

**HZDR-033**

## **Strömungsprofilmessungen mittels PIV-Verfahren an einem Stabbündel**

R. Franz, E. Dominguez-Ontiveiro, T. Barth,  
S. Drapeau-Martin, U. Hampel

Wissenschaftlich-Technische Berichte  
HZDR-033 · ISSN 2191-8708

**WISSENSCHAFTLICH-  
TECHNISCHE BERICHTE**

**hZDR**



**HELMHOLTZ  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSSENDORF**

Wissenschaftlich-Technische Berichte  
**HZDR-033**

R. Franz, E. Dominguez-Ontiveiro, T. Barth,  
S. Drapeau-Martin, U. Hampel

**Strömungsprofilmessungen mittels  
PIV-Verfahren an einem Stabbündel**

**HZDR**

 **HELMHOLTZ**  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSSENDORF

# Strömungsprofilmessungen mittels PIV-Verfahren an einem Stabbündel

*R. Franz, E. Dominguez-Ontiveiro, T. Barth, S. Drapeau-Martin, U. Hampel*

## **Inhalt**

Einführung .....	2
Versuchsstand .....	3
Messungen .....	5
Messverfahren.....	5
Betriebsparameter .....	7
Auswertung .....	8
Verfahren.....	8
Ergebnisse .....	10
Konvergenzstudie .....	10
Geschwindigkeitsfelder – Entwicklung des Strömungsprofils.....	10
Strömungsprofile.....	17
Fehlerbetrachtung.....	19
Zusammenfassung.....	20

## Einführung

Umströmte Rohr- bzw. Stabbündel sind als Übertrager von Wärmeenergie in einem breiten Spektrum von Anwendungsgebieten zu finden. Beispiele sind Heizkörper, Kühlaggregate, Heizpatronen, industrielle Wärmetauscher und Brennelemente in Kernreaktoren. Für jede dieser Anwendungen besteht die Anforderung, die Wärmeübertragung an den Wärmeübertragerflächen zu optimieren. Dabei besteht eine enge Kopplung zwischen Wärmetransport und Strömungsstruktur. Eine besonders effiziente Form der Wärmeübertragung ist die Verdampfung. Diese wird unter anderem bei Brennelementen in Druckwasserreaktoren genutzt. Hier siedet das Kühlwasser an der Brennstaboberfläche. Durch Kondensation der Dampfblasen in der unterkühlten Kernströmung wird die Wärme dann effizient in die Flüssigphase übertragen. Durch die hohe Verdampfungsenthalpie des Wassers wird beim Strömungssieden ein viel höherer Wärmestrom in das Kühlwasser übertragen, als bei rein einphasig-konvektivem Wärmetransport. Sicherheitstechnisch relevant für Brennelemente in Leichtwasserreaktoren ist der Übergang vom Blasensieden zum Filmsieden (kritischer Wärmestrom). Dieser muss unter allen Umständen vermieden werden, um die Integrität der Brennstabhüllen zu gewährleisten, die bei Überschreiten der kritischen Heizflächenbelastung aufschmelzen bzw. reißen können. Aus diesem Grund werden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes (Förderkennzeichen 02NUK010A) numerische Strömungsberechnungsmodelle entwickelt, die bei der Beschreibung und numerischen Behandlung der Siedephänomene helfen sollen. Zur Validierung dieser Modelle anhand von Experimenten wurde ein Strömungskanal konstruiert, in dem ein vertikales Stabbündel von einem Kältemittel (RC318) aufwärtig durchströmt wird. Der Versuchsstand ist so konzipiert, dass ein optischer und messtechnischer Zugang zu den umströmten Einbauten gegeben ist. Damit sind Messungen in Zweiphasenströmungen ebenso möglich, wie Untersuchungen zur einphasigen Durchströmung. Für später erfolgende Zweiphasen-Experimente mit Stabbeheizung wurden zunächst Voruntersuchungen zur einphasigen Durchströmungen durchgeführt, welche insbesondere Aufschluss über die Homogenität der Strömung in den Unterkanälen sowie die Existenz von Querströmungen geben sollten. Als Messverfahren dafür wurde die Particle Image Velocimetry (PIV) ausgewählt, welche es ermöglicht, zweidimensionale Strömungsfelder aufzuzeichnen. Die experimentellen Studien erfolgten am Optical Multi-Phase Flow Research Laboratory des Nuclear Engineering Department der Texas A&M University in College Station, USA.

Die Untersuchungen wurden für drei Volumenstromraten durchgeführt. Der vorliegende Bericht umfasst die Beschreibung des Versuchsstandes und der Messmethodik, eine Vorstellung des Auswerteverfahrens und relevanter Ergebnisse sowie eine Fehlerbetrachtung.

## Versuchsstand

Der untersuchte Strömungskanal, im Weiteren als Testsektion bezeichnet, ist Teil einer Strömungsschleife, die in Abb. 1 skizziert ist.

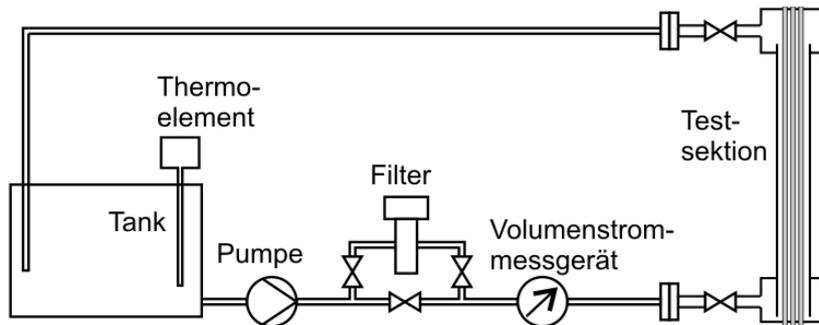


Abb. 1: Prinzipskizze Strömungsschleife

Zu dieser Strömungsschleife gehören weiterhin ein geschlossener 100-Liter-Tank für das Betriebsfluid, eine Zentrifugalpumpe (Fa. Berkeley, Modell S39538), deren Drehzahl über einen Frequenzumsetzer (Fa. Polyspeed Electronics, Model: XLT25-20C) regelbar ist, mehrere Kugelhähne, ein Filter mit 50  $\mu\text{m}$  Porengröße, ein Volumenstrommessgerät mit Axialströmungssensor (Fa. GPI, Modell: A109GMA100) sowie flexible Verbindungsschläuche. Die Temperatur des Arbeitsfluides wird mit einem Temperatursensor (Thermoelement Typ K) aufgezeichnet.

Da die hier beschriebenen Strömungsprofil-Messungen als Voruntersuchungen für Messungen in Zweiphasenströmungen an einem beheizten Rohrbündel konzipiert waren, wurde der Strömungsquerschnitt im Bündel weitgehend angepasst. (s. Abb. 2)

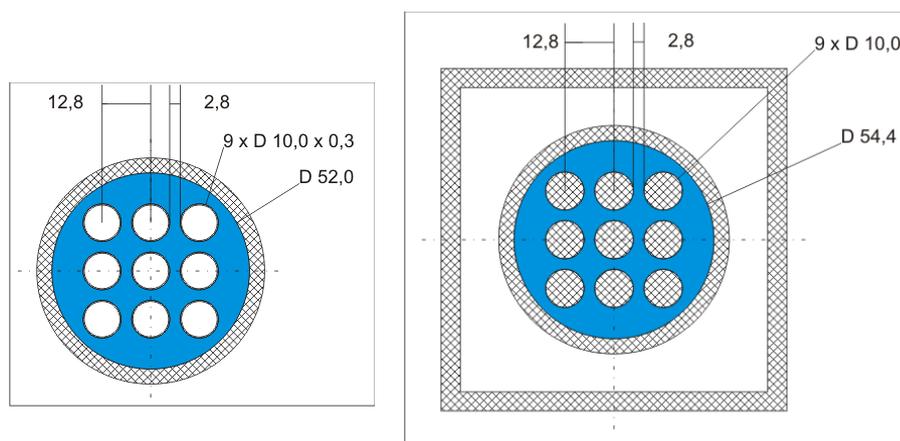


Abb. 2: Strömungsquerschnitt (blau) für Untersuchungen an Zweiphasenströmungen (links) und Einphasenströmungen (rechts)

Für PIV-Messverfahren ist ein ungehinderter und unverzerrter optischer Zugang zum Strömungsfeld unabdingbar. Für die hier eingesetzte Testsektion wurde daher als Material für Hülle und Einbauten PMMA und als Arbeitsfluid Para-Cymol gewählt. Beide Materialien sind optisch transparent und weisen einen nahezu identischen optischen Brechungsindex auf. (siehe Tab. 1)

Stoff	Brechungsindex (589 nm)
PMMA	1,4920
P-Cymol	1,4907

Tab. 1: Optische Brechungsindizes der Materialien im Strahlengang

Damit wurden die optische Brechungen an den Grenzflächen zwischen Fluid und Einbauten minimiert. Um Brechungen an der zylindrischen Außenfläche des Hüllrohres zu vermeiden, wurde dieses mit einem PMMA-Container mit orthogonalen Seitenwänden umschlossen und das Volumen zwischen Rohr und Container ebenfalls mit optisch angepasster Flüssigkeit gefüllt.

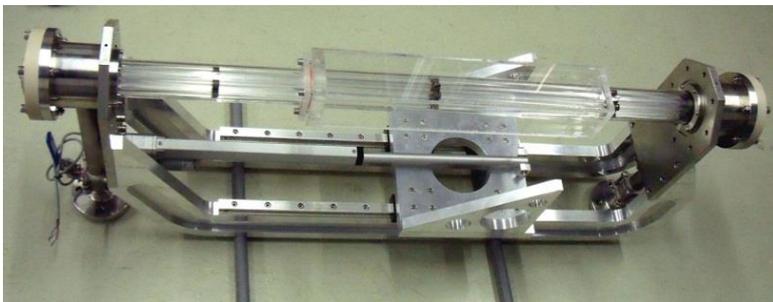


Abb.3: Testsektion mit PMMA-Stäben und verschiebbarem PMMA-Container

Wie in Abb. 3 zu erkennen ist, wurden die PMMA-Stäbe des Bündels von drei Abstandshaltern fixiert, die in Abständen von 315 bzw. 350 mm montiert wurden. Diese Abstandshalter wurden mit dem Ziel einer minimalen Strömungsbeeinflussung konstruiert. Abb. 5 zeigt das Stabbündel mit Abstandshalter, einmal in der leeren und einmal in der gefüllten Testsektion. Eine Maßskizze dieser Abstandshalter ist Abb. 6 zu entnehmen.

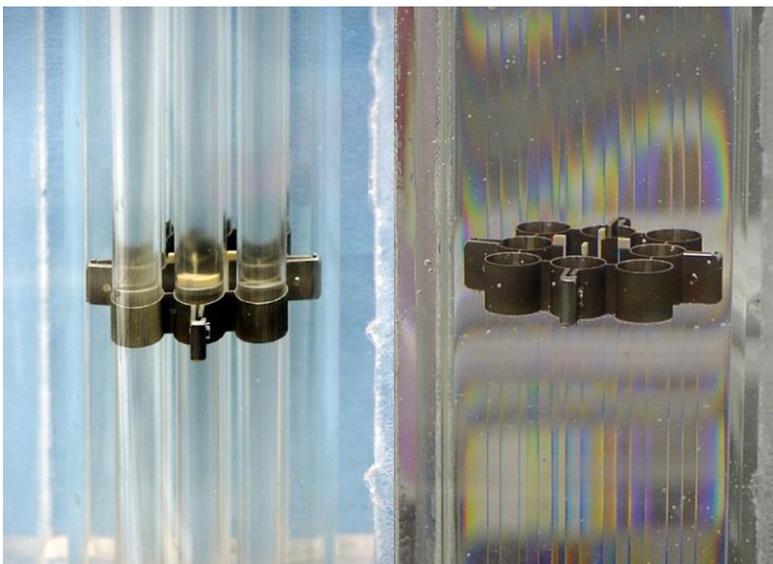


Abb. 5: Stabbündel mit Abstandshalter, links ungefüllter, rechts: mit P-Cymol gefüllter Zustand



Abb. 4 PMMA-Stäbe und -Hüllrohr, von PMMA-Container umschlossen, ungefüllter Zustand

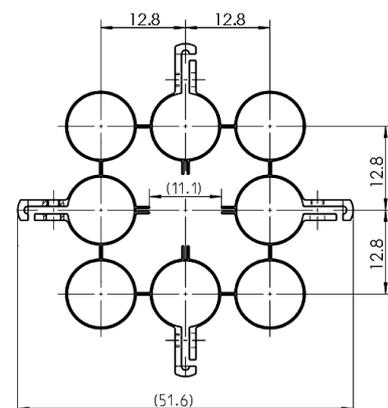


Abb.6: Maßskizze Abstandshalter

# Messungen

## Messverfahren

Der für PIV erforderliche Lichtfächer wird von einem gepulsten NdYAG-Laser (Fa. New Wave, Pegasus PIV,  $\lambda=527\text{ nm}$ ) generiert und von einem System aus einem Spiegel und zwei zylindrischen Linsen geformt. (siehe Abb. 7). Der Lichtfächer wurde vertikal auf gespreizt, so dass während einer Messung in der Testsektion eine Höhe von ca. 105 mm ausgeleuchtet wurde. Die Dicke des Lichtfächers war ca. 1 mm. Der gesamte vertikale Messbereich betrug 406 mm, unterteilt in vier Teilbereiche (Höhenposition 1 bis 4, siehe Abb. 8). Dieser Messbereich entspricht dem gesamten optisch zugänglichen Teil der Einlaufstrecke im Bündelaufbau mit Heizstäben. Es wurden Strömungsprofile in fünf parallelen Ebenen (plane 1 bis plane 5, siehe Abb. 9 und 10) aufgenommen.

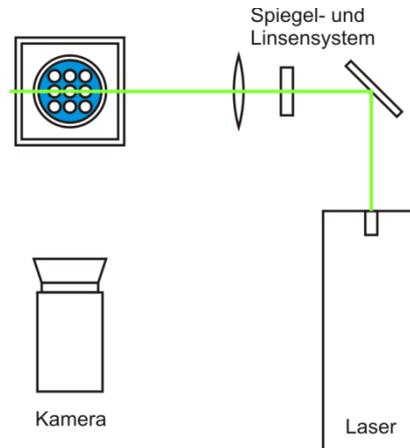


Abb. 7: Prinzipskizze Messaufbau

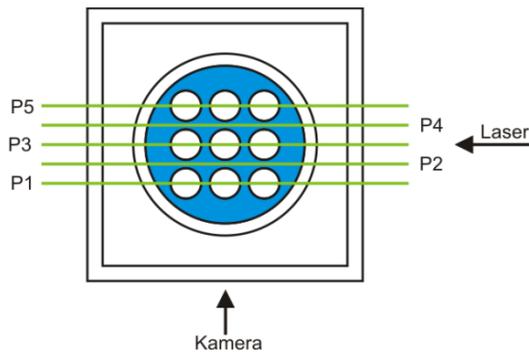


Abb. 9: Lage der Messebenen

Die Ebenen 1, 3 und 5 verliefen durch jeweils eine Reihe von drei Stäben des Bündels, die Ebenen 2 und 4 führten durch jeweils eine Gasse zwischen zwei Stabreihen und schnitten dabei jeweils zwei Unterkanäle zentrisch. Abb. 11 zeigt den Laserfächer in zwei Ebenen.

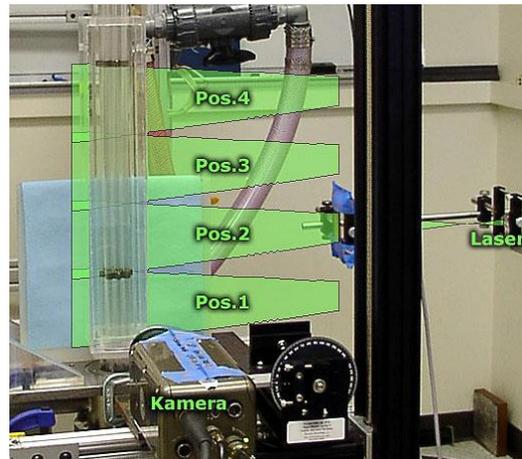


Abb. 8: Höhenpositionen der Lichtfächer

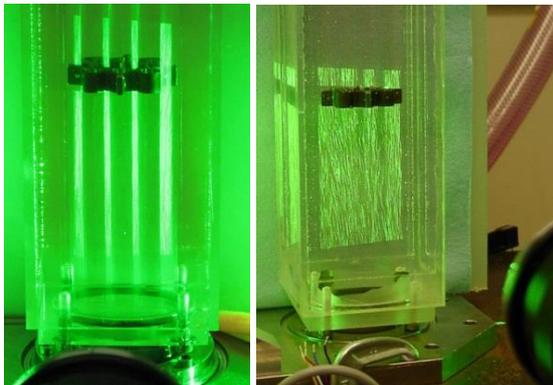


Abb. 11: Messungen in Höhenposition 1, links Ebene 3 (Stabreihe), rechts Ebene 4 (Gasse)

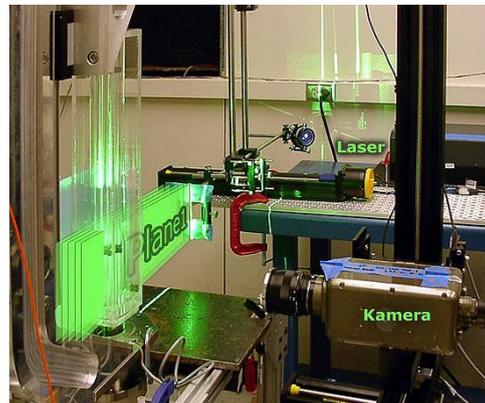


Abb. 10: Positionen der Messebenen

Die resultierenden 20 Messpositionen wurden mit jeweils drei Volumenstromwerten durchmessen. (siehe Tab. 2) Als Referenz für Höhenwerte in Spalte 1 wurde die Deckfläche der Einlasskammer und somit die Austrittshöhe des Hüllrohres aus dieser gewählt.

Höhenposition, Messbereich	Ebene, Lokalisierung	Volumenstrom
Pos. 1: 53 mm – 160 mm	1 ( Stabbündel)	1,2 l/s
Pos. 2: 159 mm – 264 mm	2 ( Gasse)	1,7 l/s
Pos. 3: 259 mm – 363 mm	3 ( Stabbündel)	2,14 l/s
Pos. 4: 359 mm – 463 mm	4 ( Gasse)	
	5 ( Stabbündel)	

Tab. 2: Parameter der Messmatrix

Während der Messungen arbeitete der Laser im Pulsbetrieb und wurde durch die Hochgeschwindigkeitskamera getriggert. Diese wurde mit einer Bildfrequenz von  $1000\text{ s}^{-1}$  betrieben und lieferte für jede Messung eine Sequenz von 2730 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von  $30\text{ }\mu\text{s}$  und einer Bildgröße von  $600 \times 800$  Pixel. Das entspricht einer Auflösung von ca.  $7,6\text{ Pixel/mm}$ , abhängig von der Entfernung der gemessenen Ebene zur Objektivenebene. Abb. 12 zeigt exemplarisch zwei Einzelaufnahmen der Kamera. Der quer verlaufende Schatten im oberen Bereich beider Aufnahmen wurde durch den unteren Abstandshalter verursacht.

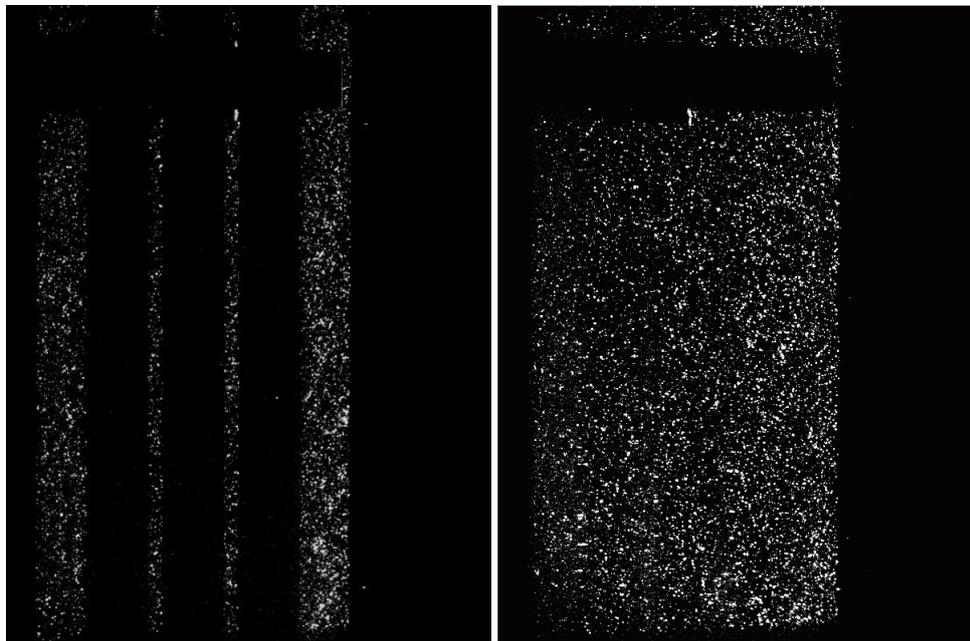


Abb. 12: Einzelaufnahmen in Höhenposition 1 bei  $2,14\text{ l/s}$ , links Ebene 3 (Stabreihe), rechts Ebene 4 (Gasse).

## Betriebsparameter

Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurden die Betriebsparameter der Anlage so gewählt, dass die Reynoldszahl der beim Betrieb mit dem sonst verwendeten Arbeitsfluid RC318 ähnelt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die relevanten geometrischen und Materialparameter.

Fluid	RC318	P-Cymol	
Dichte des Fluides	1450	855	kg/m <sup>3</sup>
Viskosität des Fluides	3,40E-04	8,00E-04	Pas
Oberflächenspannung des Fluides	6,40E-03	2,81E-02	N/m
d <sub>i</sub> des Hüllrohres	52,0	54,40	mm
d <sub>a</sub> des Hüllrohres	60,0	60,00	mm
d <sub>a</sub> jedes Stabes	10,0	10,0	mm
Max. Massenstrom	0,9	1,83	kg/s
Max Volumenstrom	0,6	2,14	l/s
Hydraulischer Durchmesser	12,7	14,3	mm
Freier Strömungsquerschnitt	1,42E-03	1,62E-03	m <sup>2</sup>
Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	0,46	1,32	m/s
Maximale Reynoldszahl	24674	20167	

Tab. 3: Geometrische und Materialparameter im Vergleich

# Auswertung

## Verfahren

Die Auswertung der Messungen wurde in folgenden Schritten durchgeführt:

1. Konvertierung der von der Kamera gelieferten \*.cine - Dateien in Bitmap-Sequenzen (\*.avi) mit der zur Hochgeschwindigkeitskamera gehörigen Software „Phantom 663“, dabei Dynamikanpassung
2. Importieren der avi-Dateien in PIV-Projekte der Software DaVis 7.2.2. (Fa. LaVision GmbH).
3. ROI-Maskierung, Höhen- und Breiten-skalierung, Festlegen der Korrelationsparameter.
4. Konvergenzstudie zur Festlegung der Anzahl auszuwertender Frames.

Gleitende adaptive Kreuzkorrelation zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Bitmaps (siehe Abb. 13). Anschließende Mittelung der resultierenden Wertefelder (entspricht zeitlicher Mittelung), Ausgabe folgender Felder:

- Mittlere kinetische Energie
- Turbulente kinetische Energie
- Reynoldsspannung XX
- Reynoldsspannung XY
- Reynoldsspannung YY
- Mittlere Geschwindigkeit x-Richtung
- Mittlere Geschwindigkeit y-Richtung
- RMS Geschwindigkeit

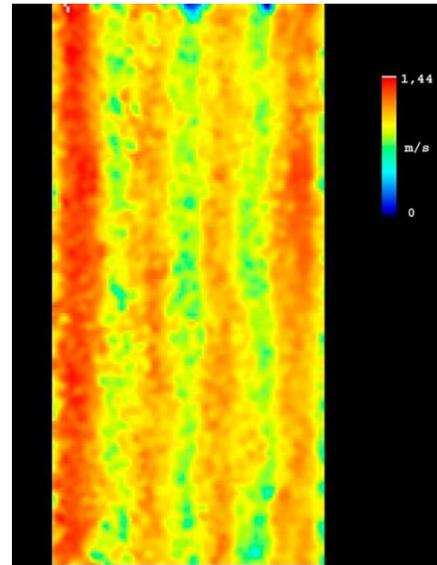


Abb. 13: Einzelnes Korrelations-  
ergebnis vor der Mittelung

5. Erstellung von Geschwindigkeitsprofilen in relevanten Höhenbereichen
6. Konvertierung aller y-Richtungs- und Positionsangaben (Koordinatenursprung aller Felder von links oben nach links unten gelegt, Software „DrehY“, Autor: T. Berger)
7. Grafische Aufbereitung ausgewählter Geschwindigkeitsfelder unter Nutzung der Software “Techplot 360 2011“

Geschwindigkeitsprofile wurden erstellt, um die Durchströmung der Unterkanäle zu charakterisieren und um eine Aussage zur Symmetrie dieser Durchströmung treffen zu können.

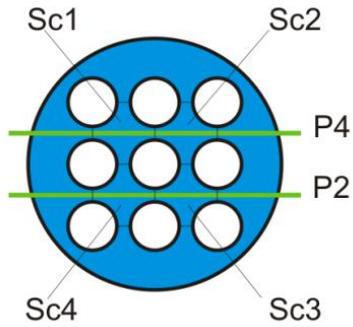


Abb. 14: Unterkanäle mit schneidenden Laserebenen

Da die Ebenen 2 und 4 jeweils zwei Unterkanäle mittig schneiden (Ebene 2: Sc4, Sc3; Ebene 4: Sc1, Sc2, siehe Abb. 14), wurde in den Messdaten für diese Ebenen ein Höhenbereich von 15 mm (absolut: 426mm bis 441 mm) selektiert und die Geschwindigkeitswerte über der Höhe gemittelt. (siehe Abb. 15) Die resultierende Wertezeile ergibt das gewünschte Geschwindigkeitsprofil im Horizontalschnitt. (Abb. 16)

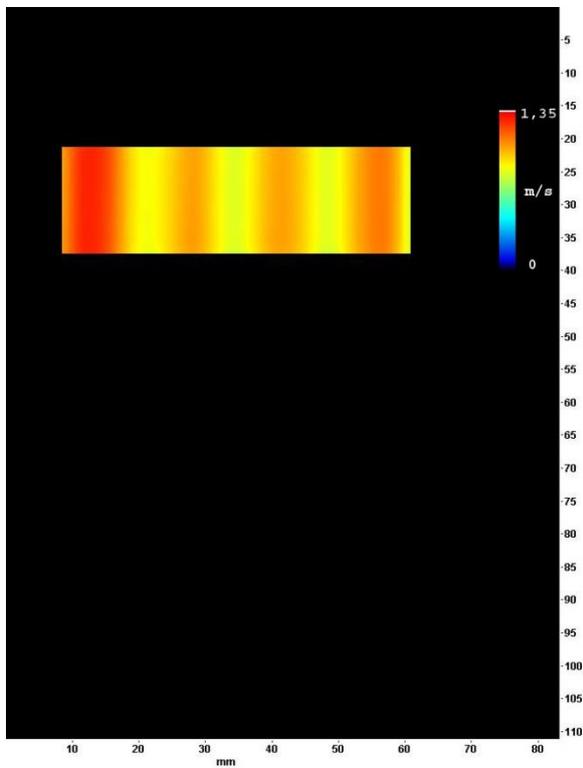


Abb. 15: Selektierter Höhenbereich zur örtlichen Mittelung der Geschwindigkeitswerte

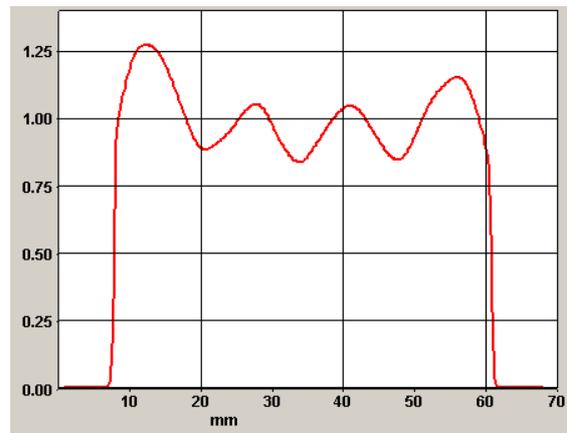


Abb. 16: resultierendes Geschwindigkeitsprofil

## Ergebnisse

### Konvergenzstudie

Da die Momentanwerte der lokalen Geschwindigkeitsvektoren zeitlichen Schwankungen unterliegen, war eine zeitliche Mittelung erforderlich. Die hierzu notwendige Anzahl von Einzelkorrelationen wurde in einer Konvergenzstudie bestimmt. Dazu wurde in der Auswerteprozedur für eine Messung (1,2 l/s, Ebene 2, Höhe 3) die Anzahl der der Mittelung zugrunde liegenden Korrelationen von 100 bis 1000 variiert und das jeweils resultierende Strömungsprofil ermittelt. Diese Profile sind in Abb. 17 dargestellt. Es ist erkennbar, dass Lage und Form der Profillinien mit steigender Anzahl der zugrunde liegenden Korrelationen in höherem Maße überein stimmen und Profile aus Mittelungen von mehr als 700 Korrelationen nahezu deckungsgleich sind.

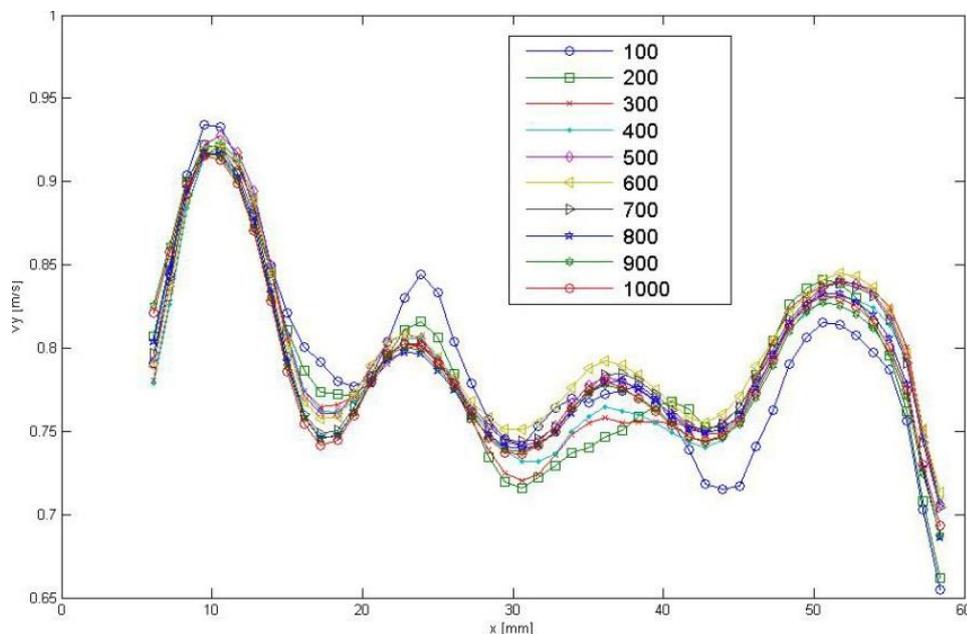


Abb. 17: Ergebnis der Konvergenzstudie

Damit wurde nachgewiesen, dass für eine sichere Auswertung die Analyse von mehr als 700 Frames notwendig ist. Daher wurde für jede Messung eine Sequenz von 800 Aufnahmen ausgewertet.

### Geschwindigkeitsfelder – Entwicklung des Strömungsprofils

Abb. 18 bis Abb. 23 zeigen für die gemessenen drei Volumenströme einen Vergleich der Geschwindigkeitsfelder in x- und in y-Richtung für die Ebenen 2 und 4.

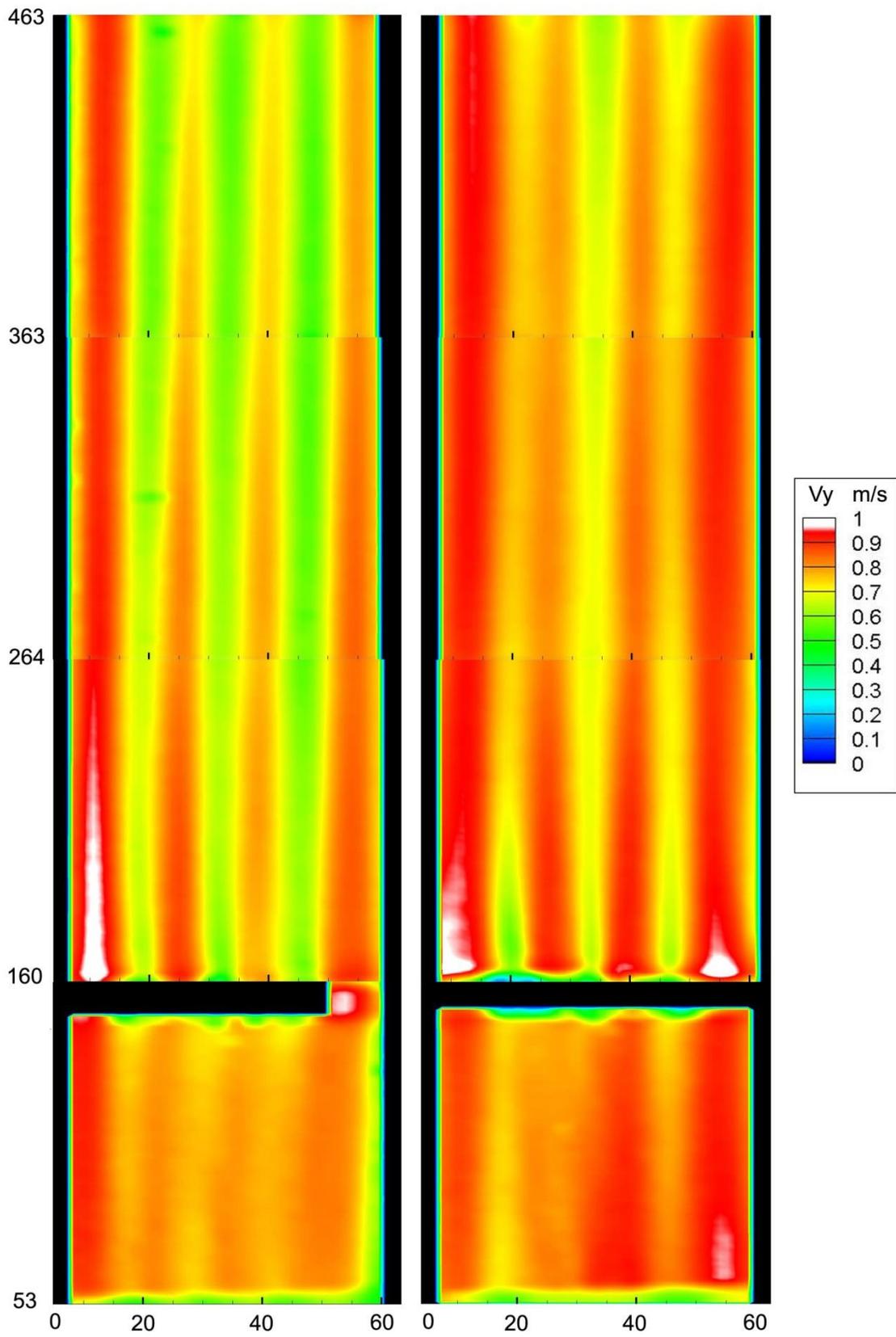


Abb. 18: Geschwindigkeitsfelder bei einem Volumenstrom von 1,2 l/s, y-Anteil, Vergleich zwischen Ebene 2 (links) und Ebene 4 (rechts)

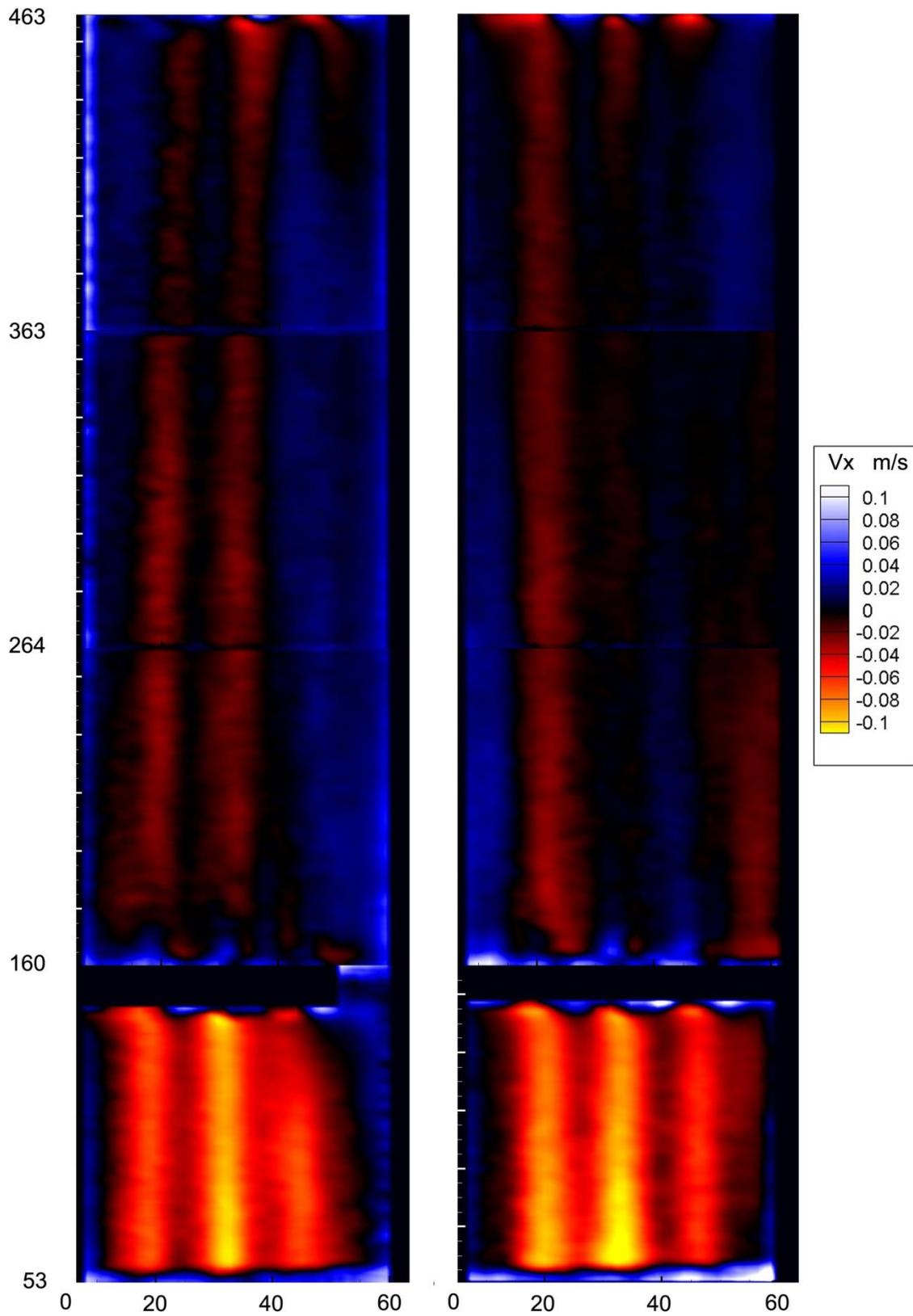


Abb. 19: Geschwindigkeitsfelder bei einem Volumenstrom von 1,2 l/s, x-Anteil, Vergleich zwischen Ebene 2 (links) und Ebene 4 (rechts)

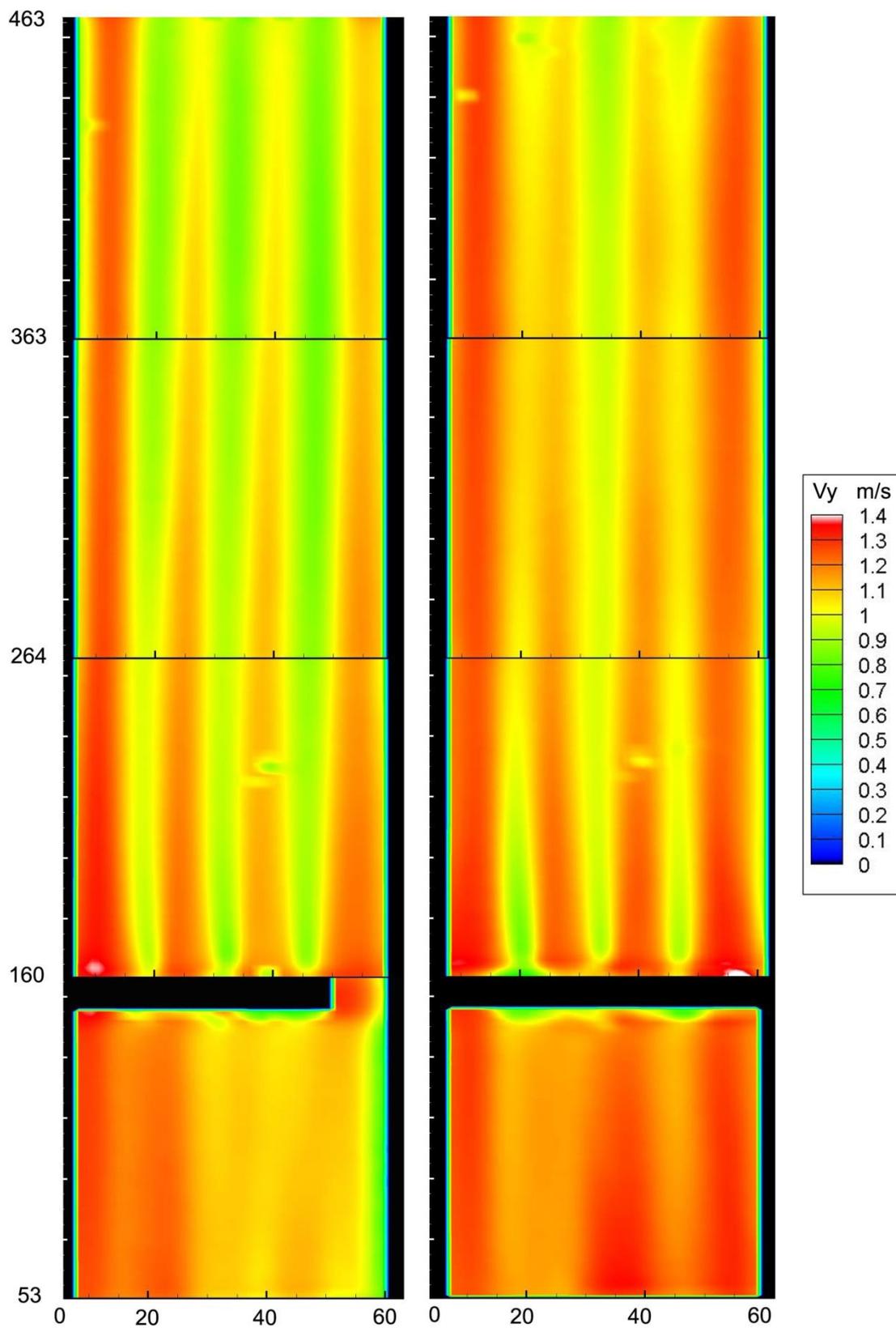


Abb. 20: Geschwindigkeitsfelder bei einem Volumenstrom von 1,7 l/s, y-Anteil, Vergleich zwischen Ebene 2 (links) und Ebene 4 (rechts)

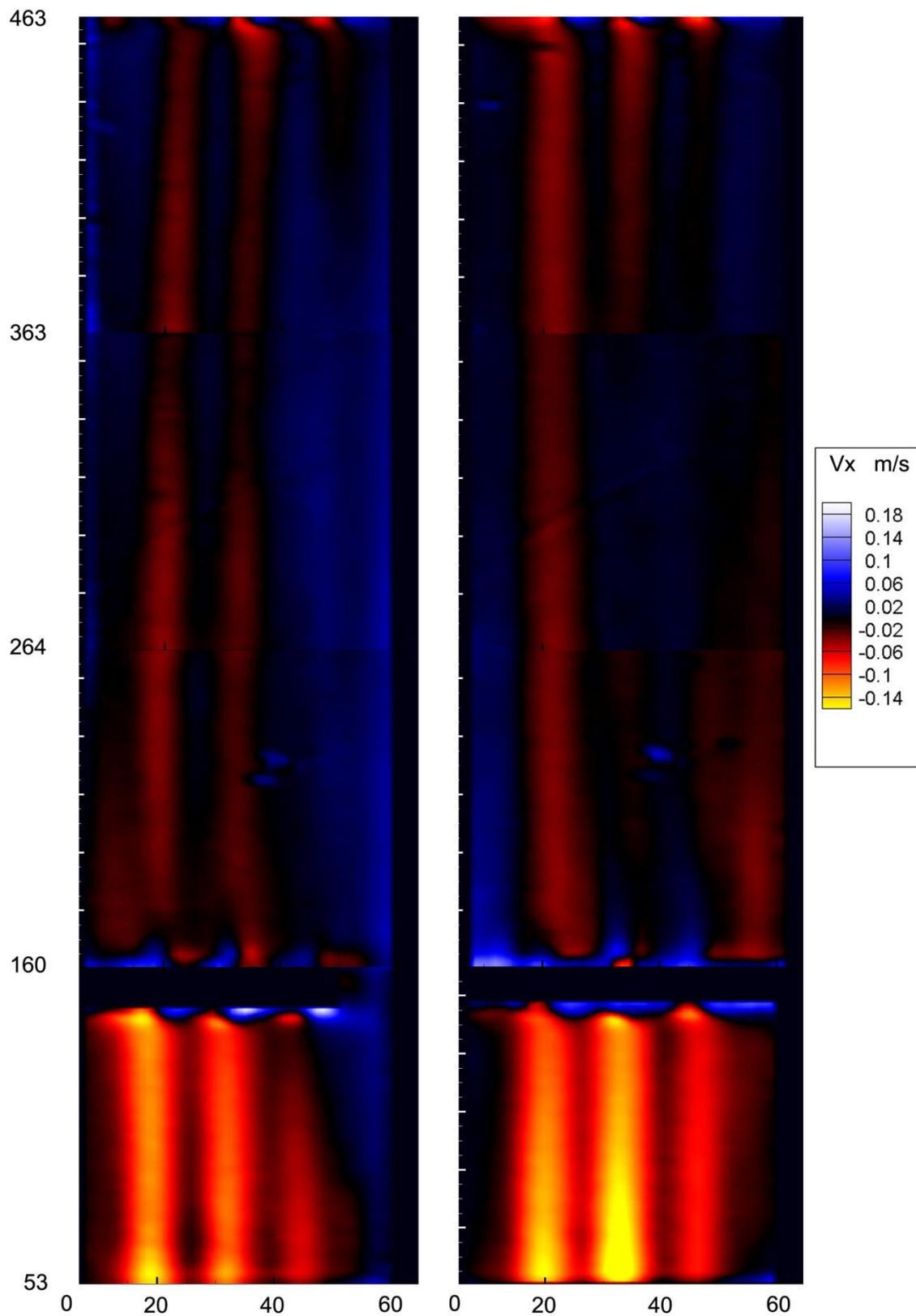


Abb. 21: Geschwindigkeitsfelder bei einem Volumenstrom von 1,7 l/s, x-Anteil, Vergleich zwischen Ebene 2 (links) und Ebene 4 (rechts)

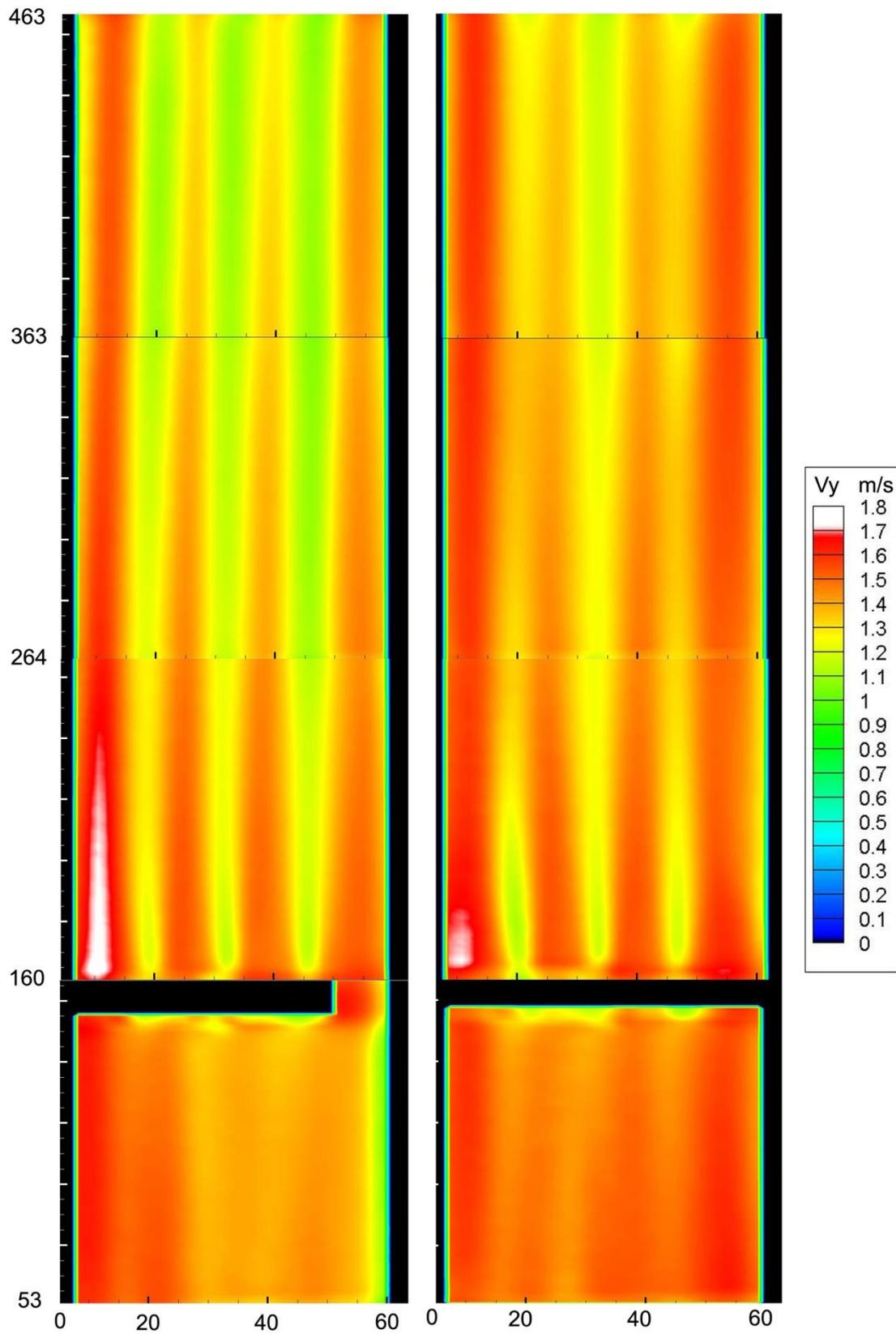


Abb. 22: Geschwindigkeitsfelder bei einem Volumenstrom von 2,14 l/s,  $y$ -Anteil, Vergleich zwischen Ebene 2 (links) und Ebene 4 (rechts)

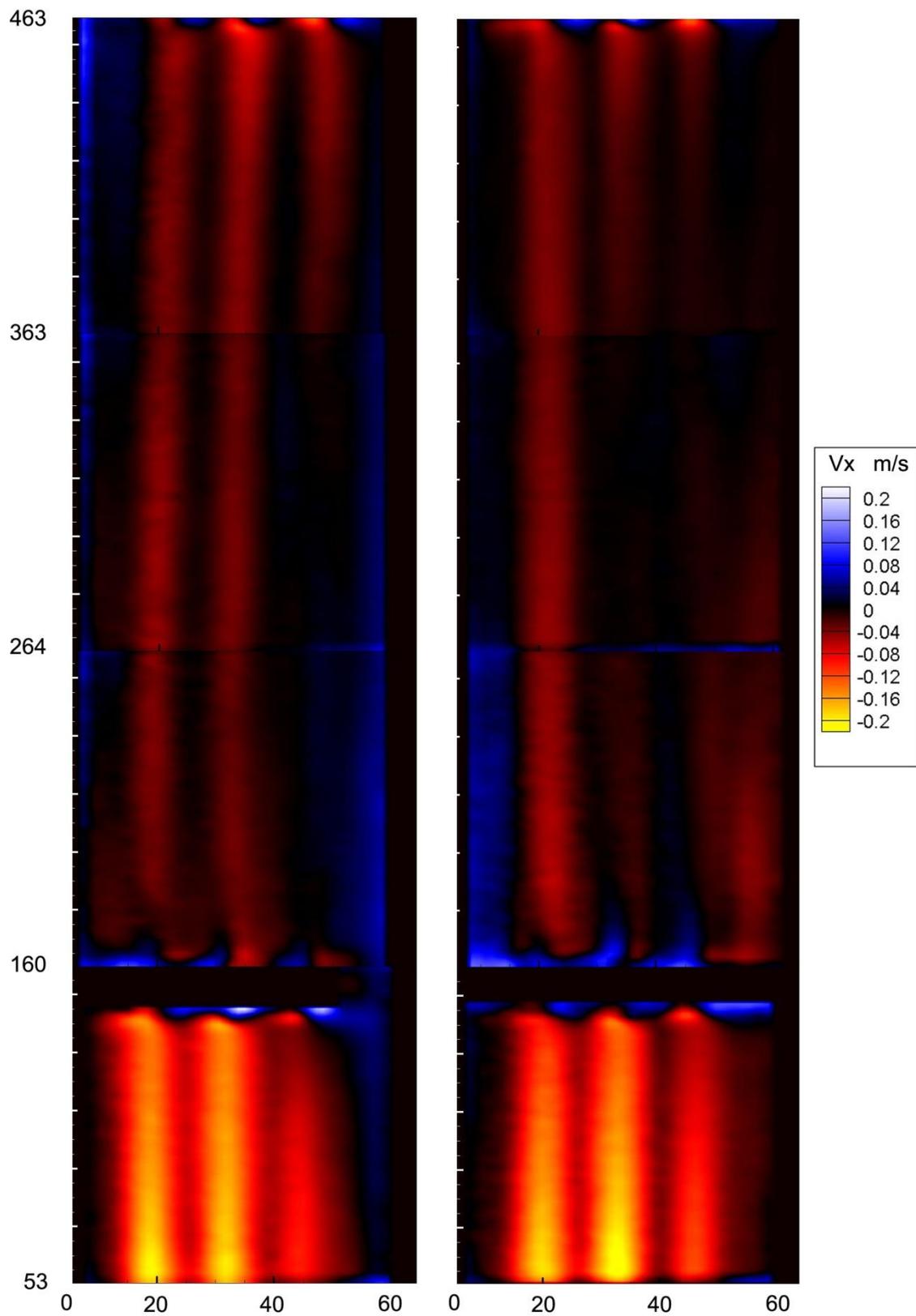


Abb. 23: Geschwindigkeitsfelder bei einem Volumenstrom von 2,14 l/s, x-Anteil, Vergleich zwischen Ebene 2 (links) und Ebene 4 (rechts)

Die Darstellungen lassen folgende Interpretationen zu:

- Der Abstandshalter bei Höhe 150 mm – 160 mm wirkt in hohem Maße stratifizierend
- Im Verlauf der Strömung driftet ein Teil des in den Unterkanälen strömenden Fluides in den Bereich außerhalb des Bündels
- Ebene 4 ist stärker durchströmt, als Ebene 2
- Die Vertikalgeschwindigkeit ist in den Bereichen der Engstellen zwischen zwei benachbarten Stäben am geringsten, die Horizontalgeschwindigkeit ist dort am höchsten.
- Bei allen drei eingestellten Volumenströmen zeigt sich ein qualitativ identischer Strömungsverlauf

## Strömungsprofile

Die aufgenommenen Strömungsprofile in den o.g. Höhen sind für die Ebenen 2 und 4 sowie für alle drei Volumenströme in Abb. 24 verzeichnet. Die Legende zeigt die Zuordnung nach dem Schema „Volumenstrom (l/s) | Ebene“.

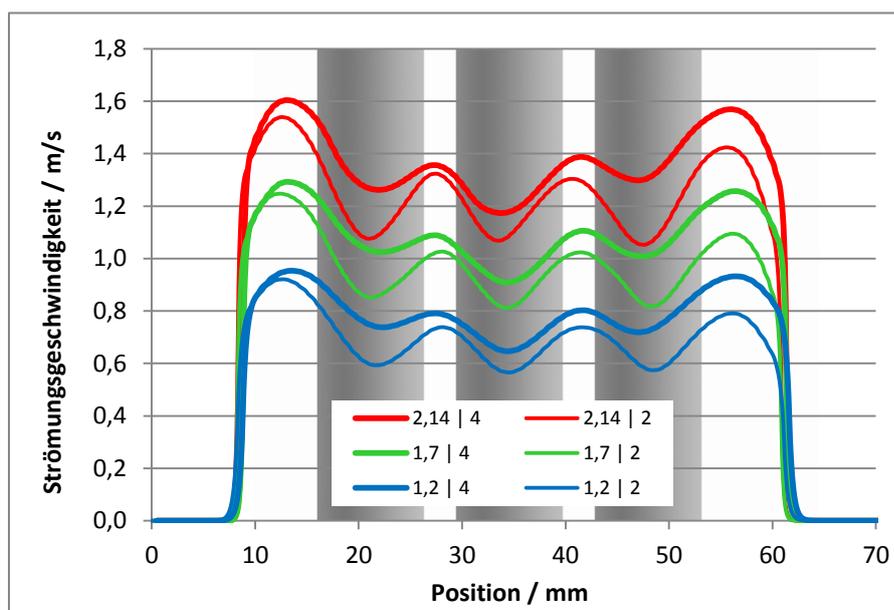


Abb. 24: Vergleich der Strömungsprofile (Vertikalgeschwindigkeit) für Höhenbereich 426 mm – 441 mm (gemittelt), Schematische Darstellung der Stabreihen

Für alle Strömungsprofile gilt:

- Das absolute Geschwindigkeitsmaximum liegt ca. bei Position 13 mm, und damit außerhalb des Bündels.
- Die Unterkanäle sind stärker durchströmt, als die Bereiche der Engstellen zwischen zwei benachbarten Stäben.

Für alle Volumenströme gilt:

- Unterkanal 2 ist der am stärksten durchströmte Unterkanal.

Zur Quantifizierung der letzten Aussage wird für alle Profile der Positionsbereich 21 mm – 47 mm (Bereich innerhalb des Bündels) selektiert und die Geschwindigkeitswerte auf das für den zugehörigen Volumenstrom gültige Maximum skaliert. (s. Abb.: 25) Dieses Maximum lag stets bei Position 41,1/41,2 mm in Ebene 4, der Mitte des Unterkanales 2. Die (lokalen) Strömungsmaxima der anderen Unterkanäle lagen zwischen 1,5% und 8% unter denen von Unterkanal 2.

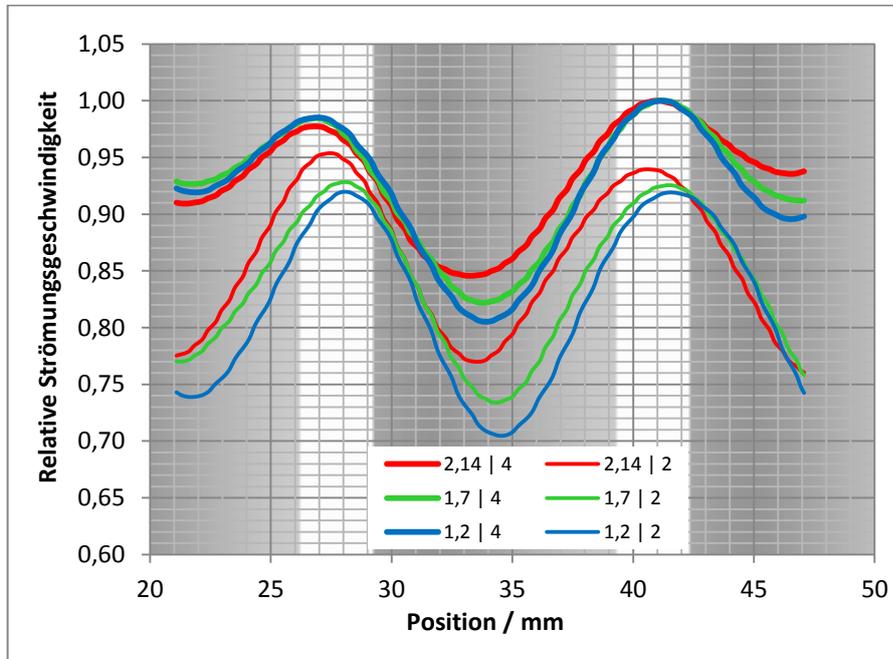


Abb. 25: Skalierte Strömungsprofile im Bereich der Unterkanäle, Schematische Darstellung der Stabreihen

Für den gewählten Bündelausschnitt sind die Vertikalgeschwindigkeitextreme mit den zugehörigen horizontalen Positionen in Tab.4 zusammengefasst.

	Ebene 2			Ebene 4			
Vol.-Strom	1,2	1,7	2,14	1,2	1,7	2,14	l/s
Lokalisierung	Unterkanal 4			Unterkanal 1			
Maximum 1:	0,74	1,03	1,32	0,79	1,09	1,36	m/s
bei Pos.:	28,1	28,1	27,4	27,0	26,8	26,8	mm
Lokalisierung	Mittlere Engstelle Ebene 2			Mittlere Engstelle Ebene 4			
Minimum:	0,57	0,81	1,07	0,65	0,91	1,17	m/s
bei Pos.:	34,5	34,4	33,5	33,9	33,8	33,2	mm
Lokalisierung	Unterkanal 3			Unterkanal 2			
Maximum 2:	0,74	1,02	1,30	0,80	1,11	1,39	m/s
bei Pos.:	41,6	41,5	40,7	41,2	41,2	41,1	mm

Tab. 4: Absolutwerte der Vertikalgeschwindigkeitsmaxima und –minima sowie zugehörige Positionen des in Abb. 25 dargestellten Bereiches

## Fehlerbetrachtung

Da Lagetoleranzen sowohl der Stäbe im Bündel, als auch der Laserebene nicht vermessbar waren, sind hier nachträgliche Abschätzungen notwendig. Dazu können Form und Lage der aufgenommenen Profillinien Hinweise geben. Skaliert man die Differenz zwischen lokalem Maximum (angenommene Mitte des jeweiligen Unterkanales) und lokalem Minimum (Passage der mittleren Stabreihe durch die Laserebene) auf dieses Maximum, erhält man einen Dynamikwert als Vergleichsgröße. Ein hoher Dynamikwert bei niedrigem Minimum ist hier ein Indiz für einen außermittigen Verlauf der Laserebene, umgekehrt deutet eine niedrigere Dynamik bei höheren Geschwindigkeitswerten am lokalen Minimum auf einen hinreichenden Abstand der Laserebene sowohl zum mittleren Stab, als auch zum benachbarten, also auf eine mittige Lage.

In Abb. 24 und 25 sowie Tab. 4 lässt sich erkennen, dass die Geschwindigkeitsprofile der Ebene 4 sowohl höhere Absolutwerte (Maximum im Unterkanal 2), als auch eine niedrigere Dynamik aufweisen als Ebene 2. Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung der berechneten Dynamikwerte.

Ebene	Unterkanal	1,2 l/s	1,7 l/s	2,14 l/s
2	4	23,4%	20,9%	19,3%
	3	23,3%	20,7%	18,0%
4	2	19,5%	17,8%	15,4%
	1	18,3%	16,5%	13,5%

Tab. 5: Dynamikwerte innerhalb des Bündels

Die Verteilung der Dynamikwerte sowie die Absolutwerte der Maxima und der Minima lassen unter oben gemachten Prämissen die Schlussfolgerung zu, dass die Ebene 2 einen größeren Abstand zur idealen Mittenlage aufwies, als Ebene 4. Damit ist bei Ebene 2 im Bereich des Bündelinneren mit reduzierten Geschwindigkeitswerten zu rechnen. Eine Abschätzung zu deren Höhe ist in Tabelle 6 enthalten. Insgesamt kommen folgende Faktoren als Fehlerquellen in Betracht:

Fehlerursache	Folge	Fehlergröße
Außermittige Lage des Laserfächers	Reduzierung von Absolutwerten und Erhöhung der Dynamik der Strömungsgeschwindigkeit	Max. 10% Reduzierung der Vertikalgeschwindigkeit
Laserfächer nicht parallel zu Stabachsen	„Stufung“ der Geschwindigkeitsfelder bei Übergang zw. zwei benachbarten Höhenpositionen	
Nach initialen Messungen Defekt des PMMA-Hüllrohres (Wandstärke 4,0 mm), als Ersatz Glasrohr mit Wandstärke 2,8 mm	keine exakte Führung des Bündels durch die Abstandshalter	1 mm Spiel in jede horizontale Richtung
Elastizität des Stabmaterials	Biegung der Stäbe im Volumenstrom	Max. 0,5 mm Versatz der Stäbe
Manuelle ROI – Maskierung	willkürliche Grenzen des Auswertebereichs	0,5 mm seitlicher Versatz möglich

Tab. 6: Mögliche Fehlerquellen und deren Einfluss auf die Messergebnisse

Somit ergeben sich folgende maximale Gesamtfehler:

Geschwindigkeitswerte: -10%

Horizontalposition: 2 mm

## Zusammenfassung

Es wurden Strömungsmessungen mit Particle Image Velocimetry (PIV) an einem senkrechten Strömungskanal mit einem längs zur Strömung fixierten Bündel aus 3 x 3 Stäben durchgeführt. Für den Strömungskanal wurden transparente Werkstoffe sowie ein optisch angepasstes Arbeitsfluid gewählt. Die Messungen erfolgten mit drei Volumenströmen und in fünf senkrechten Ebenen, die jeweils in vier Höhenpositionen unterteilt waren. In der Auswerteprozedur wurden für jede Messung 800 Einzelkorrelationen zu einem zeitlichen Mittel verarbeitet.

Bei allen Volumenströmen zeigten sich qualitativ identische Strömungsprofile. Die Bereiche der Maximalgeschwindigkeiten befanden sich zwischen Bündel und Hüllrohr. Die Beträge der lokalen Strömungsmaxima in den Unterkanälen wiesen bei jedem Volumenstrom eine maximale Differenz von 8 % auf. Die eingesetzten Abstandshalter zwischen den Stäben wirkten auf die Strömung in hohem Maße stratifizierend.