

APPLIKATION VON PIV UND STEREO-PIV AN EINEM KÜHLSYSTEM EINER TURBINENROTORSCHAUFEL MIT VERRIPPTE WÄNDEN

M.P. Jarius, M. Elfert

DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik, Köln

Schlüsselwörter: Turbinenschaufelkühlung, 2-Pass-/Multipass-Kühlsystem, Rippen, 180°-Umlenkung, Krümmer, Dean-Wirbel, Ablösung, Strömungsmessung, PIV, Stereo-PIV, Visualisierung, Laserlichtschnitttechnik

Kurzfassung

Zur internen Kühlung von Gasturbinenrotorschaukeln werden so genannte Multipass-Kühlsysteme eingesetzt. Bei diesen labyrinthartigen Systemen ergeben sich wegen der mehrfachen Umlenkung zum einen und zusätzlich wegen der Rotation der Schaufel zum anderen deutlich geänderte Geschwindigkeitsverteilungen in den Kühlkanälen als in geraden nicht rotierenden Kanälen. Zur effizienten Auslegung eines solchen Kühlsystems werden genaue Kenntnisse der Strömungsfelder benötigt. Durch die Anwendung der flächenhaften PIV-Messtechnik werden solche Daten für ein realitätsnahes Kühlsystem zur Verfügung gestellt. Die PIV ist in der Lage, vollständige Geschwindigkeitsdaten selbst bei relativ hoher Turbulenz zu bestimmen, so wie sie hier in diesem Anwendungsfall vorliegen.

Als erster Schritt wurde diese Messtechnik stationär erprobt. Hierbei galt es, den erforderlichen optischen Zugang zum System sicherzustellen, was wegen der Wandturbulatoren, den Rippen an den Seitenwänden, Sichtbehinderung bedeutet. Die Rippen intensivieren den Wärmeaustausch und induzieren durch ihre Schrägstellung gesteuert zwei gegensinnig drehende Wirbel im Kanal. Dazu kommen Wirbel aus der Strömungsumlenkung, eine Herausforderung an die Messtechnik.

Zurzeit wird die PIV als 2-Komponenten-System im rotierenden System eingesetzt. Als logische Konsequenz werden die Messungen mit Einsatz der 3-Komponenten-PIV fortgesetzt. Die PIV-Messungen werden mit Ergebnissen von Strömungsvisualisierungstechniken wie der Ölanstrichtechnik sowie der Laser-Lichtschnitt-Technik ergänzt und verglichen.

Die Daten dienen der Validierung von Strömungssimulationsverfahren (CFD), mit deren Hilfe die Industrie moderne simulationsgestützte Optimierungsstrategien verfolgen kann.

Nomenklatur

α	°	Winkel
d	mm	Referenzlänge (entspricht der Länge der unteren Seite im ersten Kanal)
d_h	mm	hydraulischer Durchmesser
e	mm	Rippenhöhe
f	mm	Brennweite
$f\#$	-	Lichtstärke (F-Zahl)
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
p	mm	Rippenabstand
Re	-	Reynoldszahl ($Re = v_0 d_h / \nu$)
τ	µs	Pulsabstand
v	m/s	absolute Geschwindigkeit (v_0 mittlere Eintrittsgeschwindigkeit)
x, y, z	mm	kartesische Koordinaten

Einleitung

Das Institut für Antriebstechnik ist an nationalen und europäischen Forschungsprogrammen beteiligt und liefert der Industrie qualifizierte Strömungsmessdaten aus dem Bereich Turbomaschine, u. a. für die Validierung von CFD-Programmen. In vergangenen Vorhaben zur Schaufelinnenkühlung wurde das Strömungsverhalten einschließlich der Turbulenz berührungslos in den relativ kleinen und noch dazu rotierenden Kühlkanälen mit dem Laser-2-Fokus-Velozimeter (L2F) gemessen [Elfert (1996); Rathjen (1999)]. Dieses Verfahren arbeitet als Punktmessmethode sehr genau, wenn auch sehr zeitaufwendig. In geraden und glatten Kanälen mit im Allgemeinen moderater Turbulenz wurden damit sehr gute Resultate erzielt. Jedoch, typische aktuell angewendete Kühlsystemen für Turbinen sind serpentinenförmig und haben verrippte Wände zur Erhöhung des Wärmeaustauschs (**Abb. 1**, links). In diesem Fall mit extrem hoher Turbulenz ist das L2F-System nicht mehr in der Lage akkurat zu messen, insbesondere in der Nähe der Rippen sowie im Umlenkbereich mit Ablösung in den Ecken und starken Wirbeln. Die Trennwand zwischen den Kanälen bildet eine scharfkantige Umlenkung, die zur Ablösung im zweiten Kanal führt. Die Strömung innerhalb der Ablöseblase selbst ist fluktuierend und somit instationär [Elfert (2002, 2004); Jarius (2002, 2003)].

Mit modernen flächigen Messtechniken wie der Particle-Image Velocimetry (PIV) und der Planar-Doppler Velocimetry (PDV) kann man vollständige Strömungsflächen selbst bei relativ hoher Turbulenz messen. Als ein erster Schritt auf dem Wege der Anwendung der PIV im rotierenden System wurde ein 2-Pass-System stationär vermessen. Zwei Modelle wurden untersucht, mit glatten bzw. verrippten Wänden. Die hohe Qualität der erzielten Ergebnisse ermutigen zur Anwendung der 2-Komponenten PIV auf den rotierenden Fall. Als eine logische Konsequenz wird die 3-Komponenten PIV folgen, um die hochgradig dreidimensionale, komplexe Strömung im Umlenkbereich und in den Kanälen korrekt aufzulösen.

Modellgeometrie

Abb. 1 zeigt das interne Kühlsystem einer Turbinenschaufel (GE-CF6, links) als Anwendungsbeispiel und das untersuchte, transparente Plexiglasmodell eines 2-Weg-Systems (rechts). Die Geometrie des verrippten Testmodells ist in **Abb. 2** wiedergegeben. Die Teststrecke besteht aus einem trapezförmigen, fast dreieckigem Vorderkantenkanal mit radial auswärts gerichteter Strömung, einer 180°-Umlenkung und einem zweiten nahezu rechteckigen Kanal mit radial einwärts gerichteter Strömung. Das Verhältnis der hydraulischen Durchmesser vom zweiten zum ersten Kanal beträgt 1,53 und das Flächenverhältnis 2,04. Die Länge eines jeden Kanals beträgt 8,9 d mit $d = 25$ mm. Im Umlenkbereich wird die Strömung nicht nur um die 180° umgelenkt, sondern auch in einer Ebene senkrecht dazu durch die Schiefstellung der beiden Kanäle zueinander bedingt durch die Form der Turbinenschaufel. Die Gesamtlänge beträgt 10 d, der Abstand von der Trennwand zur Deckfläche 1,0 d. Die Trennwand hat eine Dicke von 0,2 d. Das Modell hat ein Einlaufgehäuse (nicht abgebildet) sowie eine unverrippte Ein- und Auslaufänge im Bereich des Schaufelfußes.

PIV – Particle-Image-Velozimetrie

Das Strömungsfeld wird stationär mit Hilfe der PIV und der Stereo-PIV vermessen. Die PIV basiert auf dem Prinzip das Strömungsfeld zweimal kurz hintereinander abzubilden [Raffel (1998), Willert (1997)]. Tracerpartikel (Aerosole) mit einer durchschnittlichen Größe von unter 1 μm werden der Strömung zugesetzt. Diese Partikel reflektieren in einem Laser-Lichtschnitt, der mit einer Lichtschnitt-Optik erzeugt wird, die aus einem System von einer sphärischen und zwei zylindrischen Linsen besteht. Der Lichtschnitt hat eine Dicke von 1 mm bei einem Divergenzwinkel von 24°. Der Lichtschnitt ist justierbar durch einen Spiegel und beleuchtet entweder den ersten oder zweiten Kanal. Das Laserlicht stammt von einem Double-Cavity Nd:YAG Laser (NewWave, Gemini PIV) mit einer Pulsenergie von bis zu 120 mJ pro Puls und bei einer Wellenlänge des emittierten Laserlichtes von 532 nm. Auf der Empfangsseite wird eine thermoelektrisch gekühlte CCD-Kamera (PCO, mit 1280 x 1024 Pixel Auflösung) in Verbindung mit einem Nikon Objektiv mit einer Brennweite von $f = 55$ mm und einer Lichtstärke von $f \# 2.8$ verwendet. Ein Bandpassfilter mit einer Mittenfrequenz von 532 nm und 5 nm Bandweite vor dem Objektiv beseitigt die meisten unerwünschten Reflexionen. Der

Pulsabstand zwischen den Laserpulsen variiert zwischen $\tau = 3 \mu\text{s}$ (Untersuchung der Hauptströmung) und $\tau = 5 \mu\text{s}$ (Sekundärströmung). Die hochauflösende CCD-Kamera belichtet zwei Bilder synchronisiert durch die Laserpulse. Die CCD-Kamera (Kreuzkorrelationskamera) wird senkrecht zum Lichtschnitt angeordnet. Aus der Kreuzkorrelationsfunktion werden Größe, Richtung und Orientierung der Absolutgeschwindigkeiten bestimmt. 60 Bilder werden zur Mittelwertbildung der Absolutgeschwindigkeit aufgenommen. Für eine akkurate Bestimmung des Turbulenzgrads sind mehr als 1000 instationäre PIV-Bilder erforderlich. Für die ersten stereoskopischen Messungen werden zwei dieser Kameras unter einem Winkel von jeweils 17° zur Mittelsenkrechten auf die Lichtschnittebene ausgerichtet, eine in Vorwärtsstreuung und eine in Rückwärtsstreuung (**Abb. 3**). Zur Schärfenanpassung der beiden unter einem Winkel aufgenommenen Bilder wird ein so genannter Scheimpflug-Adapter für die Kamera verwendet und die Winkelversatzmethode angewendet.

Für die Sekundärströmungsuntersuchung des 2-Pass-Systems werden zwei Kamerapositionen gewählt, um den ersten bzw. zweiten Kanal separat zu untersuchen. Im zweiten Kanal werden von 38 vermessenen Schnitten 6 hier vorgestellt. Schnitt 4 und 7 sind innerhalb des Umlenkbereichs ($z = 240.0$ and 232.5 mm), Schnitt 13 schließt bündig mit der Oberkante der Trennwand ab bei $z = 225.0$ mm. Schnitt 21, 25 und 31 liegen innerhalb des Kanals bei $z = 217.0$, 210.0 und 190.0 mm. Für die Untersuchung der Hauptströmung in einem Längsschnitt im zweiten Kanal werden von 11 gemessenen drei für die Präsentation ausgewählt, jeweils 4 mm von der Wand und der Mittelschnitt (**Abb. 4**).

Die Genauigkeit der PIV-Messungen liegt im Bereich von 1% und geringer. Dies ist durch Messungen an einer Kalibrierdüse im direkten Vergleich mit hochgenauen L2F-Messungen sowie mit früheren L2F-Messungen im gleichen Modell nachgewiesen (siehe Elfert, Jarius (2002)).

Ergebnisse

Zum Verständnis der komplexen Strömungsvorgänge wurden verschiedene Sichtbarmachungsmethoden angewandt. **Abb. 5** wurde im Laserlichtschnitt mit Rauch bei $z = 220$ mm (Oberkante Trennsteg bzw. erstes Rippenmodul) aufgenommen. Sowohl im ersten wie auch im zweiten Kanal ist die Ausbildung eines symmetrischen Rippenwirbelpaars erkennbar. Zusätzlich steht in der Nähe der Vorderkante im ersten Kanal ein Wirbel, der aus Einlaufstörungen herrührt. Die Strömung im zweiten Kanal wird zudem von einem sehr dominanten Wirbel in Stegnähe dominiert, der bereits oberhalb des Stegs existiert und durch die Umlenkung hervorgerufen wird.

Messung der Hauptströmungskomponente im Multipass-System:

In **Abb. 6** wird die Hauptströmung gemessen mit der PIV im Längsschnitt für die glatte (**a**) und die verrippte Version (**b**) in drei Schnitten gezeigt: 4 mm von der oberen und unteren Wand entfernt sowie den Mittelschnitt. Die Reynoldszahl beträgt 40.000. Eine Ablöseblase mit Rückströmung ist bei der glatten Version am Trennsteg erkennbar. Neben dieser Ablöseblase ist eine starke Beschleunigung mit hohen Geschwindigkeiten nahe der hinteren Wand festzustellen. Die Ablöseblase am Trennsteg wächst quer zum Kanal in Richtung zur oberen Wand. Die höchste Geschwindigkeit und Massenkonzentration wird in Nähe der oberen und hinteren Wand gefunden. Die Umlenkung der Strömung führt hier zu einem Aufprall der Strömung auf die obere Wand des zweiten Kanals („impingement effect“) wegen der Schiefstellung der Mittellinien beider Kanalquerschnitte zueinander (realistische Geometrie). Bei der verrippten Version ist die Ablöseblase am Trennsteg deutlich auf die Umlenkzone reduziert und tritt nicht mehr in den geraden verrippten Bereich des zweiten Kanals ein. Die Wirkung der Rippen ist der Verlagerung des Strömungskerns an die hintere Wand und der dortigen Konzentration von Kühlluft, wie sie im glatten Modell gefunden wurde, genau entgegengerichtet. Dadurch wird die Verteilung von Kühlluft im zweiten Kanal gleichförmiger, was ein erwünschter Effekt ist.

Messung der Sekundärströmungskomponente im Multipass-System:

Abb. 7 zeigt die gemessenen Sekundärgeschwindigkeiten im zweiten Kanal, (**a**) für das glatte und (**b**) für das verrippte Modell in 6 Schnitten bei Re 40.000. Die Krümmung der Obersei-

te, welche durch die äußere Kontur der Turbinenschaufel aufgeprägt wird, verursacht bei der Umlenkung einen Aufprall der Strömung auf die Oberseite (Schnitt 4, 7 und 13). In diesem Bereich wird die Strömung beschleunigt auf $v \approx 40$ m/s. Die durch die 180° -Umlenkung erzeugten Dean-Wirbel sind als symmetrisches Wirbelpaar an der oberen und unteren rechten Ecke zu sehen. Weiter stromab im zweiten Kanal tritt die Ablöseblase am Trennsteg auf. Beim Eintritt in den zweiten Kanal führt die Interaktion des aufprallinduzierten Wirbels („impingement effect“) mit den Deanwirbeln zu einer Anfachung des unteren Wirbels und einem Abschwächen des rechten oberen Eckenwirbels (Schnitt 21). Schnitt 25 und 31 zeigen den fortschreitenden Mischungsprozess der beiden Wirbel. Bei verrippten Wänden wird die Sekundärströmung sehr stark durch die Verhältnisse am Austritt des ersten Kanals beeinflusst (Schnitt 4). Aufgrund der Versperrung durch die rippeninduzierten Wirbel im ersten Kanal ist die Geschwindigkeit in der Mitte des zweiten Kanals relativ klein. Der Aufpralleffekt auf der oberen Wand tritt wesentlich geringer in Erscheinung. Die zuvor beschriebene Interaktion zwischen Aufrollwirbel und Deanwirbel findet nicht statt und lässt die beiden Deanwirbel unverändert (Schnitt 13). Die Orientierung der rippeninduzierten Wirbel ist die gleiche wie bei den Deanwirbeln und die Verschmelzung beginnt mit einer Verschiebung der Wirbelzentren. Weiter stromab wird der Effekt der Rippen dominant; Fluid wird vom Trennsteg zur hinteren Wand transportiert (Schnitt 21 und 25). Die gemessenen Wirbelstärken zeigt **Abb. 8**. Während in Schnitt 4 und 13 die Deanwirbel in beiden Modellversionen klar zu lokalisieren sind, zeigt Schnitt 25 beachtliche Unterschiede. Im glatten Fall interagiert der Umlenkwirbel mit dem unteren Deanwirbel, beide lösen sich allmählich auf. In der verrippten Version werden die gefundenen Wirbelstrukturen ausschließlich durch die Rippen beeinflusst. Die stromauf liegenden Phänomene sind nicht mehr relevant.

Stereo-PIV-Messung der Strömung im Umlenkbereich:

In **Abb. 9** zeigt ein erstes Ergebnis einer 3-Komponenten-PIV-Messung in einem Längsschnitt im Umlenkbereich in Kanalmitte (Kameraposition A) im glatten (a) und verrippten (b) zweiten Kanal bei einer Reynoldszahl von 40.000. Die bereits beschriebene Ablöseblase mit Rückwärtsströmung am Trennsteg ist klar erkennbar, aber die Ausdehnung der Blase ist unterschiedlich zwischen glattem und verrippten Kanal wegen des Rippeneinflusses (vgl. Abb. 6, Mittelschnitt). Fehlerkorrektur bezüglich Reflexionseinflüsse insbesondere oberhalb des Trennstegs sind noch nicht angewandt worden.

Messung der Rippenumströmung im Detail:

Die Strömung in der Umgebung der Rippen wurde auch im Detail untersucht. **Abb. 10** zeigt exemplarisch das wandparallele Strömungsfeld im ersten Rippenmodul an der oberen Wand bei 50% und 150% der Rippenhöhe. Die Messfläche liegt parallel zur Wand und wird seitlich durch benachbarte Rippen begrenzt. Die großen Geschwindigkeiten an der hinteren Kanalwand (im Bild oben) rühren von der Umlenkung sowie dem „Impingement-Effekt“ durch die realitätsnahe Kanalgeometrie her. Die Rippen erzwingen eine Strömungsablenkung in Richtung der Rippen, was deutlich in der Ebene auf halber Rippenhöhe (50%) zu sehen ist. Die Ablöseblase am oberen Ende des Trennstegs, die bis in das erste Rippenmodul hineinreicht, ist als Gebiet niedriger Geschwindigkeit (blauer Bereich) am unteren Rand wieder zu finden. Hier formiert sich ein Wirbelgebiet, das die Strömung entlang der zweiten Rippe zum Abheben und Überströmen dieser Rippe veranlasst.

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt experimentelle Untersuchungen eines typischen Zweipasskühlsystems einer Turbinenschaufel mit und ohne verrippte Wände mit besonderer Beachtung der Strömungsphänomene, die zum einen durch Geometrieeffekte der maschinennahen Auslegung und zum anderen durch die Anbringung von Rippen hervorgerufen werden. Eine komplexe Strömungssituation ist zu verzeichnen:

- Ablösung an der Trennwand zwischen erstem und zweiten Kanal, im zweiten Kanal mit ausgesprochen dreidimensionaler Ausprägung,
- Erzeugung rippeninduzierter Wirbel in beiden Kanälen,
- Erzeugung von umlenkinduzierten Wirbeln („Krümmer-/Deanwirbel“) im zweiten Kanal

- geometriebedingter Aufpralleffekt führt zu Strömungseinrollbewegung und somit zur Entstehung einer dritten Art von Wirbeln und
- alle Strömungswirbel interagieren miteinander und werden mehr oder weniger dominant.

Die gezeigten Experimente wurden hauptsächlich initiiert, um die Anwendbarkeit der PIV bzw. Stereo-PIV in einem Multipasskühlsystem für die angewandte Kühlforschung nachzuweisen. Von der hohen Qualität der erzielten Ergebnisse können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es ist grundsätzlich möglich, die PIV selbst in einer komplizierten Geometrie wie einem Multipass-Kühlsystem einzusetzen, welches zudem verrippt ist und somit schwierigen optischen Zugang aufweist.
- Messungen waren sogar erfolgreich in Rippennähe, wo hohe Turbulenz vorherrscht.
- Messungen waren erfolgreich innerhalb von Ablösungen und
- Die Erkennung von Wirbelstrukturen durch Messung der Sekundärgeschwindigkeiten als eine besonders schwierige Messaufgabe – ein wichtiges Ziel dieser Arbeit - wurde ebenso eindrucksvoll demonstriert.

Die Applikation von PIV und Stereo-PIV ist somit abgesichert und wird z. Zt. auf das rotierende System angewendet. Die Bereitstellung eines kompletten Datensatzes von Strömungsquantitäten sowie lokalen Wanddrücken und Wärmeübergangskoeffizienten aus diesem System ist Hauptziel dieses Verbundforschungsvorhabens, welches in enger Zusammenarbeit des DLR mit dem ITLR, Uni Stuttgart und der Industrie durchgeführt wird.

Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Verbundforschungsprogramms AG Turbo II durch die Ministerien BMBF und BMWA gefördert (Förderkennzeichen 0327090E), denen an dieser Stelle gedankt sei, sowie in Absprache mit den Industriepartnern Alstom, MTU, Rolls Royce Deutschland und Siemens durchgeführt. Eine enge Kooperation besteht mit dem Institut für Thermodynamik der Luft und Raumfahrt (ITLR) der Universität Stuttgart. Für die engagierte Mitarbeit am Projekt danken die Autoren den Herren H. Hoevel und M. McNiff, beide DLR.

Literatur

- Dean, W.R., 1928: The stream-line motion of fluid in a curved pipe. Philosophical Magazine, S.7, Vol. 4, No. 20, 208 – 223.
- Elfert, M., Hoevel, H., Towfighi, K. (1996): The Influence of Rotation and Buoyancy on Radially Inward and Outward Directed Flow in a Rotating Circular Coolant Channel, Proc. 20th ICAS Conference, Sorrento, Italy, 2490-2500.
- Elfert, M., Jarius, M.P. (2002): Steady Fluid Flow Investigation using L2F and PIV in a Multi-Pass Coolant Channel. 9th Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-9), Honolulu, Hawaii, Feb.10-14.
- Elfert, M., Jarius, M.P. (2004): Detailed Flow Investigation using PIV in a Typical Turbine Cooling Geometry with Ribbed Walls. Proceedings of ASME TURBO EXPO 2004, GT-2004-53566, June 14-17, Vienna, Austria.
- Han, J.-C., 2002: Recent Studies in Turbine Blade Cooling. 9th Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC-9), Honolulu, Hawaii, Feb.10-14.
- Jarius, M.P., Elfert, M., 2002: Steady Fluid Flow Investigation using PIV in a Multi-Pass Coolant Channel. 11th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July 8–11, Paper No. 17-5.
- Jarius, M.P., Elfert, M., 2003: Flow Investigation in a Two-Pass Coolant Channel with/without Ribbed Walls. 16th Int. Symp. on Air Breathing Engines, Aug. 31- Sept. 5, 2003, Cleveland, Ohio, USA, Paper ISABE-2003-1155.
- Rathjen, L., Hennecke, D.K., Elfert, M., Bock, S., Henrich, E., 1999: Investigation of Fluid Flow, Heat Transfer and Pressure loss in a Rotating Multi-Pass Coolant Channel with an Engine Near Geometry, ISABE-Conference, Florence, ISABE-IS-216.
- Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J., 1998: Particle Image Velocimetry. Springer Verlag, Berlin.
- Willert, C., 1997: Stereoscopic Digital Particle Image Velocimetry for Application in Wind Tunnel Flows. Meas. Sci. Technol. 8, 1465-1479.

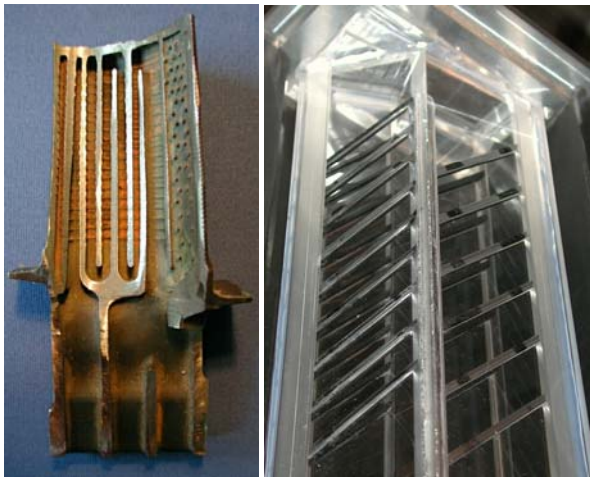


Abb. 1 Kühlsystem einer Turbinenrotorschaukel (GE-CF6) und untersuchtes Transparentmodell (2-Weg-System)

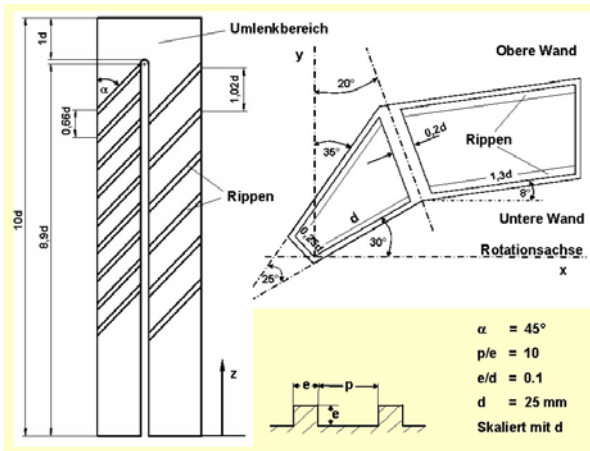


Abb. 2 Geometrie des verrippten Kühlsystems (2-Weg-System mit 180°-Umlenkung)

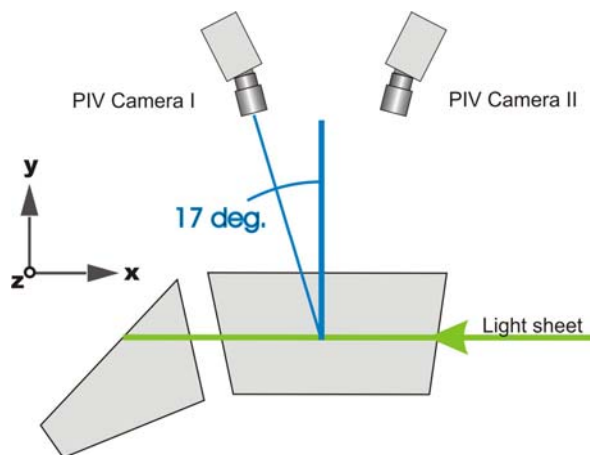
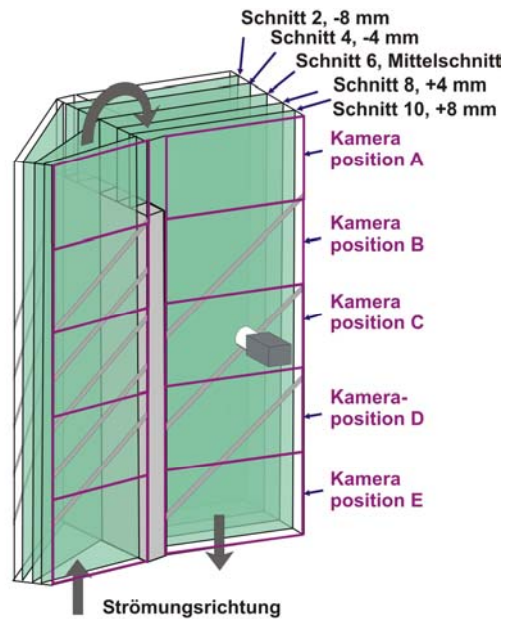
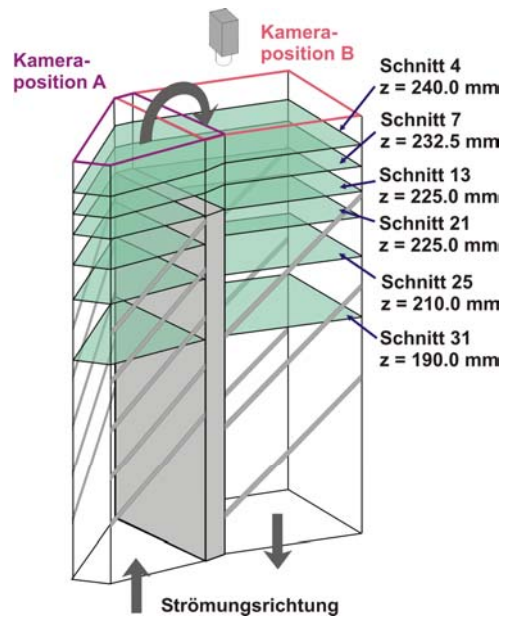


Abb. 3 Aufbau zur Stereo-PIV-Messung



(a)



(b)

Abb. 4 Messebenen für PIV: Hauptströmung im (a) und Sekundärströmung (b)

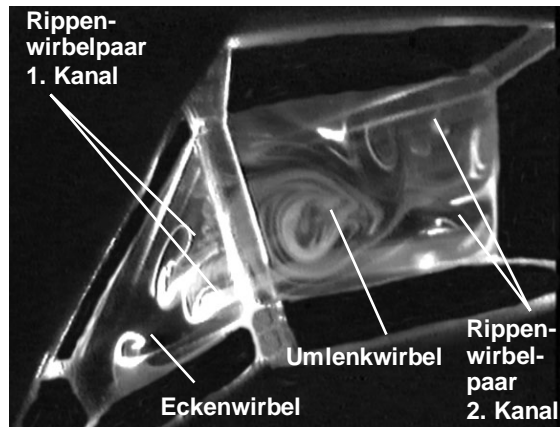
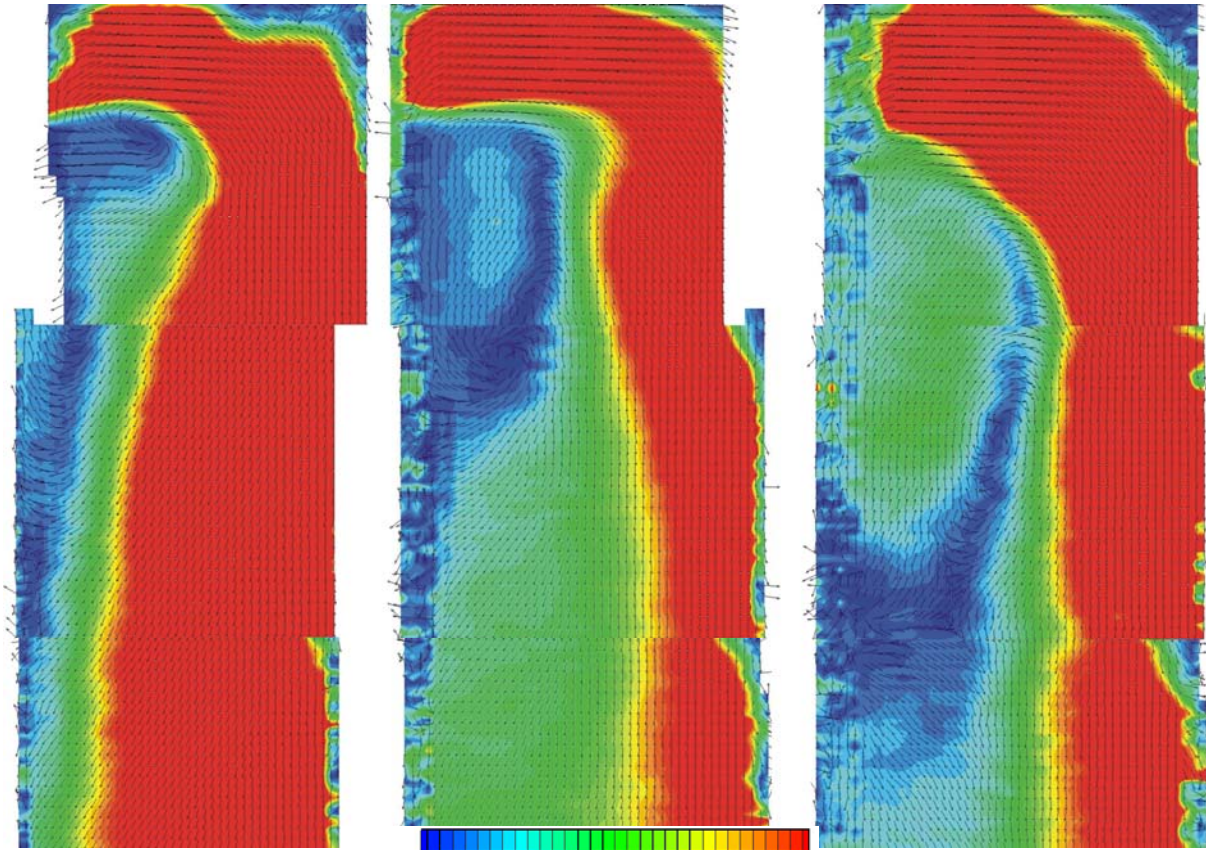


Abb. 5 Visualisierung der Rippenwirbel und des Umlenkwirbel, $z = 220$ mm

Schnitt 10, untere Wand

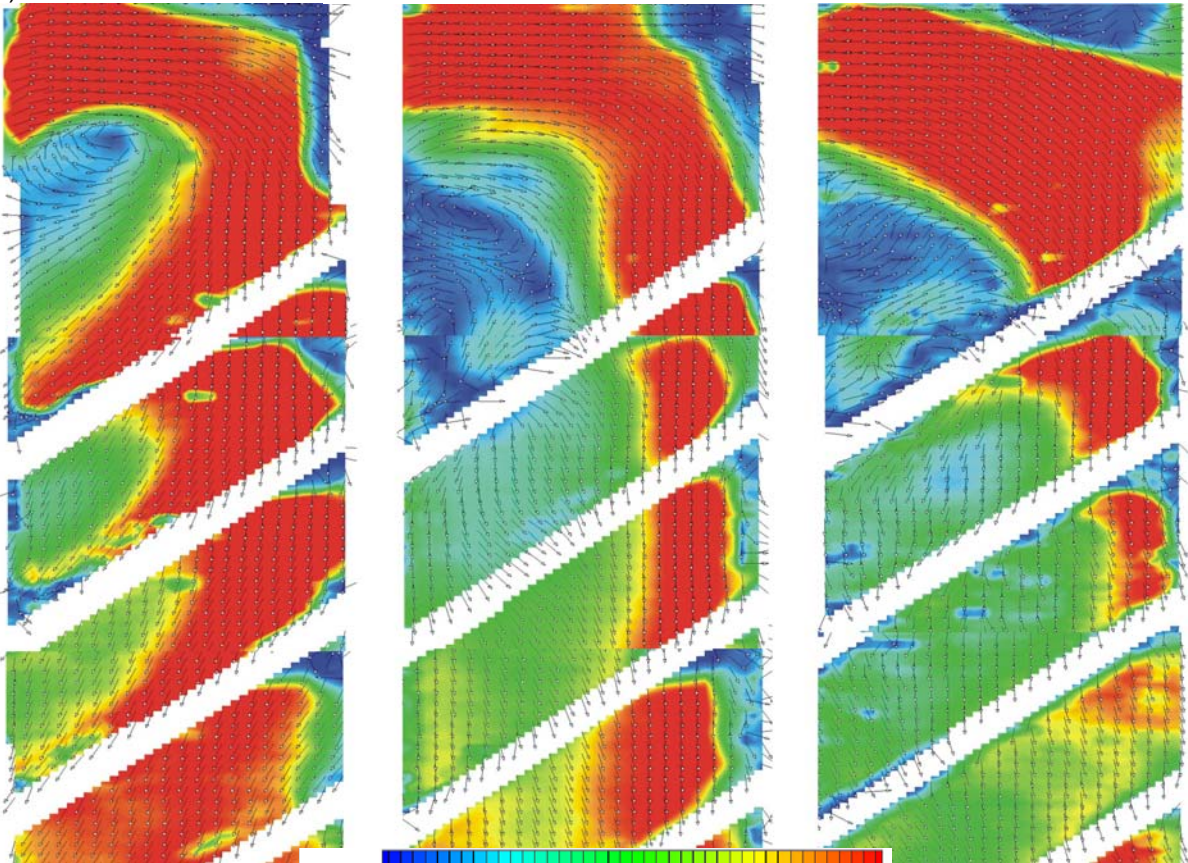
Schnitt 6, Kanalmitte

Schnitt 2, obere Wand



(a)

v in m/s: 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30



(b)

v in m/s: 0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40

Abb. 6 Gemessenes Strömungsfeld im 2. Kanal in drei Schnitten, (a) glatte und (b) verrippte Version, $Re = 40.000$.

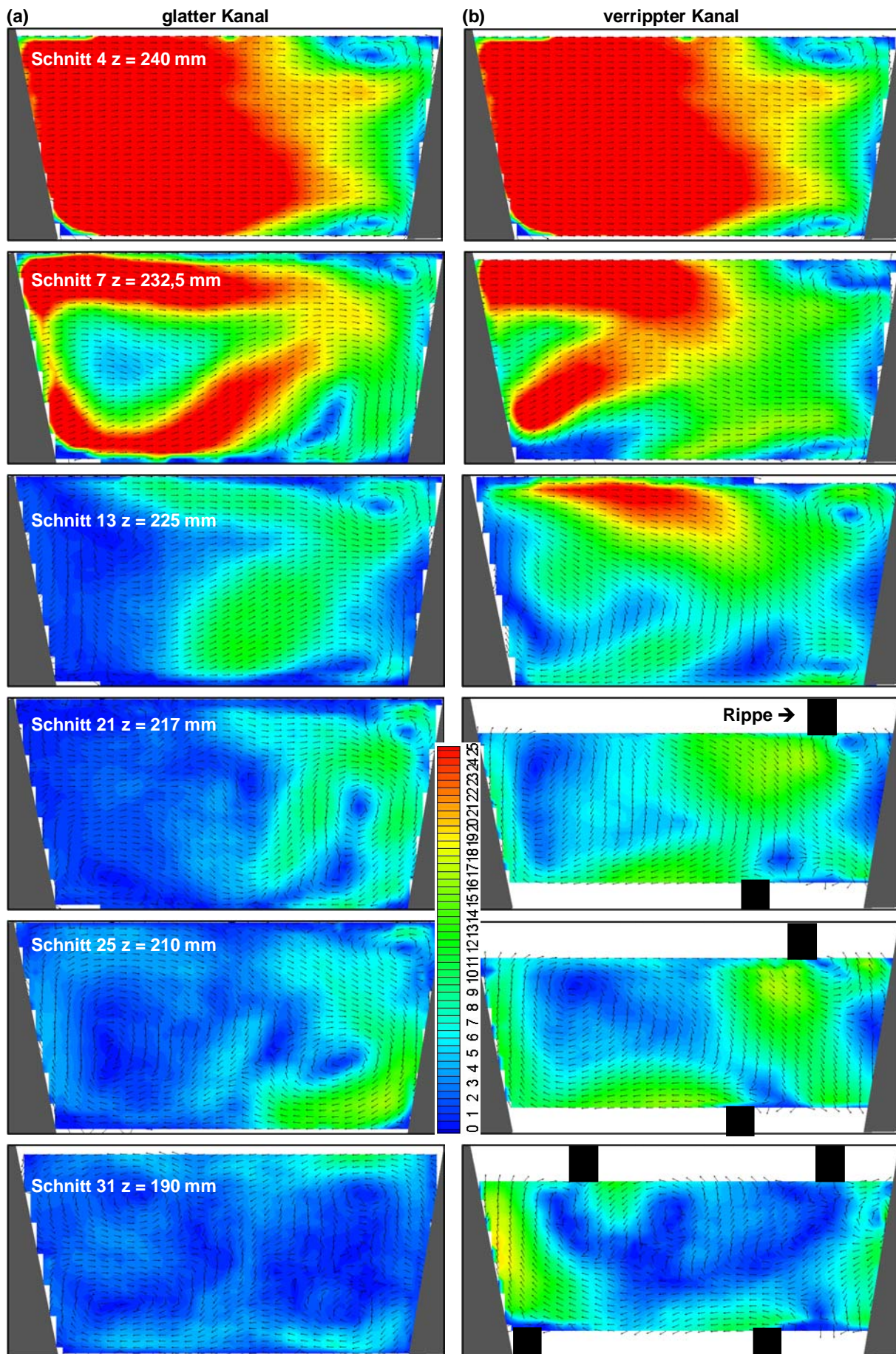
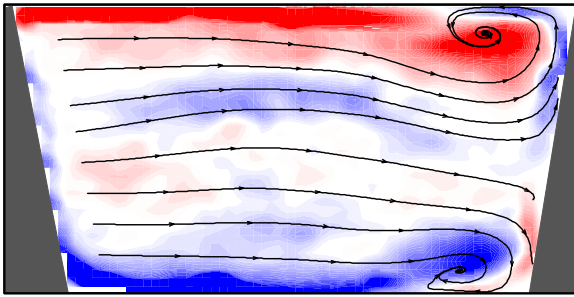
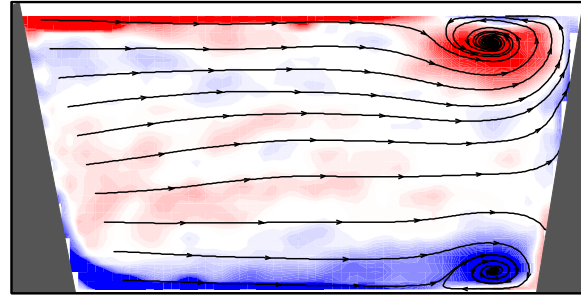


Abb. 7 Sekundärströmungsfeld im 2. Kanal, 6 Schnitte, a) glatte, b) verrippte Version, $Re = 40.000$.

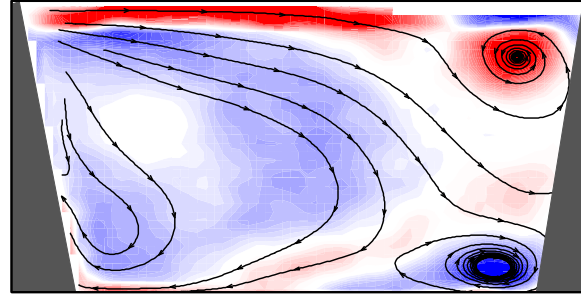
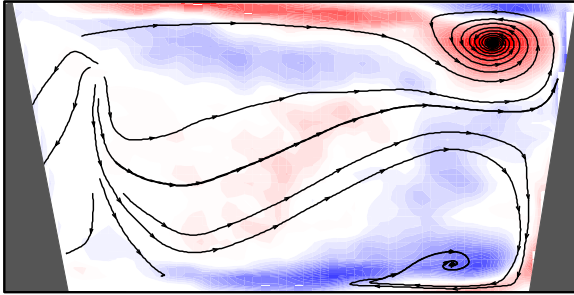
a) glatter Kanal
Schnitt 4 z = 240 mm



b) verrippter Kanal



Schnitt 13 z = 225 mm



Schnitt 25 z = 210 mm

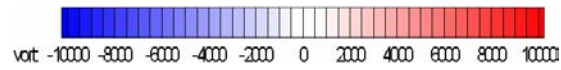
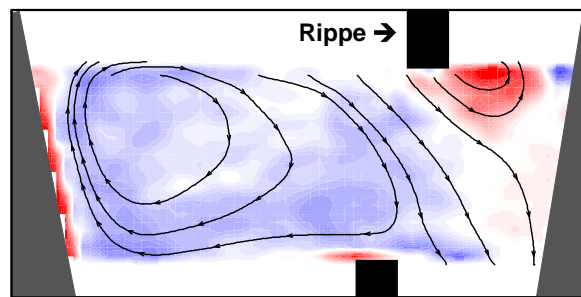
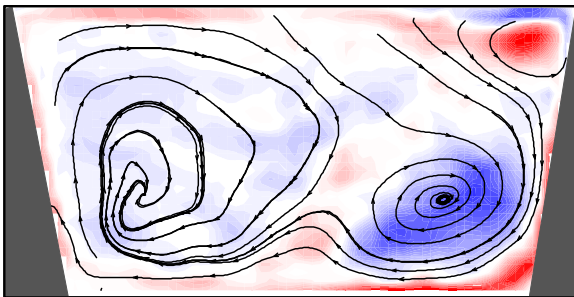
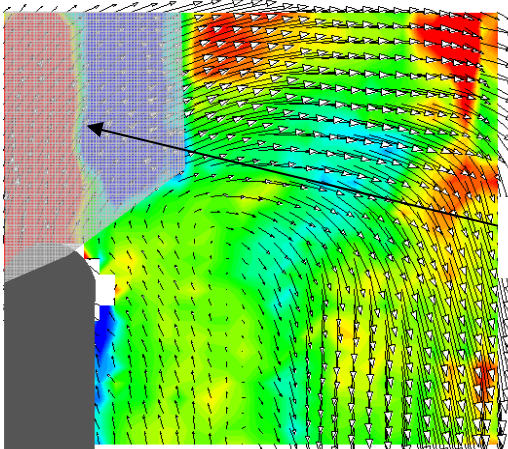
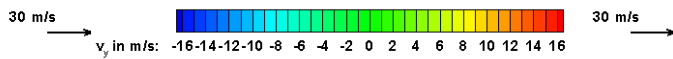
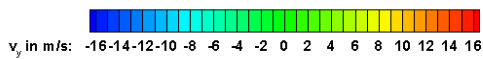


Abb. 8 Wirbelstärke im 2. Kanal in 3 Schnitten, a) glatte und b) verrippte Version, $Re = 40.000$.

a) glatter Kanal

b) verrippter Kanal



Reflektionsbereich

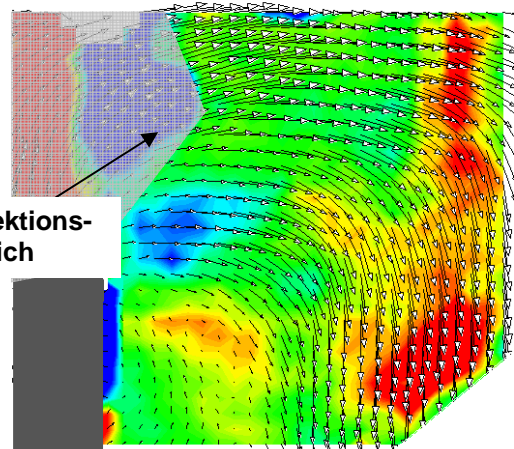
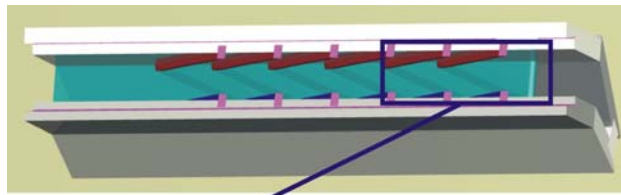
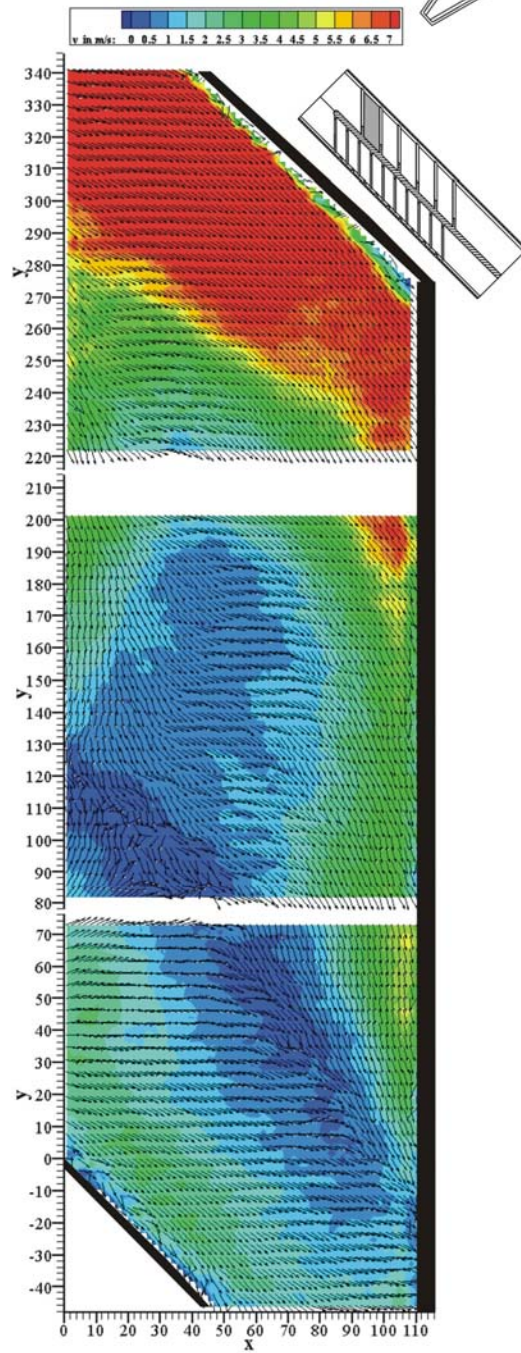
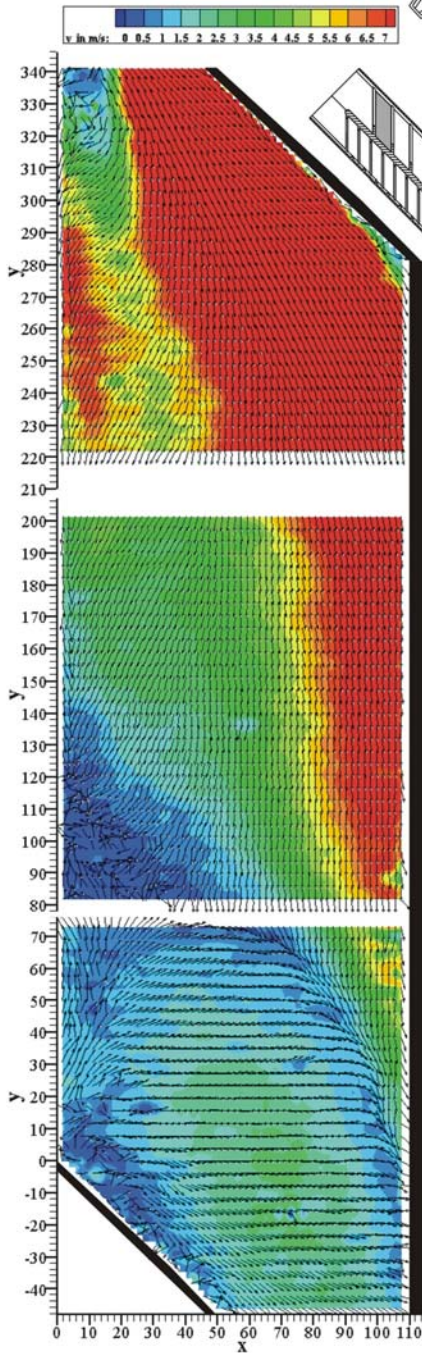


Abb. 9 3D-Strömungsfeld im Umlenkbereich des zweiten Kanals, glatt (a), verrippt (b), $Re = 40.000$.



50%, obere Wand

150%, obere Wand



a)

b)

Abb. 10 Strömungsfeld im Rippenmodul an der oberen Wand bei 50% und 150% der Rippenhöhe