheibe bezogene Lauflängenkorrektur berücksichtigt wird. Dazu wird zunächst von einem Verlauf des Reibungsbeiwertes für turbulente Grenzschichten nach Prandtl ausgegangen:

$$c_{f,turb} = \frac{0,0592}{\sqrt[5]{Re_x}} \quad (2)$$

Da die Wandschubspannung an der Wandschubspannungswaage bekannt ist, kann hierüber die lokale Wandschubspannung an den jeweiligen Hitzdrahtpositionen bestimmt werden. Der Verlauf nach (2) stellt jedoch bisher nur eine erste Annahme dar und muss in einer späteren Untersuchung noch validiert und gegebenenfalls korrigiert werden.

Datenaufbereitung und Auswertung

Wie Abb. 13 verdeutlicht, erfordert die Auswertung sequentieller Messreihen, wie sie auch bei den Oberflächenmessverfahren entstehen, die Rekonstruktion der Phasenbeziehung. Zur Auswahl einer geeigneten Rekonstruktionsmethode sind die statistischen Eigenschaften des Prozesses von Bedeutung. Die Strömung am Leitexperiment wird charakterisiert von mehreren gekoppelten Wirbelsystemen und turbulenten Transportprozessen. Datenanalysen zeigen, dass sich diese Vorgänge an der Oberfläche als breitbandige Fluktuationsprozesse abbilden. Es wird zudem angenommen, dass durch nichtlineare Wechselwirkungen der Systeme sich ein resultierender Gesamtprozess mit wiederkehrenden ähnlichen Prozesszuständen (sog. Signalgruppen) bildet.

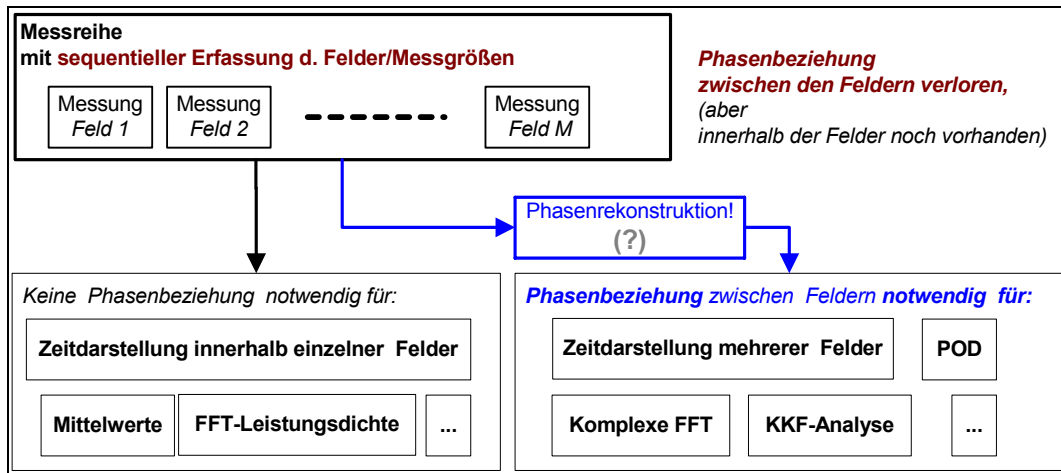


Abb. 13: Datenauswertung von sequentiell erfassten Messreihen – Problem des Verlustes der Phasenbeziehung und deren Rekonstruktion

Zur Rekonstruktion der Phasenbeziehung bei periodischen Signalen ist die Methode der *Phasenmittelung* einsetzbar, wie sie auch bei der LDA Analyse abgelöster Strömungen eingesetzt wird [Leder et al 1988]. Nach Festlegung einer Grundfrequenz erhält man eine zeitgemittelte Grundperiode, die auch vorhandene harmonische Oberschwingungen wiedergibt – alle Nichtvielfachen der Grundfrequenz werden dagegen ausgeblendet.

Um die Rekonstruktion der Phasenbeziehung auch für breitbandige und intermittierende Prozesse zu ermöglichen, wurde am *Ism* der neuartige Ansatz der *Signalgruppensynchronisation* (Abb. 14) entwickelt und getestet.

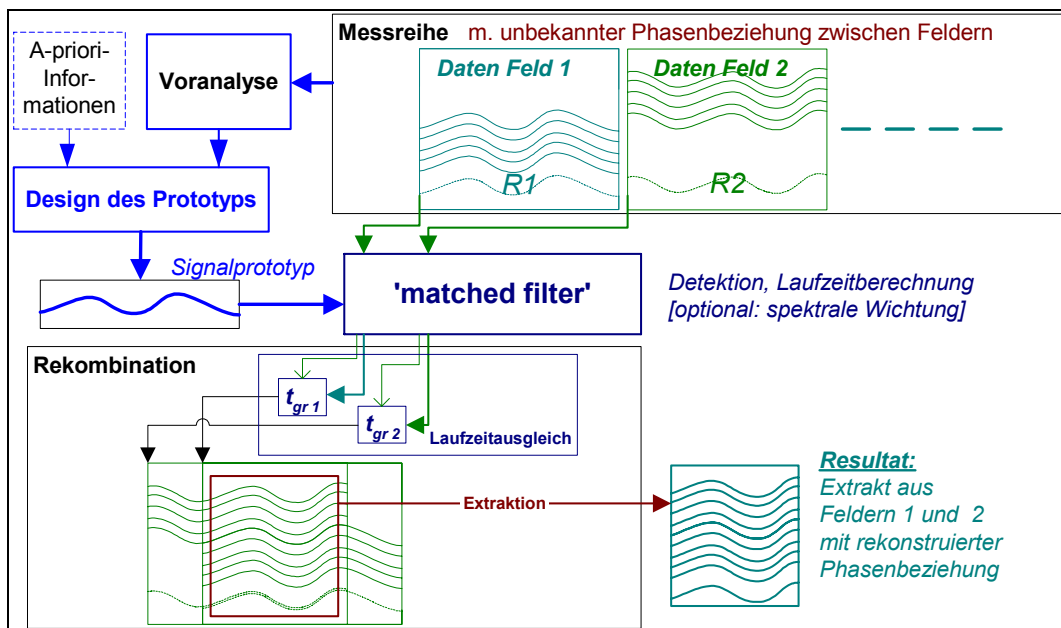


Abb. 14: Schema der Signalgruppensynchronisation

Allgemeine Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist, wie auch bei der Phasenmittelung, die synchrone Aufzeichnung eines Referenzsignals an einem signifikanten Raumpunkt.

Bei diesem Verfahren wird mit Hilfe einer Voranalyse zunächst ein *Signalprototyp* der zu rekonstruierenden Signalgruppe erzeugt und als Referenz einem *matched filter* zugeführt. Die Anwendung des *matched filter* auf die Referenzkanäle der Messungen (R_1, R_2, \dots) liefert für jedes Feld die Information, in welchem Bereich die größte Ähnlichkeit zwischen *Signalproto-*

typ und Referenzkanal auftritt, dazu Informationen über den *Grad der Ähnlichkeit* sowie die *relative Phasenlage* (*spezifische Gruppenlaufzeit t_{gr}*).

Als Kern des ‚*matched filter*‘ wird ein *Korrelationsdetektor* verwendet, welcher sich insbesondere für die Auffindung von breitbandigen Signalgruppen in stochastisch geprägten Signalgemischen eignet [Lange 1974]. Bei der abschließenden *Rekombination* werden anhand der *Gruppenlaufzeiten t_{gr}* alle Felder zeitlich synchronisiert und zusammengesetzt. Das Verfahren eignet sich sowohl für breitbandige periodische als insbesondere auch für breitbandige intermittierende Prozesse.

Der gesamte Algorithmus ist mit Hilfe der numerischen Signalverarbeitung zu implementieren [Kronmüller 1991].

Diskussion ausgewählter Ergebnisse

Die aus den Wanddruckmessungen gewonnen Verteilungen des Druckbeiwertes c_p und der Schwankungsintensität c'_p an der Zylinderoberfläche zeigt Abb. 15. Die Verteilung auf der Mantelfläche wird charakterisiert durch einen Staubereich mit positivem Druckbeiwert ($0...30^\circ$), der in einen Bereich laminarer Grenzschichten mit abnehmendem Druck von $30...70^\circ$ übergeht. Es folgt ein Gebiet mit ansteigendem Druck bis zur Ablöselinie bei ca. 80° , an die sich das Rückströmgebiet mit annähernd konstantem negativem Druckbeiwert anschließt. Die maximalen Schwankungsintensitäten c'_p treten in den Bereichen an und hinter der Ablöselinie auf. Am freien Ende des Zylinders liegt im vorderen Bereich mittig ein durch Unterdruck gekennzeichnetes Ablösegebiet, gefolgt von einem Gebiet, in welchem die Strömung teilweise wieder anlegt. Die maximalen Schwankungsintensitäten c'_p treten im Bereich der seitlich ablösenden Kopfwirbel auf.

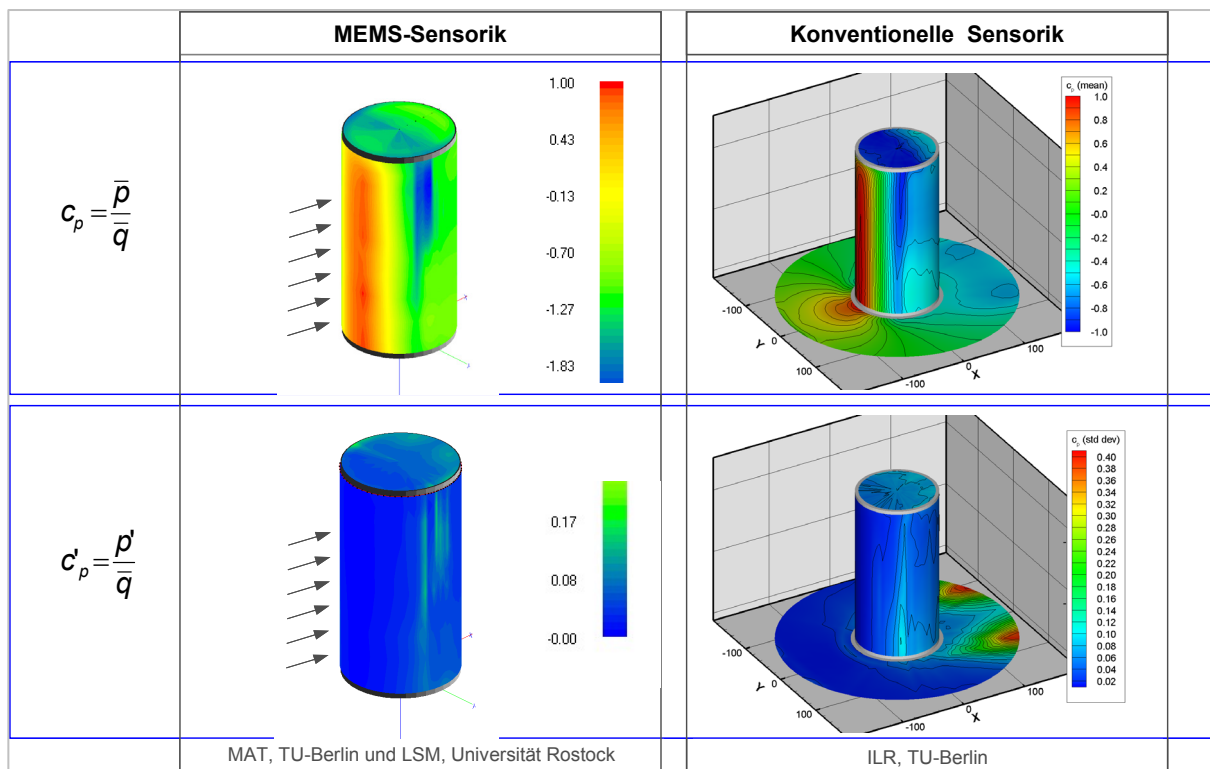


Abb. 15: Vergleich konventioneller und MEMS-Drucksensorik anhand von c_p und c'_p

Die mit Delta-Oberflächenheizdraht-Sonden gemessene und gemittelte Verteilung der Wand Schubspannungsvektoren auf der Endscheibe zeigt Abb. 16. Deutlich zu erkennen ist der Aufstau der Anströmung und ein lokales Ablösegebiet unmittelbar vor dem Zylinder. Durch Umlenkung der Strömung entwickelt sich zu beiden Seiten des Zylinders ein Hufeisenwirbel,

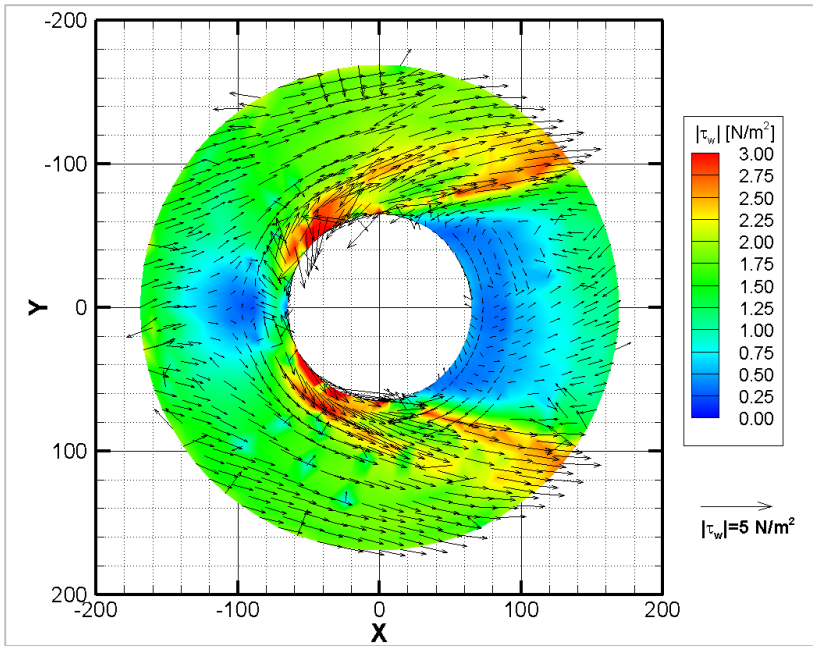


Abb. 16: Zeitlich gemittelte Wandschubspannungsverteilung auf der Endscheibe

dessen äußere Begrenzung durch einen hohen Wandschubspannungsgradienten gekennzeichnet ist. Am Rand des Zylinders wird die Strömung zunächst stark beschleunigt, was zu einem deutlichen Anstieg der Wandschubspannungen führt. Bei einem Winkel von etwa 80-90° beginnt die Strömung dann tangential vom Zylinder abzulösen, wobei sich die dort entstehende Scherschicht ebenfalls durch einen hohen Gradienten auszeichnet, welcher das große Ablösegebiet im Zylindernachlauf deutlich sichtbar begrenzt. Interessant ist in diesem

Zusammenhang die Tatsache, dass zwischen den beiden „Streifen“ erhöhter Wandschubspannungen auf beiden Seiten des Zylinders ein kleines Gebiet geringerer Wandschubspannung liegt, das stromab durch das Verschmelzen der Strukturen abgeschlossen wird. Trotz der grundsätzlich plausiblen Wiedergabe der lokalen Wandschubspannungen weist Abb. 16 noch eine gewisse Anzahl von „Ausreißern“ auf. Diese sind auf den derzeit noch in der Entwicklung befindlichen Algorithmus zur Auswertung der Wandschubspannungsvektoren zurückzuführen. Auch wurde z.B. der Einfluss unterschiedlicher Umgebungstemperaturen zwischen der Kalibrierung und der eigentlichen Messung in den hier gezeigten Ergebnissen noch nicht berücksichtigt, was jedoch für zukünftige Untersuchungen vorgesehen ist. Die Analyse der spektralen Eigenschaften des Oberflächendrucks ermöglicht ebenfalls Rückschlüsse auf die Prozesse. Exemplarisch sind in Abb. 17 die räumlichen Verteilungen ausgewählter Spektralkomponenten vorgestellt.

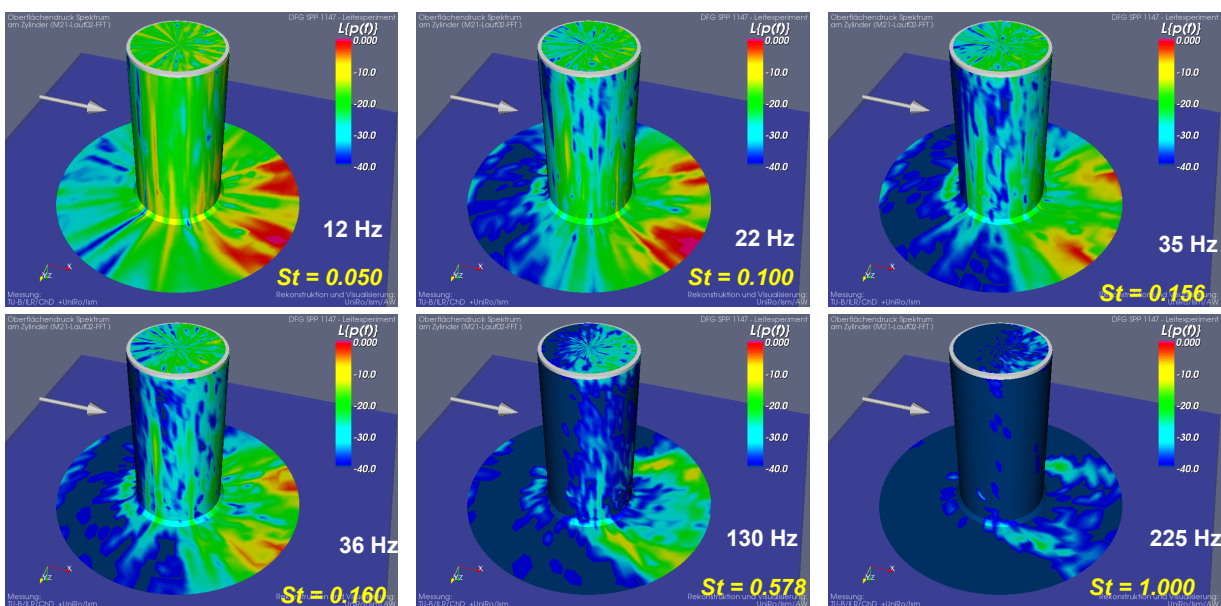


Abb. 17: Räumliche Verteilung ausgewählter Spektralkomponenten

Es ist zu erkennen, dass alle dargestellten Frequenzen ihr Maximum im Bereich der Primär- und der Hufeisenwirbel zeigen. Auch in den Ablösegebieten am freien Ende des Zylinders und am Mantel sind lokale Maxima zu erkennen. Während hohe Frequenzen sich vor allem auf diese Bereiche konzentrieren, ist die räumliche Ausstrahlung der niedrigen Frequenzen ausgeprägter.

Ein Test des Algorithmus der Signalgruppenrekonstruktion wurde mit Messdaten der konventionellen Drucksensoren durchgeführt. Der gewählte Signalprototyp wies eine Bandbreite von $B_0 = 500$ Hz auf. Die rekonstruierte Signalgruppe umfasst 72 Felder (Winkel Ebenen). Aus der Sequenz sind in Abb. 18 exemplarisch drei einzelne Zeitschritte dargestellt, die das Abschwimmen eines Primärwirbels zeigen.

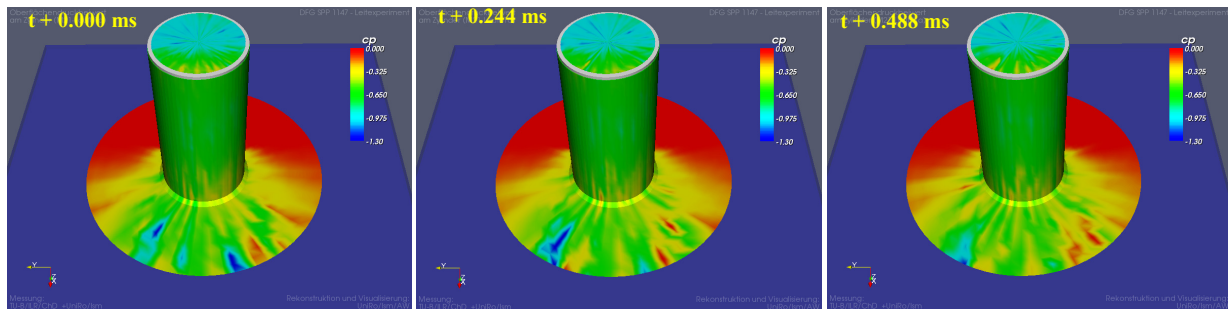


Abb. 18: Wanddruckschwankungen: drei ausgewählte Zeitschritte der rekonstruierten Sequenz

Die hier gezeigte Schrittweite beträgt weniger als $1/100$ der Periodendauer der primären Wirbelstraße. Die vollständige Rekonstruktion ist als Videosequenz mit 1023-facher Zeitlupe verfügbar.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden drei Oberflächenmesstechniken zur Erfassung von Wandruck- und Wandschubspannungsverteilungen am „Rostocker Leitexperiment“ vorgestellt. Beim Aufbau flächiger Arraystrukturen aus diskreten Sensoren wird die Packungsdichte durch die Bauform eingeschränkt. Hier können integrierte Sensorarrays ihre Vorteile ausspielen, zu denen auch ausgezeichnete dynamische Eigenschaften gehören. Als Vertreter wurden Prototypen so genannter MEMS- und Wandhitzdrahtarrays vorgestellt. Da die zeitaufgelöste Erfassung in der Regel nicht gleichzeitig für die gesamte Oberfläche möglich ist, werden Teilfelder (Winkel Ebenen) gebildet und sequentiell erfasst. Hierdurch wird es notwendig, zur Rekonstruktion des gesamten Feldes die Daten ‚phasenrichtig‘ zusammenzusetzen. Dazu wurde ein spezielles Verfahren am **Ism** konzipiert, welches sowohl bei der Datensynchronisation breitbandiger periodischer Prozesse anwendbar ist, sich aber auch für die Detektion und Beobachtung intermittierender Vorgänge eignet.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich zunächst bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, welche im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1147 diese Untersuchungen ermöglicht hat. Weiterhin gilt unser Dank allen beteiligten Kollegen, welche wissenschaftlich, technisch oder organisatorisch die Erprobung der Oberflächenmesstechniken am Rostocker Leitexperiment unterstützt und abgesichert haben.

Literatur

- Berns, A., v.Metzen, R., Mukhopadhyay, B., Obermeier, E., Wolter, A., Leder, A., 2005: „Ultra Sensitive AeroMEMS sensor Array for High-Resolution Wall Pressure Measurements“, Proceedings of the 19th Eurosensors, Barcelona, Spain, 11th – 14th September 2005, MB07
- Berns et al., 2006: „AeroMEMS sensor array for high-resolution wall pressure measurements“, Sensors and Actuators. A, Vol. 132, pp. 104-111.
- Burkhardt, O., 2004: „Erprobung und Anwendung von Oberflächensensoren und Sensorarrays zur Erfassung instationärer Wandschubspannungen an Schaufelprofilen“, Dissertation, Technische Universität Berlin
- Jensch, M., Brede, M., Richter, F., Leder, A., 2006: „Verwendung des Time-Resolved Stereo-PIV Messsystems zur Ermittlung zeitaufgelöster Geschwindigkeitsfelder im Nachlauf eines Kreiszyinders“, in: Dopheide, D., Müller, H., Strunck, V., Ruck, B., Leder, A. (Hrsg.): „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 14. Fachtagung der GALA e.V. 2006“, PTB Braunschweig, S. 39.1-39.8
- Nitsche, W., Brunn, A., 2006: „Strömungsmesstechnik“, Springer, Berlin
- Kronmüller, H., 1991: „Digitale Signalverarbeitung“ Springer, Berlin
- Lange, F. H., 1974: „Signale und Systeme“, Band 3: Regellose Vorgänge, Verlag Technik, Berlin
- Leder, A., 1992: „Abgelöste Strömungen: physikalische Grundlagen“, Vieweg Verlag, Braunschweig, Wiesbaden
- Leder, A., Geropp, D., 1988: „Phase-averaged LDA measurements in turbulent separated flows“ in: Durão, D.F.G. (Editor): „Proceedings of the fourth International Symposium on Applications of Laser-Anemometry to Fluid Mechanics“, Lissabon, Portugal, paper 3.3
- Richter, F., 2005: „Experimentelle Untersuchungen zur Charakterisierung der Strömungs- und Turbulenzstrukturen im Nachlauf eines Kreiszyinderstumpfes unter Berücksichtigung der Zentrifugalbeschleunigung“. Dissertation, Universität Rostock
- Sturzebecher, D., Anders, S., Nitsche, W., 2001: „The surface hot wire as a means of measuring mean and fluctuating wall shear stress“, Experiments in Fluids, Vol. 31, No. 3, pp. 294–301
- Wolter, A., Leder, A., Berns, A., Obermeier, E., 2006: „Einsatz mikroelektromechanischer Drucksensoren (MEMS) in Kombination mit laseroptischen Messverfahren in der experimentellen Strömungsmechanik“, in: Dopheide, D., Müller, H., Strunck, V., Ruck, B., Leder, A. (Hrsg.): „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 14. Fachtagung der GALA e.V. 2006“, PTB Braunschweig, S. 30.1-30.8