

## EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE UNTERSUCHUNG VON WANDNAHEN STRÖMUNGEN IN PROFILIERTEN ROHREN

### Experimental and numerical investigation of near wall flow in corrugated tubes

**Steven Mac Nelly**<sup>1</sup>, **Marc Nadler**<sup>1</sup>, **Willi Nieratschker**<sup>1</sup>, **Marc Künster**<sup>1</sup>, **Antonio Delgado**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Koblenz, Fachrichtung Maschinenbau, D-56068 Koblenz

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg, D-91058 Erlangen

Strukturierte Rohre, LDA, Strömungsprofile  
Corrugated tubes, LDA, flow profile

### Zusammenfassung

Für den Einsatz in Abgaswärmeübertragern sind Rohre mit strukturierten Oberflächen eine sinnvolle Alternative zum Glattrohr, da diese deutlich mehr Wärme bei gleichem Bauraum übertragen können. Durch regelmäßige Vertiefungen der Rohrwand wird die mittlere Wärmestromdichte im Vergleich zum Glattrohr deutlich gesteigert. Anhand isothermer und nicht-isothermer CFD-Simulationen auf Basis der Finite-Volumen-Methode (FVM) konnte nachgewiesen werden, dass in bestimmten Bereichen der Vertiefungen die Dicke der viskosen Unterschicht lokal reduziert wird. Es existieren Bereiche mit vergrößerter Grenzschichtdicke, die das Bilden von stehenden Wirbeln begünstigt. Die geschickte Ausformung der Wandkontur erlaubt es die beiden Bereiche so zu verteilen, dass die mittlere Wärmestromdichte überproportional im Vergleich zum Anstieg des Druckverlusts anwächst.

Das RSM- $\omega$  Modell aus der Gruppe der RANS Modelle erweist sich bisher als das geeignetste Turbulenzmodell. Nach Anpassung der Koeffizienten im Turbulenzmodell konnten hiermit die größten Übereinstimmungen mit Prüfstandsmessungen gefunden werden.

Zur Validierung der zu wählenden Koeffizienten im RSM- $\omega$  Modell wurden Geschwindigkeitsprofile in einem Querrillenrohr unter der Verwendung eines Laser-Doppler-Anemometers (LDA) für den isothermen Fall an verschiedenen Positionen gemessen. Zur Positionierung des Lasers im Rohr wurde einseitig ein Fenster mit planarer Oberfläche angebracht. Um den Einfluss des Fensters auf die gegenüberliegende Strömung vernachlässigbar gering zu halten, wurden große Rohre mit einem Innendurchmesser von  $d_i = 38 \text{ mm}$  verwendet.

Mit den gefundenen Koeffizienten konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den numerisch ermittelten Geschwindigkeitsprofilen erzielt werden.

## Einleitung

In Abgaswärmeübertragern wird Wärme vom Abgas durch die Rohrwand in eine kalte Flüssigkeit übertragen. Den größten Einfluss auf den Gesamtwärmeübergangswiderstand  $R_{th_{ges}}$  übt der gasseitige Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_i$  auf der Rohrinneenseite aus (vgl. A. Lemouedda et al. 2011). Die für die Wärmeübertragung wesentlichen Stoffeigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und spezifische thermische Kapazität  $c_p$  liegen bei Gasen deutlich niedriger als etwa die von Wasser und Stahl. Dabei spielt im turbulenten Fall die viskose Unterschicht eine wichtige Rolle. Bei Gasen ist sie deutlich dicker als bei Flüssigkeiten.

Rohre mit profilierten Oberflächen ermöglichen es die transporthemmende Wirkung der viskosen Unterschicht zu reduzieren und die Wärmestromdichte zu steigern (siehe Abbildung 1). Dabei üben die strukturbestimmenden Parameter wie Strukturtiefe und Strukturwinkel einen großen Einfluss auf die Wärmestromdichte und den Druckverlust aus (siehe Mitrovic 2002). Durch numerische Simulationen kann das Strömungsfeld im Inneren der Rohre nachgebildet und die Wärmestromdichte auf der Rohroberfläche visualisiert werden.

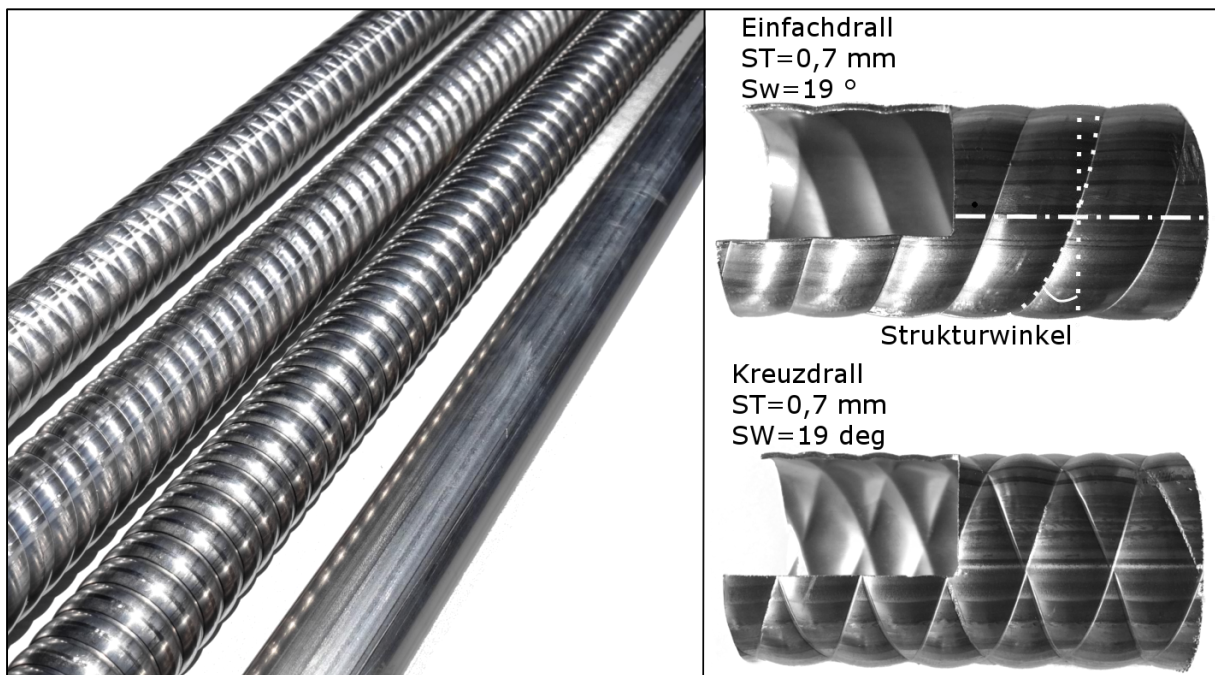


Abbildung 1: Verwendete Strukturrohre

## Numerische Simulation von Strukturrohren

Hauptuntersuchungsgegenstand ist die wandnahe Strömung weswegen diese durch ein sehr feines Netz aufgelöst wurde. Dazu wurde ein blockstrukturiertes Hexaeder-Netz modelliert, welches die viskose Unterschicht mit mindestens 10 Schichten abbildet, wobei die wandnächste Zelle  $y^+ \leq 1$  ist. Obwohl die Symmetrie der Strukturrohre Simulationen mit 90° Winkelsegmenten zur Verkürzung der Rechenzeit nahelegt, zeigten Vergleichsrechnungen mit Vollmodellen deutliche Abweichungen bei der Wärmestromdichte auf der Rohrwand. Daher erfolgten alle Simulationen als Vollmodell (siehe Abbildung 2). Mit einer entsprechend feiner Auflösung der wandnahen Bereiche ergeben sich Netze mit bis zu 13 Millionen Zellen.

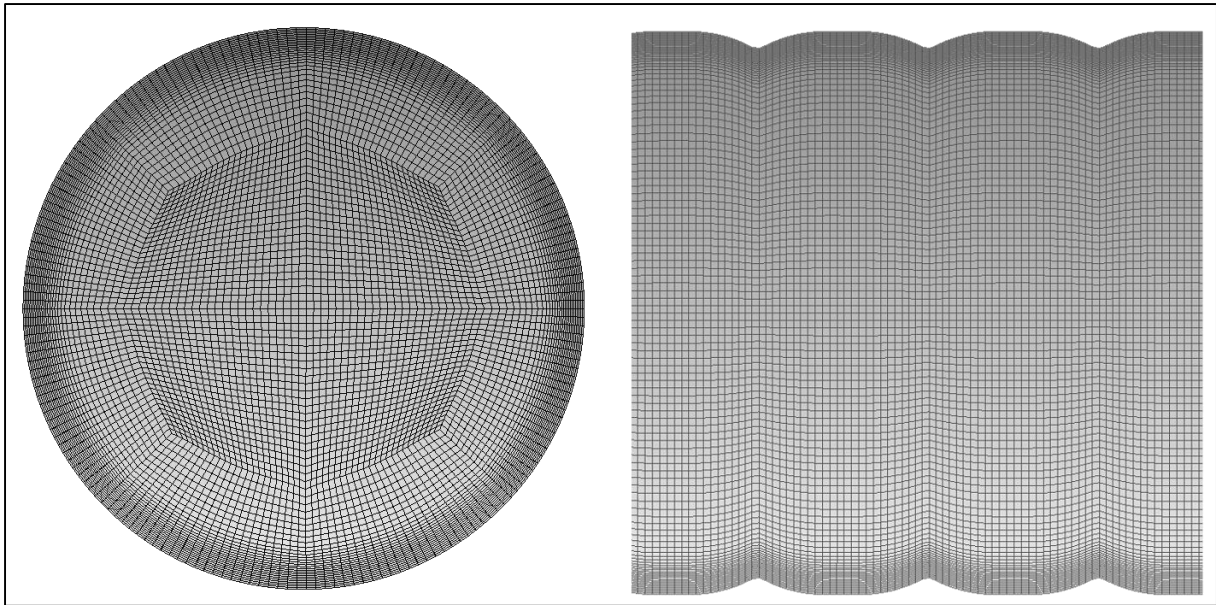


Abbildung 2: Netzausschnitt eines blockstrukturierten O-Grids von einem Querrillenrohr ( $S_A=1\text{mm}$ ,  $S_T=0,1\text{mm}$ ) mit ca. 13 Mio. Knoten (angefertigt mit Ansys ICEM)

Einem gewählten Referenzfall, für welchen eine ausreichende Anzahl von Messergebnissen vorliegt, werden die verschiedenen in ANSYS Fluent implementierten Turbulenzmodelle gegenübergestellt. Das Reynolds-Stress- $\omega$  Modell (RSM- $\omega$ ) erwies sich gegenüber den 2- und 3-Gleichungsmodellen bisher als der beste Ansatz. Durch seinen anisotropen Ansatz können Sekundärströmungen, wie sie die Vertiefungen der Oberfläche verursachen, bei der Simulation berücksichtigt werden. Nach Anpassung der Koeffizienten dieses Turbulenzmodells konnten die Messergebnisse wie Nußelt-Zahl und Druckverlust des Wärmeübertrager-Versuchsstandes hinreichend genau getroffen werden. Zudem erweist sich das Turbulenzmodell nach Anpassung robust gegenüber Änderungen von Geometrie- und Strömungsparametern.

### **Versuchsaufbau zur Messung der wandnahen Strömungsprofile mittels LDA**

Zur Vermessung der Strömungsprofile innerhalb der Strukturrohre wurde ein Laser-Doppler-Anemometer mit folgenden Kenndaten verwendet:

Laser Leistung: 75,2 mW  
 Wellenlängen: 532 nm / 561 nm  
 Messgenauigkeit: 0,3%

Das zu vermessende Rohr ist auf dem Labortisch mit zwei Prismen eingespannt ist (siehe Abbildung 3). Hinter dem eingespannten Rohr befindet sich ein Referenzmesspunkt, an dem die relative Position des Messvolumens zum Rohr eingestellt werden kann. Dadurch wird sichergestellt, dass bei dem Vergleich unterschiedlicher Messungen keine Abweichungen durch Fehlpositionierungen entstehen.

Ein Radialgebläse liefert den gewünschten Massenstrom von 5,6 g/s. Bei einer Eintrittstemperatur von 30°C im Rohr und einem Innendurchmesser von  $d_i = 38\text{ mm}$  stellt sich eine Reynolds Zahl von 9.976 ein. Ähnlich hohe Reynolds Zahlen werden bei der Auslegung von Abgaswärmeübertragern angestrebt (vgl. Nadler et al. 2008).

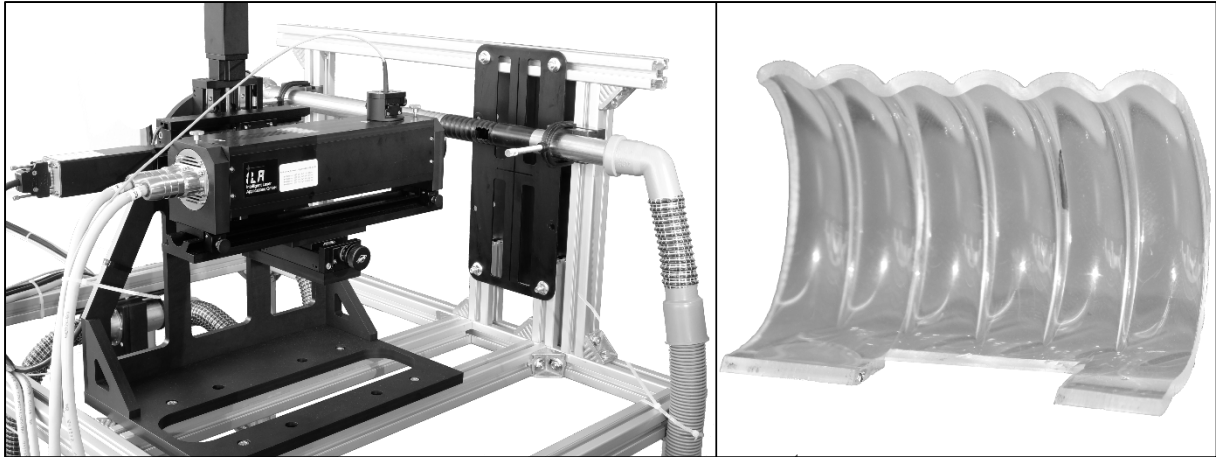


Abbildung 3: LDA Versuchsstand zur Vermessung von Strömungsprofilen in Rohren.

Anstelle von Metallrohren wie sie bei Abgaswärmeübertragern zum Einsatz kommen, wurden Rohre aus Acrylglas verwendet. Durch die reflektierende Oberfläche der Metallrohre ist die Messung der Strömungsprofile bis zu einem Radius von maximal  $0,8 R$  beschränkt. Weitere Maßnahmen sind geeignet den Messabstand zur Rohrwand weiter zu reduzieren, wobei eine geometrische Beeinflussung der Wandgeometrie in Kauf genommen werden muss. Transparente Kunststoffrohre erlauben Messungen bis zu einem Wandabstand von  $0,35 \text{ mm}$  ( $0,982 R$ ) und liefern damit einen Einblick in die wandnahe Strömung bis in die Vertiefungen der Struktur.

Zur exakten Positionierung des Messvolumens im Rohr wurde eine planare Glasscheibe ( $s = 1 \text{ mm}$ ) auf der gegenüberliegenden Seite der zu vermessenden Oberfläche angebracht (siehe Abbildung 4). Effekte der Glasscheibe auf das wandnahe Strömungsprofil sind durch den relativ großen Rohrdurchmesser von  $d=38 \text{ mm}$  verschwindend gering, insbesondere weil sich der Messpunkt auf der gegenüberliegenden Rohrseite befindet. Der Einfluss auf die Geschwindigkeitserhöhung im Bereich der Hauptströmung wurde bei der numerischen Simulation berücksichtigt.

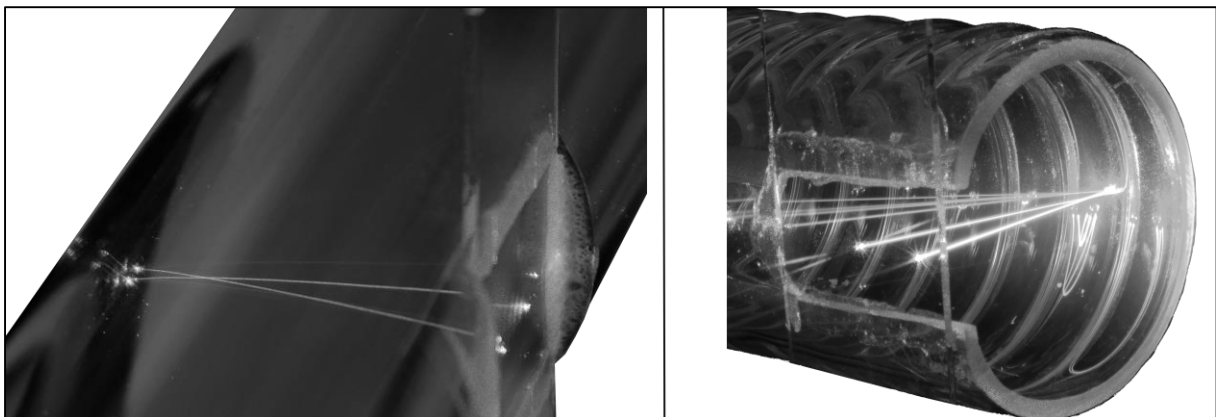


Abbildung 4: Positionierung des Messvolumens in einem Glattrrohr (links) und einem Querrillenrohr (das rechte Rohr wurde für das Foto aufgeschnitten)

## Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Zur lokalen Validierung der eingestellten Koeffizienten im Turbulenzmodell wurden isotherme Simulationen vorgenommen. Das bietet den Vorteil, dass die Simulationen durch Messungen

mit einem Laser-Doppler-Anemometer verifiziert werden können, ohne Festkörper Tracer verwenden zu müssen. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die wandnahe Strömung innerhalb der Vertiefungen der Struktur. Dazu wurden an vier Positionen gemäß Abbildung 5 die Geschwindigkeitsprofile anhand numerischer Simulationen ermittelt. Ergänzend dazu wurden an diesen Stellen die Geschwindigkeitsprofile durch das LDA vermessen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich hinter den Vertiefungen stehende Wirbel bilden. Bei dieser Konfiguration mit einem Strukturabstand  $S_A=10$  mm und einer Strukturtiefe von  $S_T=2$  mm bildet sich ein Wirbel, der die gesamte Vertiefung ausfüllt. Bei Wärmeübertragungsprozessen mindern diese Zonen den konvektiven Wärmetransport von der heißen Kernströmung zur Rohrwand.

Durch die LDA-Messungen konnte dieser Strömungsverlauf verifiziert werden (Abbildung 5).

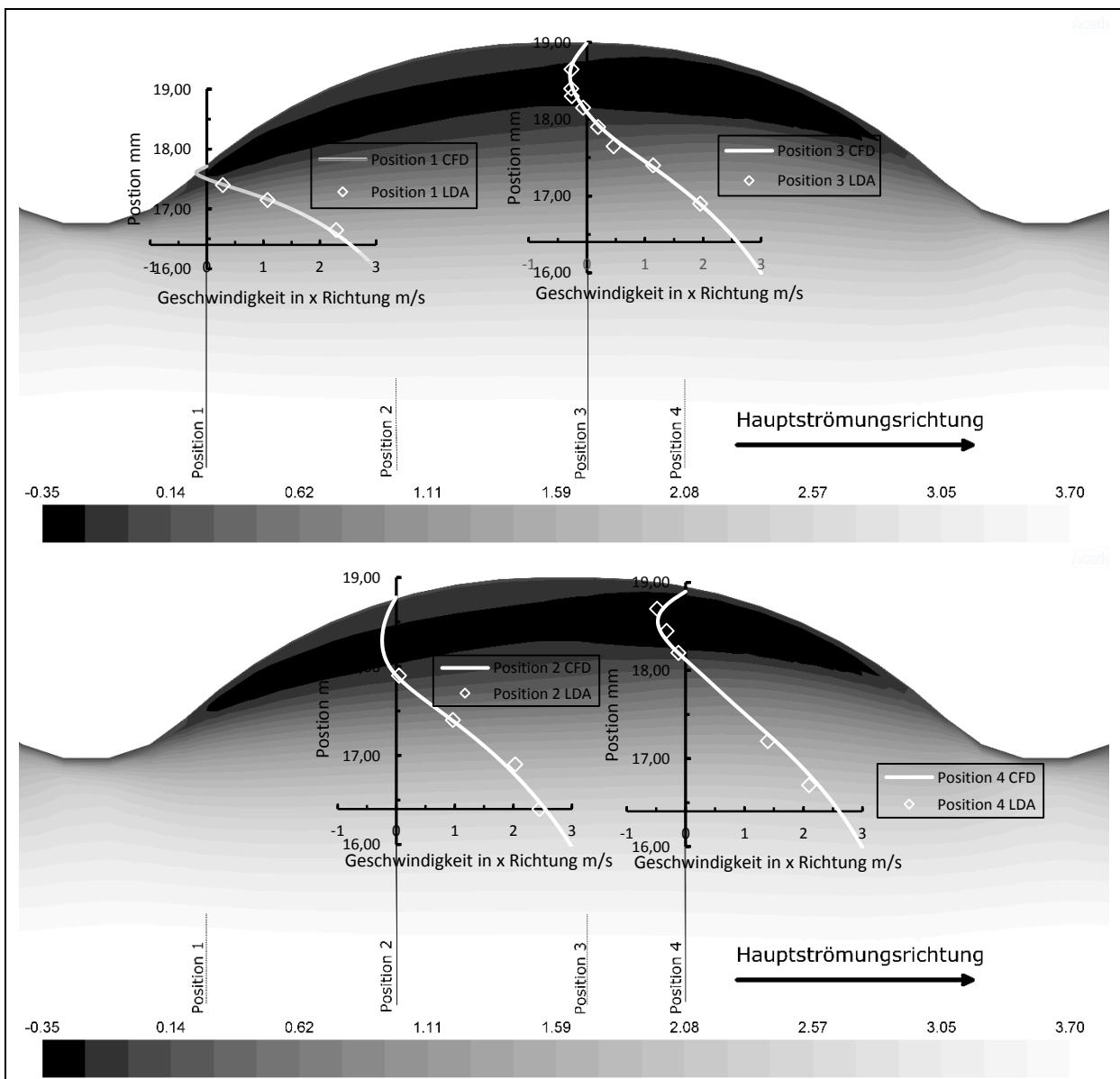


Abbildung 5: Geschwindigkeitsverteilung in Hauptströmungsrichtung an den Messpositionen 1, 2, 3 und 4.

Die für den isothermen Fall verifizierten Koeffizienten wurden nun auf nichtisotherme Simulationsrechnungen angewendet. Im nichtisothermen Fall liegt bei Rohren mit strukturierten Ober-

flächen die höchste Wärmestromdichte im Bereich der Vertiefungen vor. Das ist darauf zurückzuführen, dass in diesen Zonen die viskose Unterschicht, bedingt durch die Strömungsumlenkung vor den Vertiefungen und den steilen Geschwindigkeitsgradienten auf der Vertiefung, besonders gering ist. Dort findet ein konvektiver Wärmetransport bis hin zur viskosen Unterschicht statt, ohne dass stehende Wirbel dies vermindern.

Bedingt durch die hohe Rohreintrittstemperatur von  $T_{in} = 450^{\circ}\text{C}$  erhöht sich bei gleichbleibendem Massenstrom ( $\dot{m} = 0,56 \text{ g/s}$ ) die mittlere Strömungsgeschwindigkeit von  $\bar{v} = 3,7 \text{ m/s}$  auf  $12,9 \text{ m/s}$  im Rohr. Daraus ergibt sich rechnerisch eine Reynolds Zahl von  $Re = 11.807$  welche in der gleichen Größenordnung bleibt.

Abbildung 6 zeigt die Simulationsergebnisse der Wärmestromdichten von einem Querrillenrohr (QR), einem Einfachdrallrohr (EDR) und einem Kreuzdrallrohr (KDR). Strukturweiten und Strukturabstände sind dabei bei allen drei Rohrtypen gleich.

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die höchsten Wärmestromdichten mit bis zu  $\dot{q} = 50.000 \text{ W/m}^2$  innerhalb der Vertiefungen vorliegen. Weiter fällt auf, dass die Zonen hinter den Vertiefungen deutlich niedrigere Werte aufweisen ( $\dot{q} \approx 12.000 \text{ W/m}^2$ ). Dieses Verhalten ist durch die stehenden Wirbel hinter den Vertiefungen erklärbar.

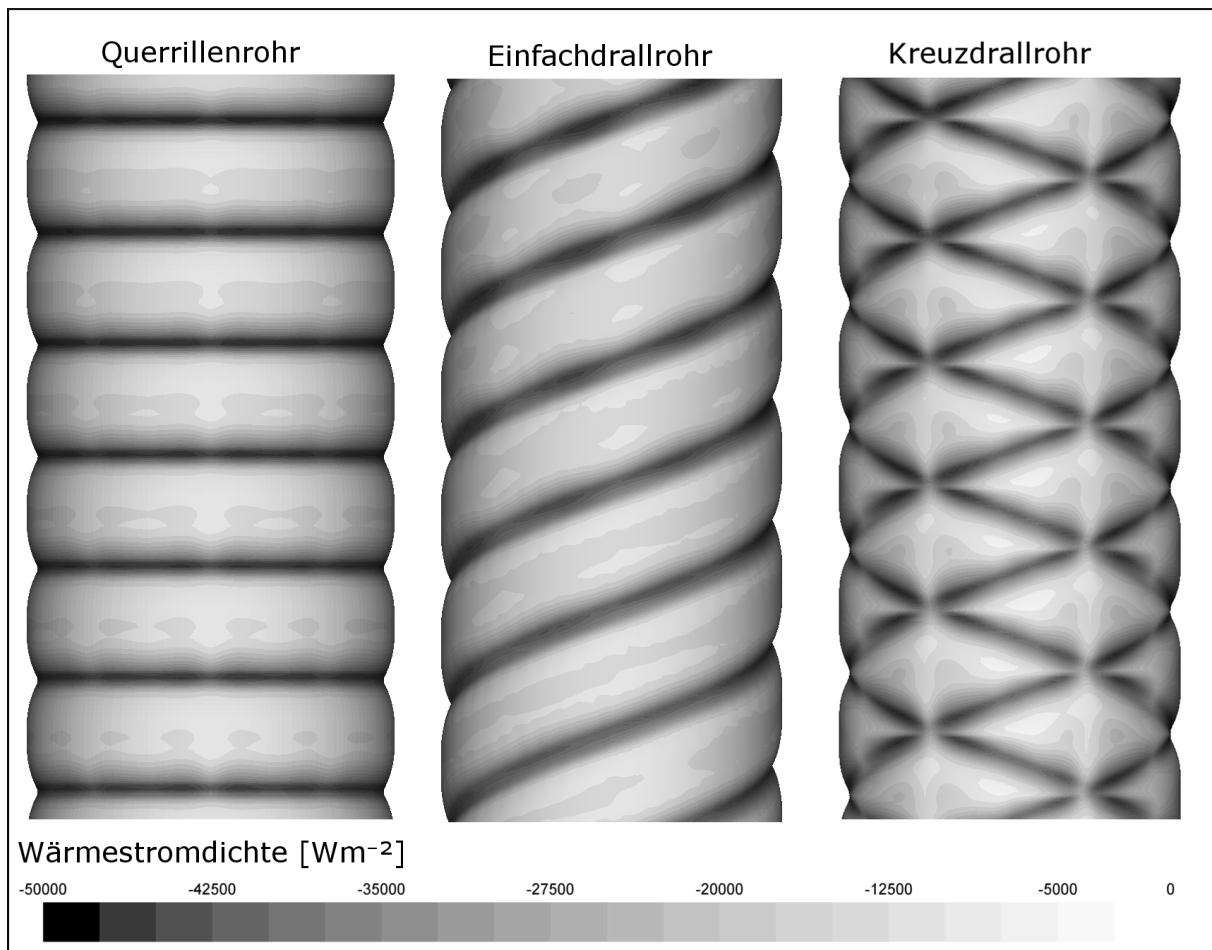


Abbildung 6: Wärmestromdichte auf der Rohroberfläche verschiedener Strukturrohre

Bedingt durch die zusätzliche Helix weist das Kreuzdrallrohr deutlich höhere Wärmestromdichten als das Einfachdrallrohr und das Querrillenrohr auf. Um die Wärmestromdichte der unterschiedlichen Rohrtypen zu quantifizieren, wurden die Oberflächen der Modelle in 10 cm lange Segmente in axiale Richtung gemäß Abbildung 7 aufgeteilt. Anschließend wurde die mittlere Wärmestromdichte der Segmente A1 bis A7 ermittelt und in Abbildung 8 aufgetragen.

Um numerische Effekte zu kompensieren, wurden die ersten 10 cm des glatten Einlaufbereichs, vor Abschnitt 1, jeweils nicht mit berücksichtigt.

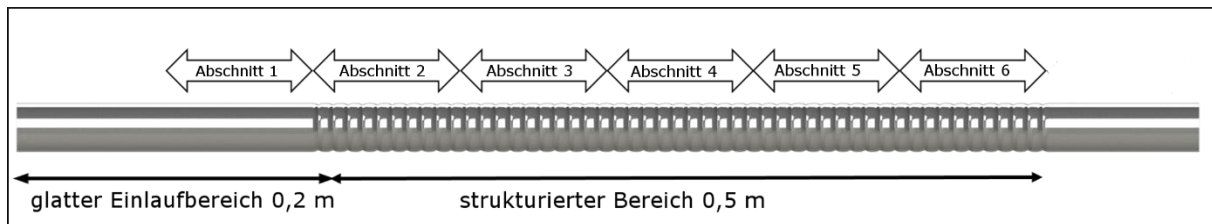


Abbildung 7: Aufteilung der Strukturrohre

Bei allen Strukturrohrtypen fällt die Wärmestromdichte in Strömungsrichtung ab. Dies ist auf die fallende Temperatur in Strömungsrichtung zurückzuführen. Die Wärmestromdichte fällt linear mit sinkender Temperaturdifferenz zwischen rohrinnenseitigem Gas und dem rohrumgebendem Wasser (30 °C). Die größte über die gesamte Rohrlänge gemittelte Wärmestromdichte zeigt das Kreuzdrallrohr. Die mittlere Wärmestromdichte des zweiten Abschnittes (Abschnitt 2) übertrifft sogar die mittlere Wärmestromdichte des ersten glatten Abschnittes (Abschnitt 1). Auch die darauffolgenden Abschnitte des KDR weisen deutlich höhere Wärmestromdichten im Vergleich zum Querrillenrohr und Einfachdrallrohr auf, obwohl durch die höhere Wärmestromdichte im Segment A2, die Lufttemperatur der folgenden Abschnitte niedriger sein muss als bei dem Querrillenrohr und Einfachdrallrohr.

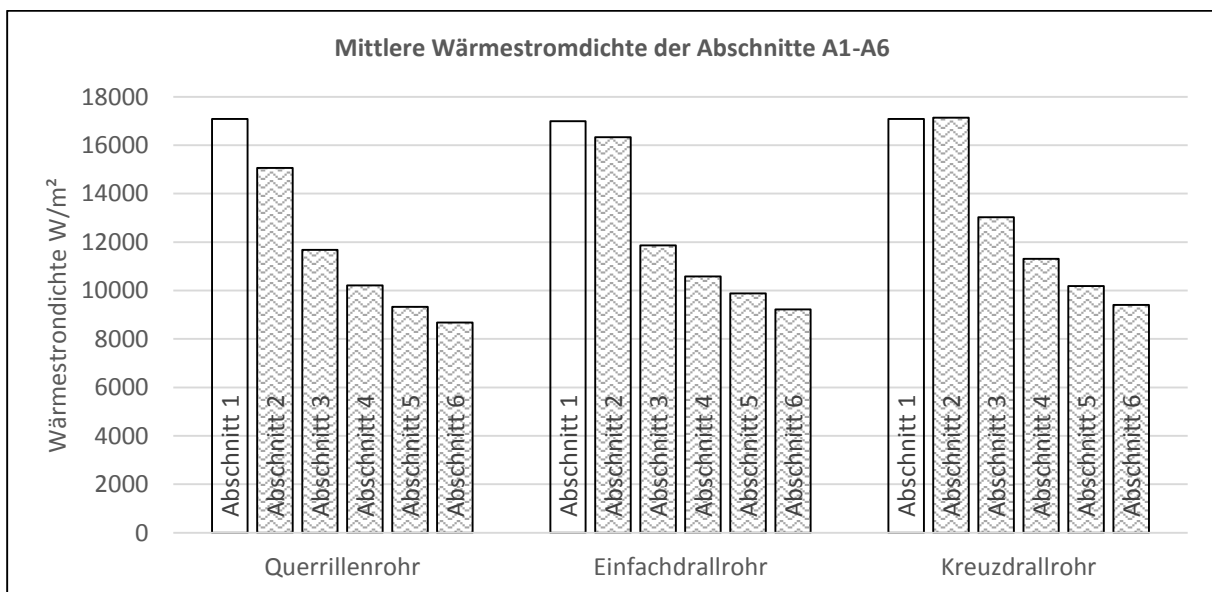


Abbildung 8. Mittlere Wärmestromdichte der einzelnen Segmente der Strukturrohre

## Schlussfolgerungen

Durch die numerischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass Rohre mit strukturierten Oberflächen deutlich höhere Wärmestromdichten aufweisen als Glattrohre. Die höchste Wärmestromdichte der untersuchten Rohre zeigt das Kreuzdrallrohr. Die hohen Werte der Wärmestromdichte sind erklärbar durch lokale Reduzierung der viskosen Unterschicht-Dicke in den Vertiefungen der Strukturierung. Dieser Effekt überwiegt trotz auftretender stehender Wir-

bel, die sich in den Taschen der Verformungen ebenfalls bilden und die mittlere Wärmestromdichte örtlich mindern. Durch die numerischen Simulationen konnten diese Effekte lokalisiert und quantifiziert werden. Die Messungen mit einem Laser-Doppler-Anemometer bestätigen die Simulationsergebnisse.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen werden weitere Messungen unter Variation der Struktur und Strömungsparameter zur Verbesserung der Wärmestromdichten bei gleichzeitig geringen Druckverlustanstiegen angestrebt.

## **Dankesworte**

Die Autoren wurden unterstützt durch Aprovis Energy Systems GmbH und das Forschungszentrum der Hochschule Koblenz. Herzlichen Dank an Dipl. Ing. Daniel Raab und Dipl. Ing. Michael Kalb für die fachliche Unterstützung bei der Gewinnung von Messdaten realer Anlagen. Weiterer Dank gebührt dem Fachpersonal der Maschinenwerkstatt der Hochschule Koblenz für die großartige Unterstützung bei dem Aufbau des Prüfstandes sowie der Fertigung der Messproben.

## **Literatur**

A. Lemouedda, A. Schmid, E. Franz, M. Breuer, A. Delgado, 2011: "Numerical Investigations for the Optimization of Serrated Finned-Tube Heat Exchangers", Applied Thermal Engineering, 31, pp. 8-9

J. Mitrovic, 2002: "Wärmeübertrager Rohre", Publico Publications

M. Nadler, W. Nieratschker, 2008: "Optimierung hochbelasteter Rohrplatten von Rohrbündelwärmeübertrager", VGB PowerTech, 88, pp. 66-71

Han Huaizhi; Li, Bing-Xi; Yu, Bi-Yong; He, Yu-Rong; Li, Feng-Chen, 2012: "Numerical study of flow and heat transfer characteristics in outward convex corrugated tubes", International Journal of Heat and Mass Transfer, 55, pp. 25-26