

den Krümmer im zweiten Kanal für die Rippenwände und die angeströmte Innenwand nahezu gleich hohe Werte gemessen wurden.

5.4.4 Der Stoffübergang im Gesamtmodell bei $Ro \neq 0$

In der Konfiguration 1 bis 3 kommt es zu rippeninduzierter Strömung unter dem Einfluss der Corioliskraft. Die Strömungsfelder am Eintritt in die beiden Kanalstrecken sind sehr unterschiedlich. Anhand der Darstellung im Bild 2.3 kann man erkennen, dass bei radial auswärtsgerichteter Strömung in einem glatten Kanal der Strömungskern zur nachfolgenden Wand verlagert wird. Diese unter Rotationseinfluss stehende Strömung tritt aus dem glatten Einlaufkanal in das berippte Modell ein. Demgegenüber existiert beim Eintritt in den zweiten Kanal eine maßgeblich durch den Krümmer beeinflusste Strömung.

Ergebnisse aus Strömungsfeldmessungen mittels Lasermesstechnik wurden für angestellte Rippen und $Ro \neq 0$ noch nicht veröffentlicht. Somit ist eine fundierte Interpretation der Ergebnisse, die die Kenntnis des Strömungsfeldes voraussetzt, nicht möglich. Anhand der lokalen Sh -Zahlen für $Ro = 0.2$ in Bild 5.17 a) ist für den ersten Kanal erkennbar, dass der Rippeneffekt auf der Folgewand durch die Corioliskraft verstärkt wird. Ganz im

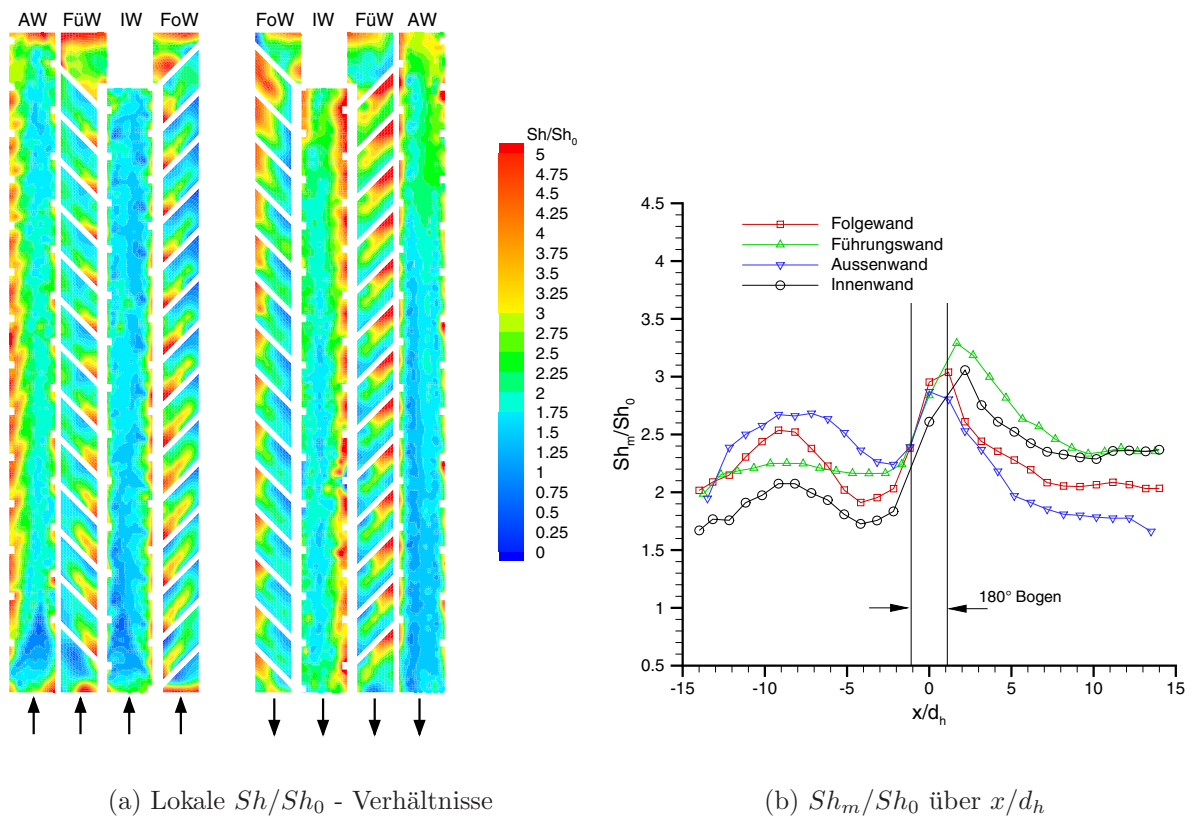


Bild 5.17: Stoffübergangsverhältnisse, Konfiguration 1, $Re = 25000$, $Ro = 0.2$

Gegensatz dazu sind die Stoffübergangsverhältnisse an der Führungswand entlang x/d_h nahezu unverändert und haben in Bild 5.17 b) einen sehr flachen Verlauf der gemittelten Messwerte. Die Verteilung an der Außenwand weist sehr viel höhere Werte an der Seite auf, die mit der Folgewand einen rechten Winkel bildet. Die Messergebnisse der Innenwand sind gegenüber dem stationären Fall, wie die Außenwanddaten, ebenfalls unsymmetrisch verteilt. Der Bereich mit lokal sehr niedrigen Werten wechselt in Hauptströmungsrichtung von einem Bereich nahe der Führungswand in den ersten zwei Rippenmodulen zu einem Bereich nahe der Folgewand kurz vor dem Krümmereintritt. Der verstärkte Rippen effekt an der Folgewand und der über der Lauflänge x/d_h nahezu unveränderte Verlauf der Führungswanddaten führen zu einem 'invertierten' Rotationseffekt vor dem Krümmereintritt. Die aus dem glatten Modell gemachten Beobachtungen für $Ro \neq 0$ treffen hier nicht mehr zu. Die Führungswand besitzt in diesem Bereich höhere Stoffübergangswerte als die Folgewand.

Nach dem Krümmer, der gegenüber Konfiguration 0 eine Erhöhung von Sh_m/Sh_0 durch die Rotation zulässt, stellen sich im zweiten Kanal die gleichen qualitativen Verläufe ein wie für einen glatten Kanal. Die Corioliskraft verlagert die Strömung zur Führungswand und bewirkt eine Stoffübergangserhöhung, während die Folgewand niedrigere Werte gegenüber dem stationären Fall besitzt.

Zur genaueren Darstellung des Rotationseffektes sind in Bild 5.18 die gemittelten Sh-Zahlen für $Ro \neq 0$ auf die für $Ro = 0$ bezogen worden. Man kann sehr deutlich den oben beschriebenen invertierten Rotationseffekt auf den berippten Wänden erkennen. Bei x/d_h von -5 bis -6 liegen die Sh-Zahlen der Folgewand unter denen der Führungswand. Die Differenz ist mit zunehmender Rotationszahl größer und liegt für $Ro = 0.2$ bei maximal 15%. Neben den Ergebnissen der berippten Wände zeigen aber auch die Daten der Seitenwände einen deutlichen Rotationseinfluss. Insbesondere die durch die Rippenwinkel angeströmten

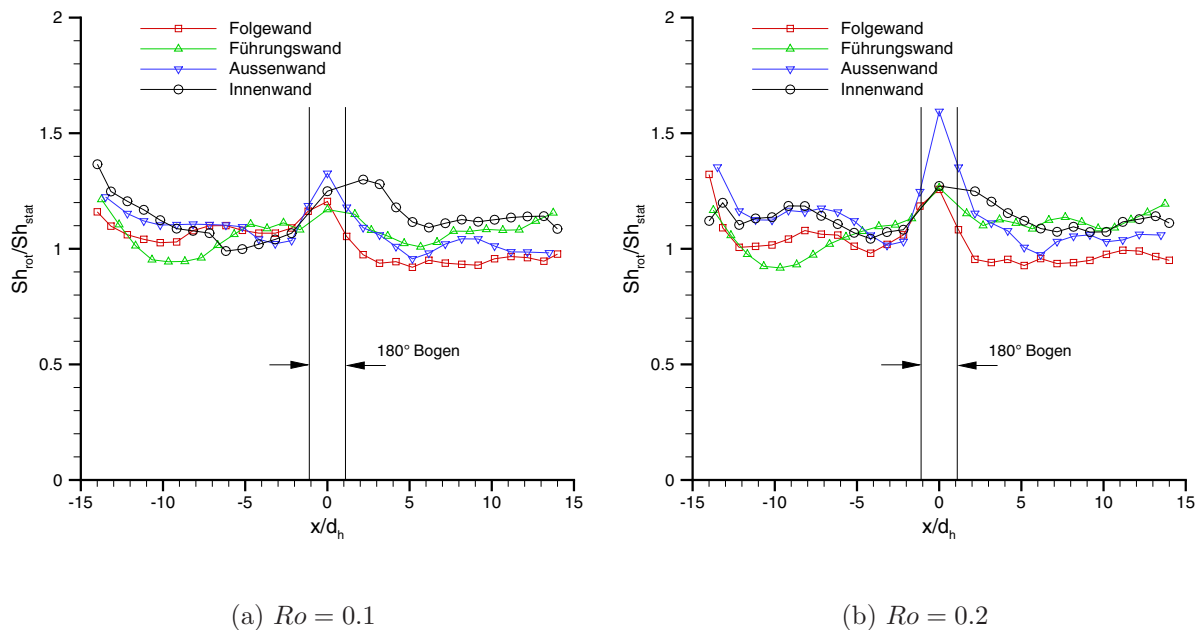


Bild 5.18: Sh_{rot}/Sh_{stat} entlang x/d_h , Konfiguration 1, $Re = 25000$, $Ro \neq 0$

Wände, im ersten Kanal die Außenwand und im zweiten Kanal die Innenwand, zeigen eine deutliche Erhöhung des Wärme-/Stoffüberganges durch den Einfluss der Corioliskraft. Im zweiten Kanal ist die Erhöhung des Stoffüberganges durch Rotation bei $Ro = 0.1$ auf der Innenwand höher als auf der Führungswand. Mit zunehmender Rotationszahl werden jedoch die Sh-Zahlen auf der Führungswand stärker beeinflusst als die der Innenwand. Zur Verdeutlichung der oben genannten Verschiebung der Sherwood-Zahlen auf den unberippten Seitenwänden werden entlang der Hauptströmungsrichtung an jeweils drei Positionen

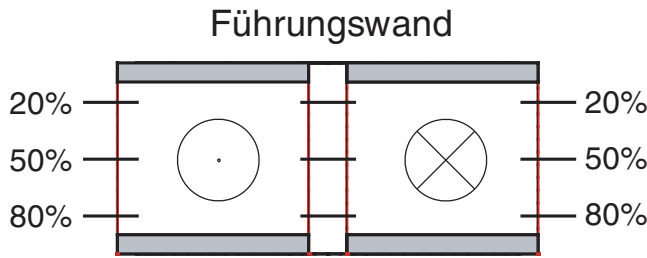
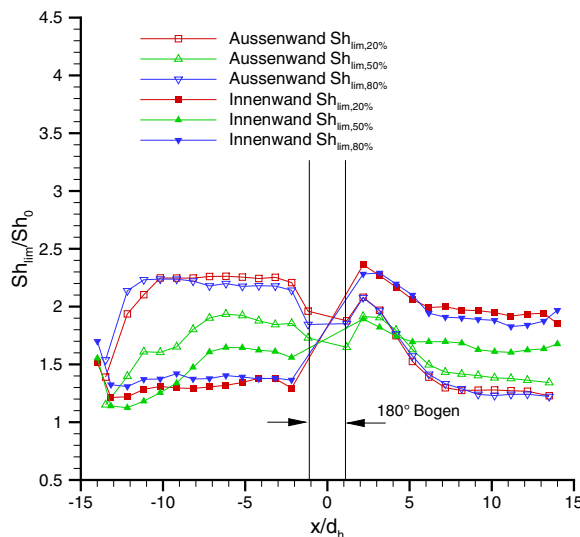


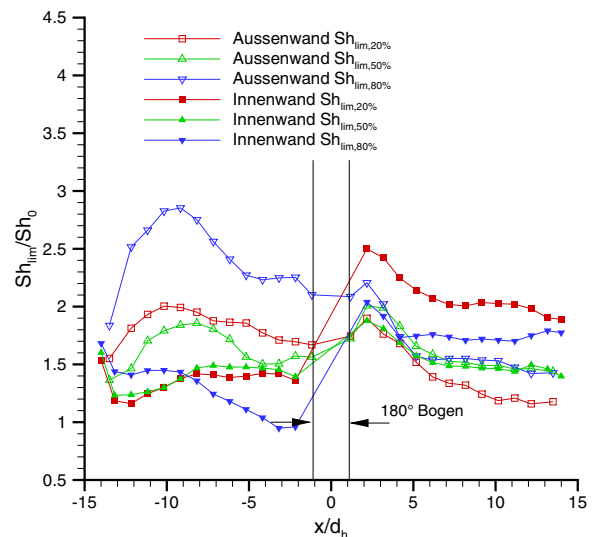
Bild 5.19: Positionen für die Linienmittelung

entsprechend der Abbildung 5.19 liniengemittelte Daten erstellt. In Abbildung 5.20 sind in a) die Ergebnisse für $Ro = 0$ und in b) die für $Ro = 0.2$ gezeigt. Für $Ro = 0$ liegen die 20%- und 80%-Linien nahezu übereinander und auf einem deutlich höheren Niveau als die 50%-Linie. Dies ist durch die Symmetrie der Sekundärströmungen zu begründen, die auf der Innenwand umgekehrte Verhältnisse schaffen. Für den rotierenden

Fall stellt sich eine deutliche Differenz der 20%- zu den 80%-Linien ein. Die größte Differenz beträgt bei $x/d_h = 9$ ca. 29% des Wertes der 20%-Linie. Die gemachten Beobachtungen weisen auf unterschiedliche Effekte der Corioliskraft in den beiden geraden Modellpassagen hin, die oben bereits beschrieben wurden. Offensichtlich ist die das Strömungsfeld betreffende Eintrittsrandbedingung in einem rotierenden berippten Kanal für die Entwicklung der rippeninduzierten Sekundärströmungen von außerordentlicher Be-



(a) $Ro = 0$



(b) $Ro = 0.2$

Bild 5.20: Sh_{lim}/Sh_0 entlang x/d_h , unberippte Wände, Konfiguration 1, $Re = 25000$

deutung. In der radial auswärts gerichteten Passage entwickeln sich die rippeninduzierten Sekundärströmungen in einer rotationsbeeinflussten Kanalströmung. Das Strömungs- und Konzentrationsfeld scheint, wie ja auch die lokalen Sh -Zahlverteilungen zeigen, zweigeteilt zu sein. Ein Bereich befindet sich nahe auf der Aussenwand im ersten Kanal nahe der Führungswand, welcher entlang x/d_h geringere Veränderungen hinsichtlich der Stoffübergangszahlen erfährt. Ein zweiter Bereich liegt nahe der Folgewand, der die für $Ro = 0$ gemachten Beobachtungen in verstärkter Form widerspiegelt. Es handelt sich aber, auf Grund der charakteristischen Konturen der Sh -Zahlen im Rippenzwischenraum, in beiden Bereichen um Rippenhinterkantenwirbel, wie sie für den stationären Fall schon gemessen wurden.

In der radial einwärts gerichteten Passage entwickelt sich ein rippeninduziertes Strömungsfeld von Beginn an unter dem Einfluss der Rotation. Der von der 180° -Umlenkung aufgeprägte radiale Druckgradient und die daraus resultierenden Sekundärströmungen wirken in Richtung der rippeninduzierten Sekundärwirbel. Ab ca. $x/d_h = 7$ ist der Rotationseffekt auf die rippeninduzierten Sekundärströmungen zu erkennen. Die 80%-Linie liegt ca. 12.5% unter dem Niveau der 20%-Linie, die wie für $Ro = 0$, einen Wert von $Sh_{lim}/Sh_0 = 2$ erreicht. Die auf der Außenwand gegenüberliegende 20%-Linie beträgt ca. 59% dieses Wertes, liegt aber auf vergleichbarem Niveau, bezogen auf $Ro = 0$. In [51] ist der Effekt der rippeninduzierten Sekundärströmung unter dem Einfluss der Corioliskraft auf den Stoffübergang der unberippten Wände ebenfalls beschrieben.

Bei gegenüberliegend parallel angeordneten Rippen, wie in Konfiguration 2, ergeben sich unter dem Einfluss von der Corioliskraft sehr ähnliche Effekte, wie sie für Konfiguration 1 festgestellt wurden. Das Bild 5.21 zeigt für $Ro = 0.2$ die gemittelten Sh/Sh_0 -Verläufe für $Re = 25000$. Die Resultate der Außenwand betragen nahezu das 1.5-fache der Innenwanddaten und zeigen, wie die Linien für Folgewand und Innenwand auch, deutlich den

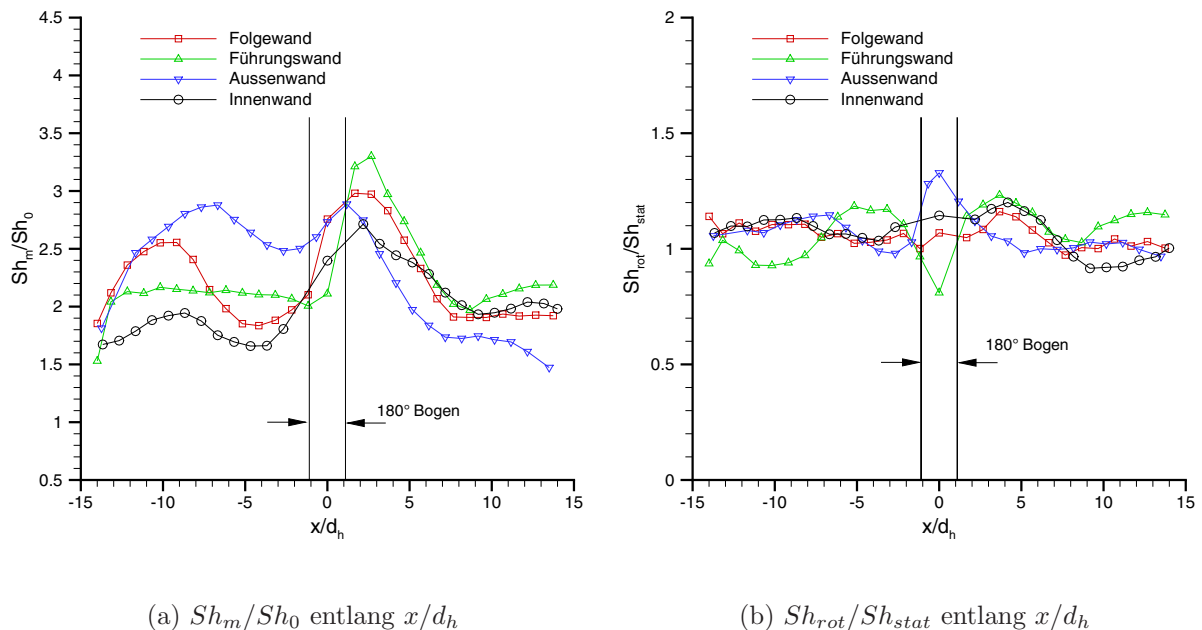


Bild 5.21: Konfiguration 2, $Re = 25000$, $Ro = 0.2$

Einfluss der sich entwickelnden Sekundärströmungen. Die Steigerung des Stoffüberganges an der Außenwand ist hier noch stärker ausgeprägt als in Konfiguration 1. Die Ergebnisse in der zweiten Modellpassage nach dem Krümmer sind in Konfiguration 2 deutlich steiler abfallend und zeigen erst nach $x/d_h = 8$ einen ausgeprägten Einfluss der Corioliskraft in Form einer Spreizung der Daten von Führungswand und Folgewand. Der Rotationseffekt, auch hier wieder dargestellt als Sh_{rot}/Sh_{stat} in Bild 5.21 b), zeigt an den Rippenwänden im ersten Kanal einen größeren Einfluss auf den Stoffübergang, als in Konfiguration 1. Die größere Verblockung des Kanalquerschnittes durch die gegenüberliegenden Rippen bewirkt über die Beschleunigung der Strömung eine Erhöhung der Coriolisbeschleunigung. Dennoch ist auch hier der Einfluss der Rippen dominierend, sodass die Spreizung geringer ausfällt als im glatten Modell.

5.5 Untersuchungen mit Rippen der Konfiguration 3

5.5.1 Die wandnahe Strömung in einem Rippenzwischenraum bei $Ro = 0$

Es soll zunächst wieder ein qualitatives Bild des Strömungsfeldes mit Hilfe eines Ölanstrichversuches vermittelt werden. Die wandnahe Strömung bei den Versuchen mit Konfiguration 3 verursacht für den stationären Fall die in Bild 5.22 dargestellte Verteilung des Ölgemisches. Der Einfluss des Rippenhinterkantenwirbels ist, wie für die Konfiguration 1,

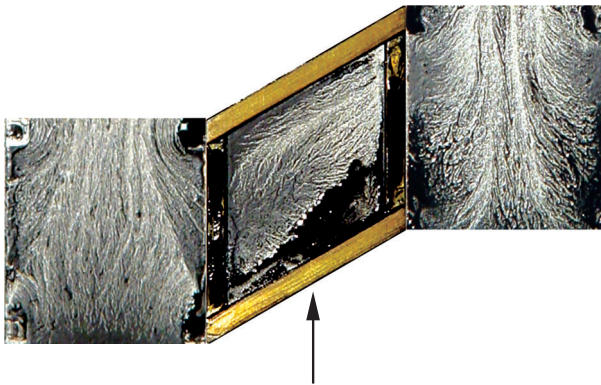


Bild 5.22: Ölanstrichbild, Konfig. 3

auch hier erkennbar. Allerdings ist er offensichtlich etwas weiter von der Rippe entfernt, was zum einen in dem gegenüber der Hauptströmungsrichtung größeren Anstellwinkel, und zum anderen in der parallelen Rippenanordnung begründet ist. Der Wirbel erstreckt sich hier ebenfalls von der stromauf liegenden Ecke des Rippenzwischenraumes zur diagonal stromab liegenden Ecke. Die Messergebnisse von Rau [12] deuten auf eine geringere Wirbelausdehnung hin, als bei 45°-Rippen, was anhand von Bild 5.22 nicht erkennbar ist. Die Ansammlung des Ölgemisches korrespondiert

mit einem Gebiet, in dem nach Rau für den Turbulenzgrad Werte von bis zu 30% gemessen werden, während für 45°-Rippen hier nur 2/3 dieses Wertes zu finden sind. Die parallele Anordnung der Rippen bewirkt eine zu den Seitenwandmittellinien symmetrische Verteilung. An der Abströmseitenwand ist die Strömung im unmittelbaren Bereich der Rippe zur Rippenwand gerichtet, die sich durch die Verblockung des Strömungsquerschnittes durch den Wirbel, weiter stromab wieder zur Seitenwandmitte bewegt. Auf der

Zuströmseitenwand ist ebenfalls die Strömungsrichtung zur Wandmittellinie hin erkennbar, die hier aufgrund der parallelen Rippen keine wellenförmige Bewegung aufweist, wie bei den 45° -Rippen.

5.5.2 Der Einfluss der Rotation auf den lokalen Stoffübergang im Rippenzwischenraum

Das gegenüber den 45° -Rippen unterschiedliche Strömungsfeld verursacht erwartungsgemäß eine veränderte Verteilung der gemessenen Sh -Zahlen. Das abgewinkelte Kanalsegment ist für die unterschiedlichen Ro -Zahlen in Bild 5.23 dargestellt. Aufgrund der veränderten Rippenanordnung ist im 1. Kanal des Modells die Innenwand die Zuströmseitenwand, während die Außenwand die Abströmseitenwand darstellt. In Bild 5.23 a) ist für den stationären Fall im Rippenzwischenraum der berippten Wände ein deutlich größeres Maximum zu erkennen, als für die 45° -Rippen. Das rippennahe Strömungsfeld kann nach Rau [12] modellhaft in zwei Hauptkomponenten zerlegt werden, wie es in Bild 5.24 zu sehen ist. Die Geschwindigkeitskomponente normal zur Rippe U_N ist bei dieser Rippenkonfiguration größer, wodurch der Transport energiereicher Teilchen in den Rippenzwischenraum erleichtert wird und für eine stärkere Stoffübergangserhöhung sorgt. Gleichzeitig ist die parallel zur Rippe verlaufende Strömungskomponente U_T kleiner als bei 45° -Rippen, was eine geringere W -Komponente bewirkt. Die Stoffübergangserhöhung fällt an der Zuströmseitenwand (IW) daher geringer aus, und auch die Abströmseitenwand (AW) zeigt eine geringere Beeinflussung durch die Rippen. Die größere Strömungskomponente normal zur Rippe trägt somit zu einem stärkeren Effekt der Corioliskraft bei. Die beiden Abbildungen 5.23 b) und c) zeigen, dass der Rippenhinterkantenwirbel an der Führungswand (FüW) offensichtlich

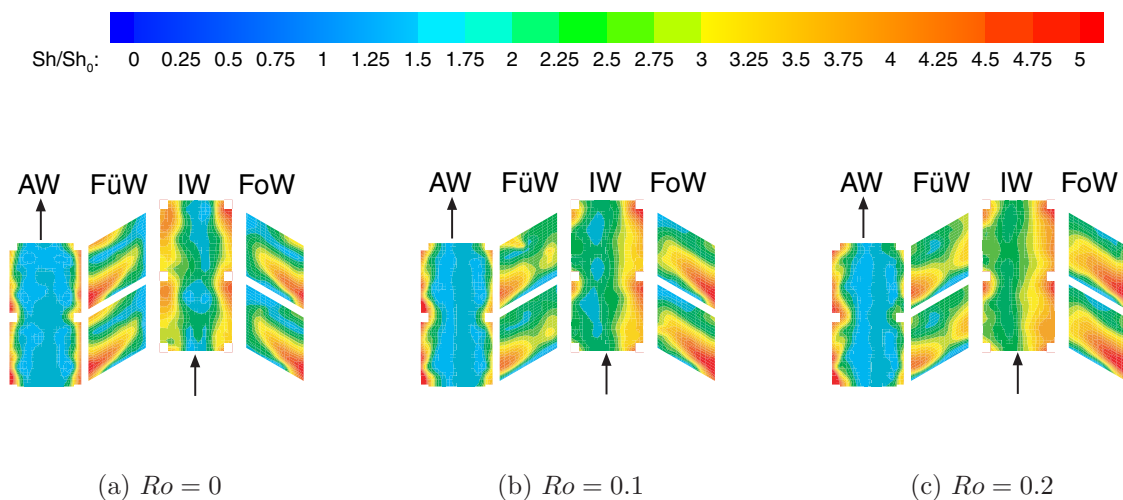


Bild 5.23: Einfluss der Rotation auf die lokale Sh Verteilung im Rippenzwischenraum, Konfiguration 3

lich nicht mehr vollständig existiert. Das für den Fall $Ro = 0$ beschriebene Maximum hinter der Rippe ist aufgeteilt in ein größeres, in der stromauf liegenden Ecke des Rippenzwischenraumes, und ein kleineres in der Mitte des Rippenzwischenraumes an der Innenwand.

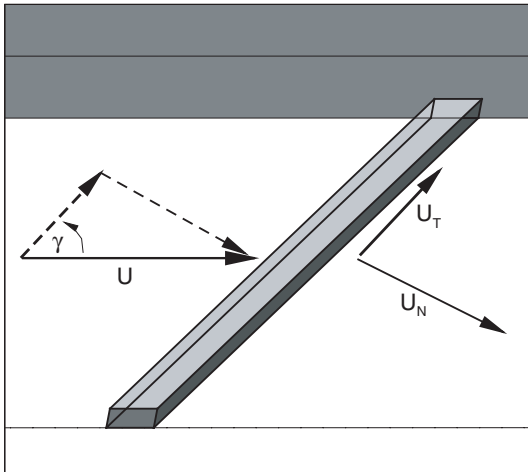


Bild 5.24: Zerlegung von U an der Rippe aus [12]

Das letztgenannte wird mit zunehmender Ro -Zahl größer. Offensichtlich ist hier im Bereich der Wandmitte eine geringere, oder auch entgegengesetzte, V -Komponente für diesen Effekt verantwortlich. Auf der gegenüberliegenden Wand ist mit steigender Rotation eine zunehmende Ausdehnung des wirbelinduzierten Maximums zu erkennen. Auch dies spricht für eine überlagerte Sekundärbewegung durch die Corioliskraft.

Die Zuströmseitenwand zeigt eine deutliche Beeinflussung durch die Verlagerung des Strömungskernes zur Folgewand. Die zur Folgewand benachbarte Wandhälfte zeigt flächig hohe Sh/Sh_0 -Werte von 2.5 - 5, während die an die Führungswand grenzende Innenwandhälfte lokal, unmittelbar vor der stromab liegenden Rippe, ebenfalls hohe Werte aufweist.

Die Ergebnisse liegen auf der Innenwand sonst aber unter $Sh/Sh_0 = 2.75$, obwohl auch hier eine moderate Erhöhung gegenüber $Ro = 0$ sichtbar ist. Sie kann mit dem kleinen Maximum auf der Führungswand in Verbindung gebracht werden. Die Abströmseitenwand zeigt sich von der Ro -Zahl relativ gering beeinflusst.

Die extrahierten Sh/Sh_m -Werte in der Abbildung 5.25 stellen links den Vergleich der stationären Daten mit denen aus Konfiguration 2, und rechts den Rotationseffekt auf das wirbelinduzierte Maximum im Rippenzwischenraum dar. Aufgrund des veränderten Rippenwinkels wurde bei einem z' von 1.15, welches an der Rippe bei $z = 1.1$ liegt, keine Daten extrahiert, da der darzustellende Bereich von x' zum Großteil im nicht stoffübergangsaktiven Bereich auf der Rippenleiste liegt. Die gezeigten Daten wurden daher nur bei 50% und 75% Wandbreite, ausgehend von der stromauf liegenden Ecke des Rippenzwischenraumes, ermittelt. Im Vergleich der beiden Konfigurationen mit parallel gegenüberliegenden Rippen wird der Einfluss des Rippenwinkels deutlich. Mit 45° -Rippen liegt das Sh -Maximum näher an der Rippe und ist lokal stärker begrenzt. Für Konfiguration 3 ist der Rippeneinfluss geringer, wenn man die Sh_m/Sh_0 -Werte betrachtet. Er erstreckt sich aber lokal auf einen größeren Bereich. Entgegen den Beobachtungen des Rotationseffektes bei 45° -Rippen, liegen die Folgewanddaten bei $Ro = 0.2$ nicht über den im stationären System gemessenen Ergebnissen. Auch ist die Differenz zwischen den beiden Wänden kleiner. Eine deutliche Reduktion der Sh/Sh_m -Werte zeigt die Linie von $z' = 0.58$ der Führungswand. Gegenüber dem stationären Fall ist der Rippeneffekt deutlich reduziert, während bei $z' = 0.87$ lediglich eine Verschiebung des Maximums zur Rippe hin erfolgt. Die durch die Corioliskraft verursachte Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit an

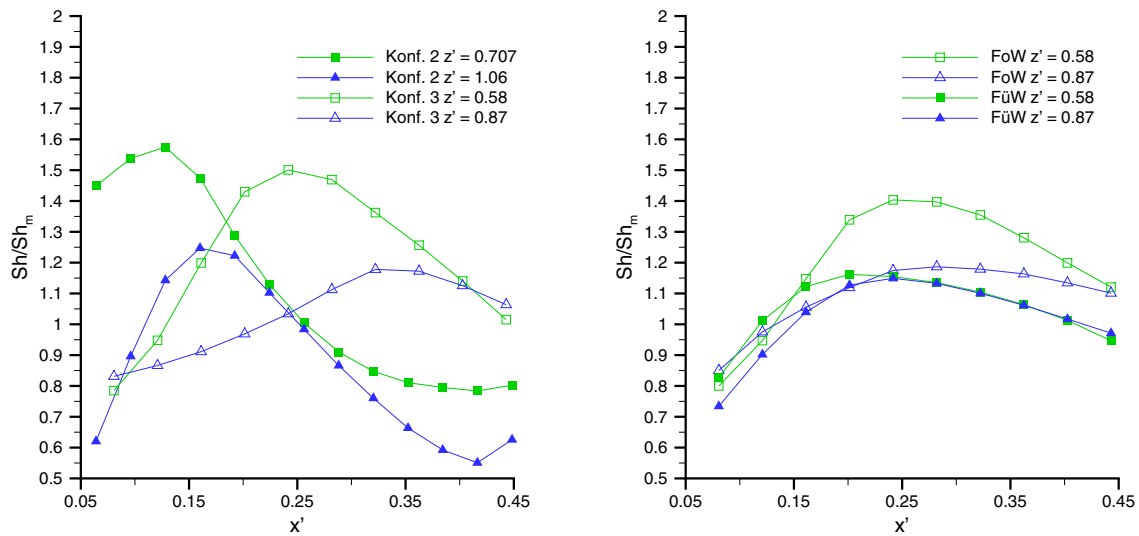
(a) Sh/Sh_m für Konfiguration 2 u. 3, $Ro = 0$ (b) Sh/Sh_m , $Ro = 0.2$

Bild 5.25: Lokale Verhältnisse im Rippenzwischenraum, Konfiguration 3

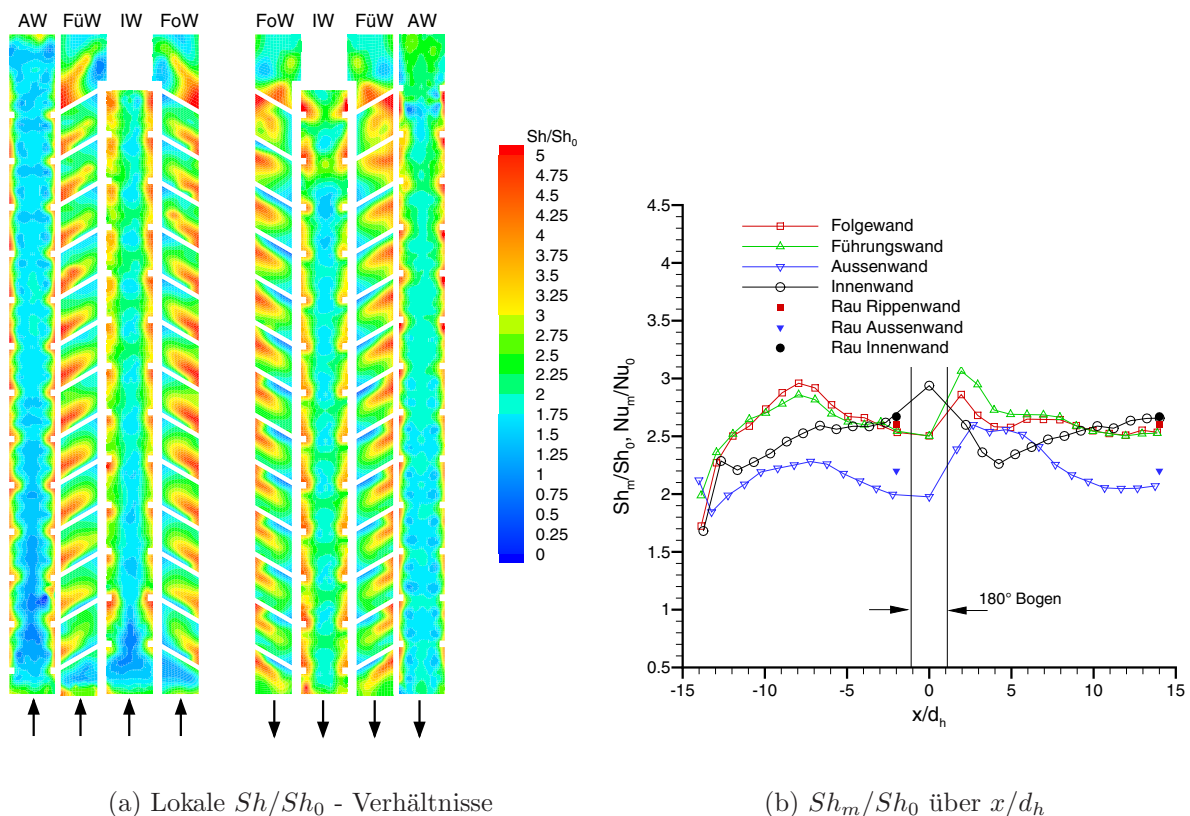
der Führungswand reduziert hier bei 50% Wandbreite den Rippeneffekt und begrenzt ihn auf den Bereich unmittelbar nach der Rippe. Auf der Führungswand ist außerdem die Ausdehnung des Rippeneffektes auf den Stoffübergang unabhängig von der z' -Koordinate, während auf der Folgewand, nahe der Zuströmseitenwand (IW) bei $z' = 0.87$ wieder ein deutlich geringerer Rippeneinfluss zu verzeichnen ist, als in der Kanalmitte. Dieser Effekt ist auch bei den stationären Ergebnissen erkennbar.

5.5.3 Der Stoffübergang im Gesamtmodell bei $Ro = 0$

Die Ergebnisse der 45° -Rippen zeigten bei der Betrachtung des Gesamtmodells im ersten Kanalabschnitt den Einfluss der sich entwickelnden, rippeninduzierten Sekundärströmung auf den Stoffübergang. Für die Konfiguration 3 ist in Abbildung 5.26 a) wieder die Verteilung der lokalen Sh/Sh_0 -Werte und in b) die über dem Rippensegment gemittelten Daten dargestellt. Die lokale Darstellung der Ergebnisse zeigt auf den unberippten Seitenwänden (AW und IW) zur Wandmittenachse symmetrische Verteilungen, was aus den gegenüber parallel angeordneten Rippen resultiert. Im Bereich vor dem Krümmer werden auf der Zuströmseitenwand (IW) zwischen den Rippen die höchsten Werte erreicht, was wieder durch den Aufprall der Sekundärströmung verursacht wird. Die Maxima in den Rippenzwischenräumen auf der Führungs- und Folgewand wachsen vom Modelleintritt bis ca. halber Kanallänge an, um dann, wenn der Wert des Gradienten $\frac{\partial c}{\partial y}$ an der Wand geringer wird und die Sekundärströmung recht weit entwickelt ist, wieder abzufallen. Auffällig ist der Einfluss des letzten Rippenpaares in Kombination mit der 180° -Umlenkung. Die rippeninduzierten Sekundärströmungen sind zur krümmerinduzierten Sekundärbewegung

gleichgerichtet, wodurch der relative Effekt der 180°-Umlenkung geringer ausfällt, als für die Konfigurationen 1 und 2. Das Maximum hinter dem letzten Rippenpaar wird in den Bereich der Umlenkung hineingezogen. Die Rippenhinterkantenwirbel agieren hier mit der Beschleunigung der Strömung im Innenbereich der Umlenkung, siehe hierzu auch Bild 2.2 a) in Kapitel 2.1.1. Auf der Außenwand ist der stoffübergangsreduzierende Einfluss des Eckwirbels zu erkennen, wo Sh/Sh_0 -Werte kleiner 1 erreicht werden.

Im Krümmerbereich des zweiten Kanals befinden sich auf der Außenwand zwei kleinere Maxima, die vermutlich durch das Auftreffen der umgelenkten Rippenhinterkantenwirbel hervorgerufen werden. Unmittelbar nach der 180°-Umlenkung werden durch die Interaktion von Rippenhinterkantenwirbel, Ablöseblase und krümm器induzierter Sekundärströmung auf den Rippenwänden die höchsten Werte erreicht. Sie liegen hier bei $Sh/Sh_0 > 5$. Zum Modellaustritt hin nimmt der Krümmereffekt ab, und die Sekundärströmungen der Rippen bestimmen wieder die Verteilungen. Anhand der flächengemittelten Ergebnisse in 5.26 b) kann man erkennen, dass das Maximum auf den Rippenwänden im ersten Kanal erst bei ca. $x/d_h = 6.5$ liegt, während es für Konfiguration 2 schon bei $x/d_h = 4$ erreicht wird. Das Absinken der Werte auf ein Niveau von $Sh/Sh_0 = 2.6$ nach diesem Maximum erfolgt mit einem geringeren Gradienten als in Konfiguration 2. Das Niveau der Zuströmseitenwände (AW in Konfiguration 2 und IW in Konfiguration 3), relativ zu den Rippenwänden betrachtet, ist bei den beiden Konfigurationen deutlich verschieden. Ent-

(a) Lokale Sh/Sh_0 - Verhältnisse(b) Sh_m/Sh_0 über x/d_h Bild 5.26: Wärme-/Stoffübergangsverhältnisse, Konfiguration 3, $Re = 25000$, $Ro = 0$

sprechend der größeren Querkomponente (W-Komponente) der Strömung bei 45°-Rippen ist die Beeinflussung der Stoffübergangsvorgänge auf den Seitenwänden in Konfiguration 2 größer. Die Zuführung energiereicher Fluidteilchen in den Rippenhinterkantenwirbel ist bei den 120°-Rippen besser und die Querkomponente geringer.

Auffällig ist der Verlauf der Innenwanddaten, der nach dem Krümmer zunächst, mit nachlassendem Einfluss der Umlenkung, um ca. 15% abfällt, um nach $3d_h$ Lauflänge, mit der Ausbildung der Sekundärströmung, wieder auf das Niveau des Vorkrümmersbereiches anzusteigen. Rau [12] hat anhand von asymmetrisch berippten Kanälen gezeigt, dass bei 120°-Rippen der Turbulenzgrad in der freien Scherschicht hinter der Rippe um bis zu 50% höher ist als für 45°-Rippen. Dies ist ein weiterer Grund für das gegenüber den anderen Konfigurationen hohe Niveau der Stoffübergangszahlen, das auch auf den Abströmseitenwänden (AW) erreicht wird. Die gezeigten Ergebnisse von Rau, gemessen an einem geraden quadratischen Kanal nach ca. $15d_h$ Lauflänge, stimmen für die Rippen- und Zuströmwand gut überein, lediglich die Außenwanddaten liegen 10% über den gemessenen Sh-Zahlen.

5.5.4 Der Stoffübergang im Gesamtmodell bei $Ro \neq 0$

Die Ergebnisse für den Fall mit Rotation sind, wieder für die größte Ro -Zahl, in Bild 5.27 dargestellt. Es fallen auch hier die Sh -Verteilungen auf den Saugseiten des Modells mit den geteilten Maxima auf. Ab dem vierten Rippenzwischenraum des ersten Kanals stellt sich diese Kontour ein, die entlang x/d_h bis zum Krümmer unverändert bleibt. Der anhand der Folgewanddaten erkennbare Einfluss der sich entwickelnden, rippeninduzierten Sekundärströmung ist hier nicht zu sehen. Ähnlich stellen sich die Verhältnisse auf den beiden Rippenwänden im zweiten Kanalabschnitt dar. Durch den verstärkten Rippeneinfluss bei Rotation kommt es an der Innenwand zu einer deutlichen Stoffübergangserhöhung in dem Bereich, der an die Druckseite des Kanalabschnittes grenzt. Der letzte Rippenhinterkantenwirbel der Folgewand des ersten Kanals ist deutlich ausgeprägter, als für den stationären Fall und bewirkt auf der Außenwand im Krümmersbereich des zweiten Kanals eine Erhöhung der Sh/Sh_0 -Werte. Die Stoffübergangserhöhung durch den Krümmer ist besonders auf der Innenwand sehr ausgeprägt. Die für den stationären Fall ermittelte Symmetrie ist aufgehoben. Die beiden Abströmseitenwände sind, wie anhand von Bild 5.25 gezeigt, nahezu unbeeinflusst von der Rotation.

Der für die 45°-Rippen beobachtete invertierte Rotationseffekt im ersten Kanal existiert bei 120°-Rippen nicht. In Bild 5.27 b) liegen die flächengemittelten Führungswanddaten im Bereich $x/d_h < -1.1$ deutlich unterhalb der Ergebnisse der Folgewand. Diese zeigt auch deutlich den Einfluss der sich entwickelnden, rippeninduzierten Sekundärströmung, während die Führungswanddaten nahezu konstant sind. Der Krümmereffekt ist in den Ergebnissen mit $Ro = 0.2$ stärker ausgeprägt als für den stationären Fall. Die Werte erreichen hier aber das gleiche Niveau wie bei Konfiguration 2. Weiter stromab stellt sich, wie in den beiden anderen getesteten Konfigurationen auch, die Spreizung der Ergebnisse

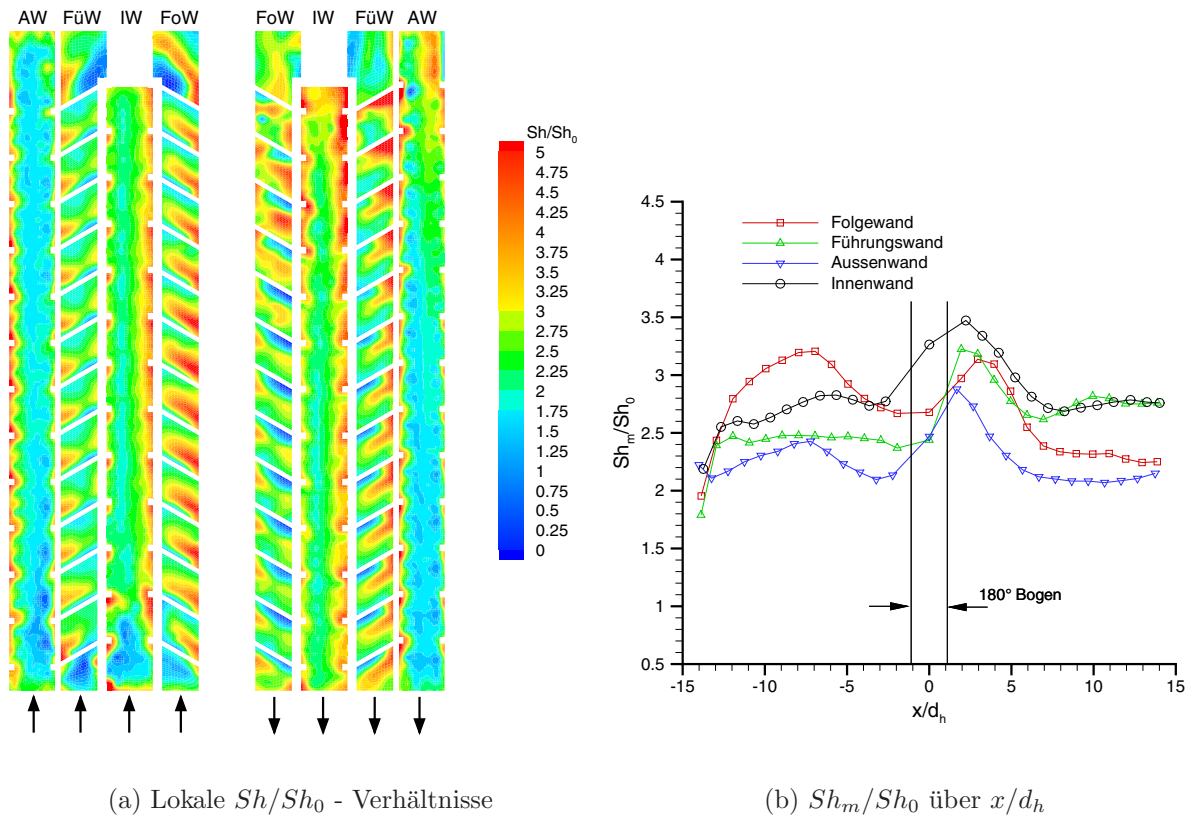


Bild 5.27: Wärme-/Stoffübergangsverhältnisse, Konfiguration 3, $Re = 25000$, $Ro = 0.2$

der Druck- und Saugseite ein, die ca. $\pm 11\%$ des Wertes bei $Ro = 0$ beträgt. Der Rotationseffekt wird in der Abbildung 5.28 wieder deutlich, indem die Ergebnisse aus einem Rotationsversuch auf die stationären Werte bezogen werden. Die Daten auf Folge- und Führungswand zeigen, bis auf einen Bereich von ca. $4 d_h$ nach dem Krümmer, eine Spreizung. Die Bereiche auf den Druckseiten haben, wie auch für Konfiguration 0, gegenüber den Saugseiten höhere Stoffübergangszahlen. Für höhere Ro -Zahlen treten insgesamt höhere Sherwood-Zahlen auf. Gleichzeitig nimmt die Spreizung der Folge- und Führungswanddaten zu. Für $Ro = 0.2$ erreichen die Werte der Zuströmseitenwand (IW) das Niveau der Druckseite, während die Saugseite unterhalb der Abströmseitenwand liegt. Der Effekt des Rippenhinterkantenwirbels auf den Stoffübergang kann auch hier, wie bei den Konfigurationen 1 und 2, die Verringerung des Stoffüberganges durch Rotation auf der Führungswand gegenüber den unberippten Seitenwänden nicht kompensieren. Das bedeutet, dass das durch die Rippe beeinflusste Stoffübergangsverhalten an den Seitenwänden geringer durch die Corioliskraft verändert wird, als auf der berippten Führungswand.

Die Mittelung der Seitenwanddaten entsprechend der Abbildung 5.19 zeigt in Bild 5.29, sowohl für den stationären, als auch für den rotierenden Fall den Einfluss der rippen- und rotationsinduzierten Sekundärbewegung auf den Stoffübergang der unberippten Wände. Die 20%- und 80%-Linien verlaufen eine Rippenhöhe oberhalb der Rippen und zeigen in der Abbildung 5.29 a) für $x/d_h < -1.1$ deutlich den Effekt des sich entwickelnden Strömungsfeldes. Während auf der Zuströmseitenwand (IW) die ansteigende V-Komponente

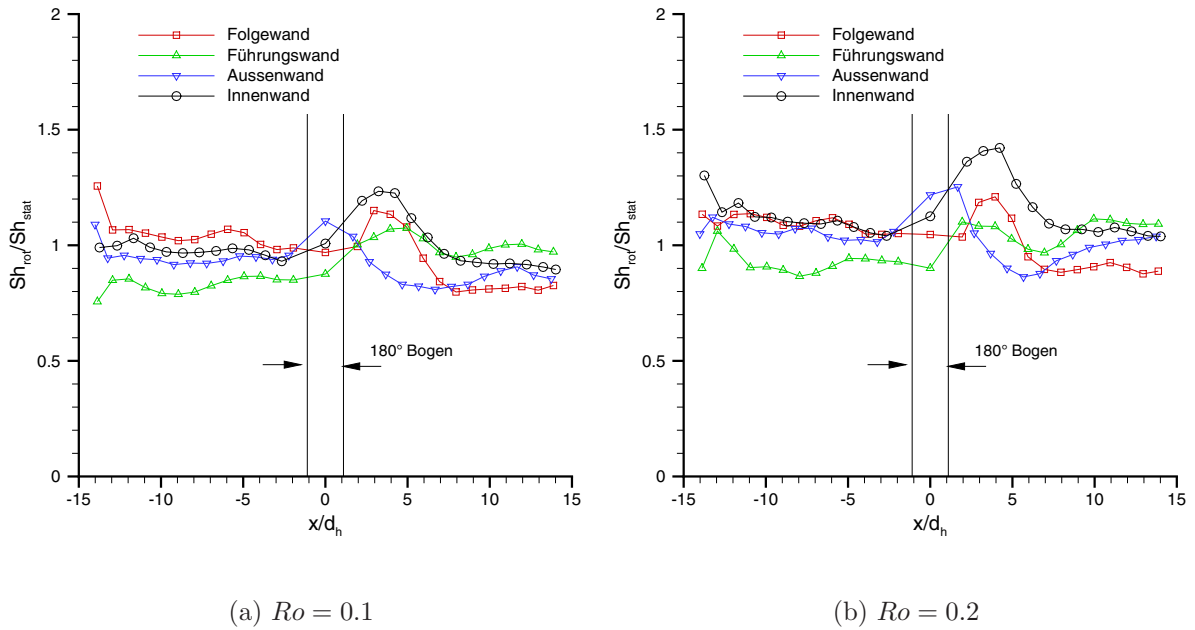


Bild 5.28: Sh_{rot}/Sh_{stat} entlang x/d_h , Konfiguration 3, $Re = 25000$, $Ro \neq 0$

für einen nahezu monotonen Anstieg der Sh -Zahlen führt, ist auf der Abströmseitenwand (AW) nur bis ca. $x/d_h = -9$ ein Anstieg zu verzeichnen. Mit fortschreitender Ausbildung der Sekundärwirbel sinken hier die Werte bis zum Krümmereintritt auf das Niveau der 50%-Linie. Auf der Innenwand liegt die 50%-Linie ca. 40% unter den Werten der beiden Randlinien. Für den zweiten Kanalabschnitt sind die Verhältnisse entsprechend denen des ersten Bereiches. Die Abströmseitenwand zeigt wieder den Einfluss der sich durch die Rippen

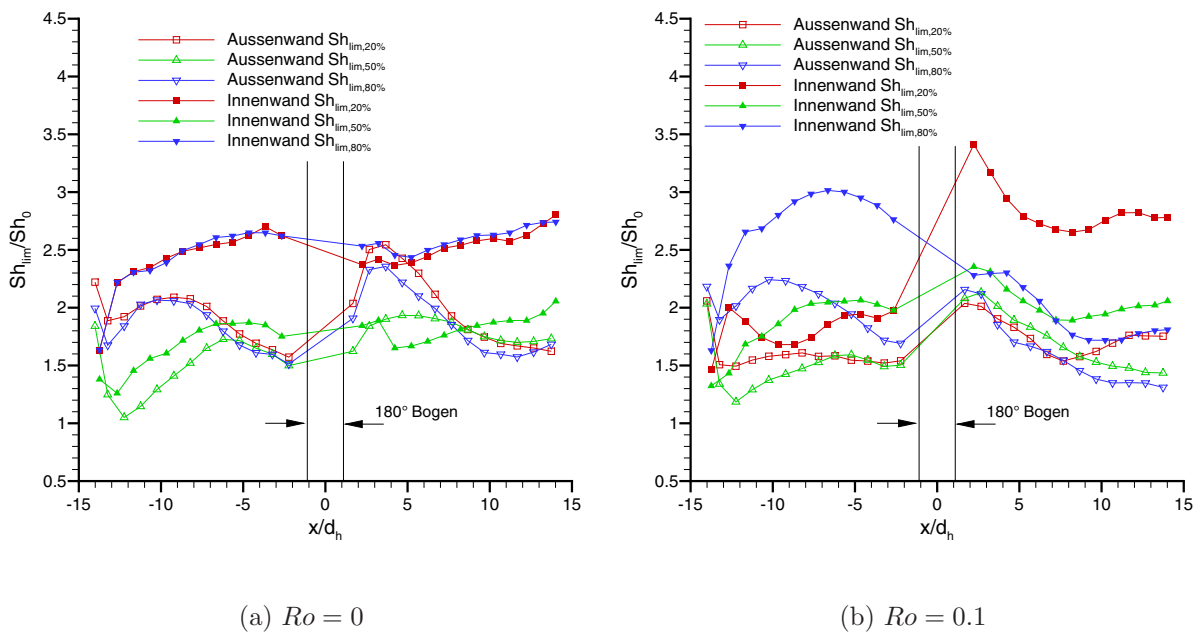


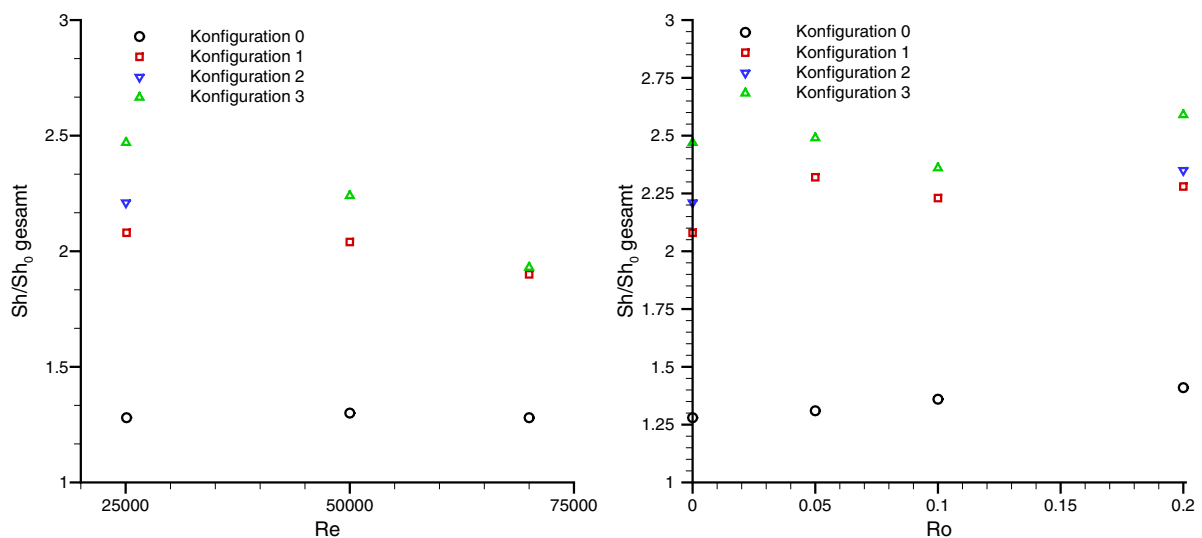
Bild 5.29: Sh_{lim}/Sh_0 entlang x/d_h , ungerippte Wände, Konfiguration 3, $Re = 25000$

pen ausbildenden Strömung, wohingegen die Zuströmseitenwand konstante Verhältnisse der einzelnen Linien zueinander aufweist.

Der Einfluss der Rotation auf die Seitenwände ist exemplarisch mit Ergebnissen aus einem Versuch mit $Re = 25000$ und $Ro = 0.1$ in Bild 5.29 b) dargestellt. Die Daten der Randlinien nahe der druckseitigen Rippenwand sind, verglichen mit $Ro = 0$, deutlich gestiegen, unabhängig davon, ob es sich um die Zu- oder Abströmseitenwände handelt. Die 50%-Linien und die verbleibenden Randlinien nähern sich bzgl. ihres Niveaus im nahezu vollentwickelten Strömungsbereich an. Gegenüber den Ergebnissen mit Konfiguration 1 ist mit 120° -Rippen ein deutlich größerer Rotationseffekt auf den Seitenwänden messbar.

5.6 Der Einfluss von Rippen und Rotation auf den globalen Stoffübergang

Die untersuchten Konfigurationen können anhand der erarbeiteten Datenbasis vergleichend betrachtet werden. In Bild 5.30 a) ist der Einfluss der Reynolds-Zahl auf die, über der gesamten Modelloberfläche gemittelte, Stoffübergangserhöhung Sh/Sh_0 *gesamt* bei $Ro = 0$ dargestellt. Die Abbildung 5.30 b) zeigt bei $Re = 25000$ den Effekt der Rotations-Zahl. Die Erhöhung der Sh-Zahl gegenüber Sh_0 nimmt, wie bereits in Kapitel 5.4.3 beschrieben, mit zunehmender Reynolds-Zahl ab. Zu den dort gemachten Aussagen, die Anhand der geraden Kanalabschnitte gewonnen wurden, ist hinzuzufügen, dass die stoffübergangssteigernde Wirkung des Krümmers mit steigender Re-Zahl ebenfalls abnimmt. Für Konfiguration 3 ist die Abnahme von Sh/Sh_0 *gesamt* mit ca. 20% am größten, wäh-



(a) Sh/Sh_0 *gesamt* über Re , $Ro = 0$

(b) Sh/Sh_0 *gesamt* über Ro , $Re = 25000$

Bild 5.30: Einfluss von Re und Ro auf den Gesamtstoffübergang

rend bei Konfiguration 1 nur eine Abnahme von ca. 8.6% gemessen wird. Der Rippen- einfluss auf den Stoffübergang ist in Konfiguration 3 absolut betrachtet am größten und damit die Reynoldszahlenabhängigkeit am geringsten. Durch das Beziehen auf Sh_0 entsteht der monoton fallende Verlauf der Daten.

Anhand der Ergebnisse von Konfiguration 0 ist gegenüber Sh_0 kein Einfluss der Re-Zahl erkennbar. Die in Kapitel 5.3.1 gefundene Abhängigkeit, die größer ist als in Sh_0 , steht dem mit steigender Re-Zahl abnehmendem Einfluss des Krümmers gegenüber. Es ergibt sich daher im betrachteten Re-Zahlenbereich ein nahezu konstanter Wert von ca. 1.28.

Die Abbildung 5.30 b) macht für den Gesamtstoffübergang die Erkenntnisse aus den Kapiteln 5.4.4 und 5.5.4 nochmals deutlich. Während für Konfiguration 3 sowohl stoff- übergangssteigernde als auch stoffübergangsmindernde Auswirkungen von Ro festgestellt wurden, lagen die flächengemittelten Daten der vier Modellwände bei Konfiguration 1 für nahezu alle x/d_h über $Sh_{rot}/Sh_{stat} = 1$. Für gerade glatte Kanäle mit rundem Querschnitt hat Berg [19] keine Steigerung des Stoffüberganges durch Rotation festgestellt. Die in dieser Arbeit beobachtete Stoffübergangssteigerung ist, entsprechend Kapitel 5.3.2, auf die Erhöhung der Innen- und Außenwanddaten zurückzuführen, die durch die rotationsindu- zierte Sekundärströmung hervorgerufen wird.

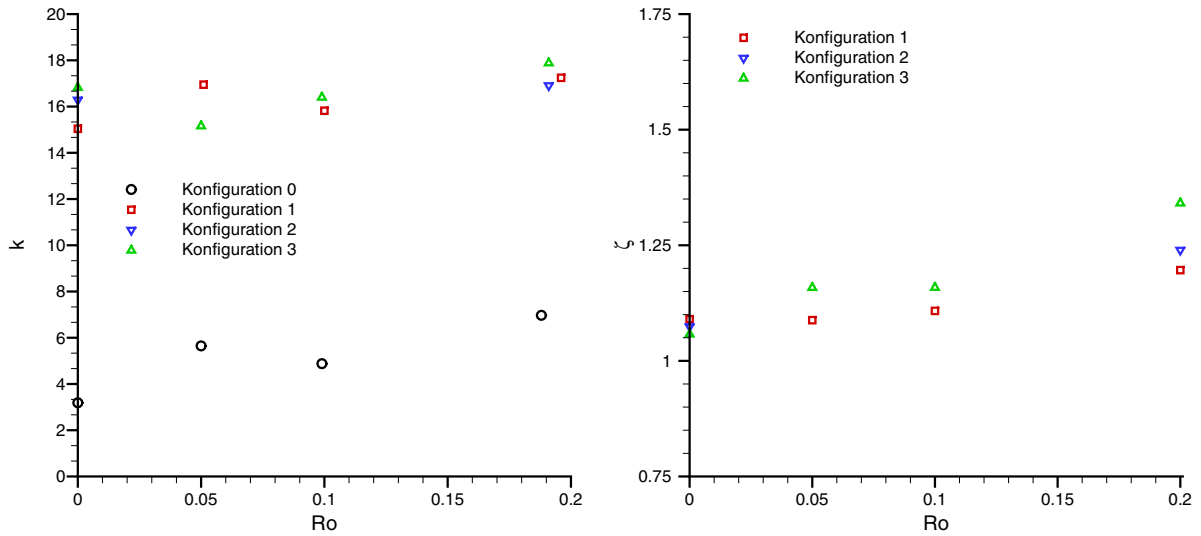
Die Auslegung von Kühlkanalsystemen stellt bei der Verwendung von Turbulatoren immer einen Kompromiss zwischen der erreichbaren Wärmeübergangserhöhung und des dadurch induzierten Druckverlustes dar. In der Literatur wird daher oftmals für gerade Kanalseg- mente ein thermo-hydraulischer Nutzungsgrad ζ_{th} verwendet, der die Wärmeübergangser- höhung zur Druckverlustserhöhung in Beziehung setzt. Aufgrund des verwendeten Messver- fahrens und der Tatsache, dass innerhalb dieser Arbeit ein komplettes Modell untersucht wird, soll ein analoger Wert ζ entsprechend Gleichung 5.2 eingeführt werden.

$$\zeta = \frac{Sh_{rip}/Sh_{glatt}}{(k_{rip}/k_{glatt})^{1/3}} \quad (5.2)$$

Der darin enthaltene Druckverlustbeiwert k des statischen Druckes im Gesamtmodell, berechnet sich nach Gleichung 5.3 und enthält somit den dominierenden Einfluss des Krümmers.

$$k = \frac{(p_{st,ein} - p_{st,aus})}{1/2\rho u_b^2} \quad (5.3)$$

Der Exponent 1/3 im Nenner von Gleichung 5.2 gibt bei der Wärmeübertragung den Zusammenhang wieder, dass bei konstantem ausgetauschten Wärmestrom eine Erhöhung des Wärmeüberganges eine Reduktion des Massenstromes ermöglicht, der mit der dritten Potenz die erforderliche Pumpleistung reduziert. Bei den isothermen Stoffübergangsun- tersuchungen innerhalb dieser Arbeit existiert dieser Effekt nicht. Dennoch soll zur Ver- gleichbarkeit und aus Gründen der Analogie, die erreichte Stoffübergangserhöhung zur dazu erforderlichen Druckverluststeigerung mit ζ dargestellt werden. Der Druckverlust- beiwert k ist in der Abbildung 5.31 über der Ro -Zahl für die verschiedenen Konfigu- rationen aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass k tendenziell mit Ro ansteigt. Liou et

(a) k als Funktion von Ro , $Re = 25000$ (b) ζ als Funktion von Ro , $Re = 25000$ Bild 5.31: Rotationseinfluss auf k und ζ

al. [33] haben gezeigt, dass durch den corioliskraftinduzierten Druckgradienten im Kanalquerschnitt, die Wandreibung an der Druckseite des Kanals stärker ansteigt, als sie gegenüber dem stationären Fall an der Saugseite abgesenkt wird. Die Distanz der Werte der Rippenkonfigurationen zu den Werten von Konfiguration 0 und die Unterschiede zwischen den Rippenkonfigurationen zeigen den Einfluss des Formwiderstandes der Rippen. Er verursacht das bis zu 4.5-fache der Werte mit Konfiguration 0. Betrachtet man die Rippenkonfigurationen isoliert, so zeigt sich, dass mit geringerem Rippenanstellwinkel zur Hauptströmungsrichtung der Formwiderstand, und damit der Druckverlust, abnimmt. Der Druckverlustbeiwert von Konfiguration 3 liegt oberhalb des Wertes von Konfiguration 1. Diese Feststellung ist in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Rau [12], der detaillierter den Druckverlust im berippten Kanal untersucht hat.

Entsprechend der dargestellten Daten für Sh/Sh_0 *gesamt* und k in Abhängigkeit der Rotationszahl, lässt sich ζ berechnen. In Bild 5.31 b) ist für $Re = 25000$ für die Rippenkonfigurationen ζ dargestellt. Aufgrund der Tendenz der Stoffübergangsdaten und des geringeren Einflusses von k ist auch hier ein Anstieg von ζ mit zunehmender Rotation zu verzeichnen. Während für den stationären Fall eine Nutzungsgradsteigerung gegenüber dem glatten Modell ($\zeta = 1$) von ca. 15% erreicht wird, liegt sie bei $Ro = 0.2$ für Konfiguration 3 bei ca. 30%.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Innenkühlung der Schaufeln ist ein wesentliches Merkmal der Kühlung von thermisch hochbelasteten Turbinenstufen. Durch mäanderartig angeordnete Kanäle wird dabei Zapfluft aus dem Verdichter durch das Schaufelinnere geführt. Rippen und 180°-Krümmer, sowie zusätzliche Volumenkräfte durch Rotation, beeinflussen das Strömungs- und Temperaturfeld im Schaufelinnern und erfordern für die Auslegung derartiger Kühlkanäle genaue Kenntnisse über die herrschenden Verhältnisse.

Ziel dieser Arbeit war es, Erkenntnisse über das Wärme-/Stoffübergangsverhalten eines mit Rippen versehenen Kühlkanals unter dem Einfluss der Corioliskraft zu erhalten. Der Effekt von rippeninduzierten Sekundärströmungen auf den Wärme-/Stoffübergang in einem rotierenden, zweikanaligen Kühlkanalmodell wurde ohne die Wirkung von Auftriebskräften experimentell untersucht. Das Hauptaugenmerk lag dabei zum einen auf den lokalen Stoffübergangsverteilungen im Bereich einer Rippenteilung und zum anderen auf den flächengemittelten Werten aller vier Kanalwände der beiden geraden Kanalabschnitte. Die erarbeitete Datenbasis vermittelt grundlegende Erkenntnisse zum Wärme-/Stoffübergang in derartigen Systemen und kann zur Validierung numerischer Berechnungsmethoden verwendet werden. Innerhalb der Untersuchungen wurden, neben der Rippenkonfiguration, die Reynolds-Zahl und die Rotations-Zahl variiert.

Verwendet wurde die Naphthalin-Sublimationstechnik, die im rotierenden, berippten Kanal örtlich hochaufgelöste Messungen erlaubt. Als bestimmende Größe für Übertragungsprozesse wurde die dimensionslose Stoffübergangszahl, die Sherwood-Zahl, bestimmt. Aufgrund des geringen Dichtegradienten im Fluid, konnten Effekte durch die Corioliskraft isoliert betrachtet werden. Zur Übertragung der Ergebnisse auf den Wärmeübergang wurde die Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang herangezogen.

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse bezüglich des örtlichen Stoffüberganges im Bereich einer Rippenteilung genannt werden:

- Am stationären Modell mit 45°-Rippen lässt sich, im Zusammenhang mit Strömungsfeldmessungen aus der Literatur, feststellen, dass das rippeninduzierte Stoffübergangsmaximum auf der berippten Wand zwischen dem Zentrum des Rippenhinterkantenwirbels ($V=0$) und dem Ort maximaler wandnormaler Geschwindigkeit liegt, da hier die turbulenten Fluktuationen am höchsten sind.
- Der Rippeneinfluss auf den Bereich einer Teilung ist bei 45°-Rippen eher lokal begrenzt, gegenüber den 120°-Rippen. Außerdem liegt das Stoffübergangsmaximum ca. eine Rippenhöhe näher an der Rippe. Dies ist auf den stärkeren Rippenhinterkantenwirbel bei 120°-Rippen zurückzuführen, der mehr Fluidteilchen zur Rippenwand führt, wodurch das Stoffübergangsmaximum, hervorgerufen durch hohe turbulente Fluktuationen, größer wird, während bei 45°-Rippen die Sekundärbewegung stärker ausgeprägt und der Turbulenzgrad geringer ist.

- Die gegenüberliegende parallele Anordnung bei 45°-Rippen führt zu stärkeren Gradienten auf der berippten Wand, als bei gegenüberliegend versetzter Anordnung, da über die größere Verblockung eine höhere Geschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung erzeugt wird, wodurch lokal der Einfluss der Rippe auf den Stoffübergang um bis zu ca. 10% verstärkt wird. Die Lage der Maxima ist bei beiden Anordnungen nahezu gleich.
- Unter dem Einfluss der Corioliskraft steigt die Wirkung des Rippenhinterkantenwirbels auf den Stoffübergang im ersten Kanal auf der Folgewand, während er auf der Führungswand abnimmt. Die Verlagerung der Kernströmung zur nacheilenden Rippenwand und die damit verbundene höhere Geschwindigkeit an den Folgewandrippen verstärkt dort den lokalen Einfluss der Turbulatoren.
- Bei Rotation weisen die beiden unberippten Seitenwände des ersten Kanalabschnittes für alle untersuchten Konfigurationen nahezu halbierte Verteilungen der lokalen Sh -Zahlen auf. Der im vorangegangenen Punkt erwähnte unterschiedliche Rippeneffekt auf den berippten Wänden erhöht den Stoffübergang auf der Zuströmseitenwand im zur Folgewand angrenzenden Bereich. Analog ist der Effekt auf den anderen Seitenwandbereichen.
- Das rippeninduzierte Stoffübergangsmaximum auf der Folgewand des ersten Kanals wird bei 120°-Rippen und zunehmender Rotationszahl in zwei kleinere Maxima geteilt. Die große Beschleunigung des Fluids über der Rippe, die bei dieser Konfiguration am größten ist, bewirkt eine größere Corioliskraft, die mit der radially auswärts gerichteten Strömungskomponente ansteigt. Offensichtlich stellt sich dadurch eine stärkere rotationsinduzierte Sekundärbewegung ein, die das Stoffübergangsmaximum teilt.

Betrachtet man das Gesamtmodell, also die flächengemittelten Stoffübergangsdaten unter dem Einfluss der variierten Parameter, so lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Eintrittsrandbedingung des Strömungsfeldes in einen rotierenden, berippten Kanal scheint von außerordentlicher Bedeutung für das sich entwickelnde, rippeninduzierte Geschwindigkeits- und Konzentrationsfeld zu sein. Die unterschiedlichen Verhältnisse in den beiden geraden Kanalabschnitten mit 45°-Rippen weisen darauf hin und führen im ersten Kanalabschnitt vor dem Krümmereintritt zu einem "invertierten" Rotationseffekt.
- Die rippeninduzierten Sekundärströmungen verursachen durch betragsmäßig hohe W -Komponenten im Bereich zwischen den 45°-Rippen auf der Zuströmseitenwand die höchsten Stoffübergangsergebnisse. Unter dem Einfluss der Corioliskraft beschränkt sich dieser Effekt nur auf die Zuströmseitenwandbereiche, die an die Druckseite grenzen.

- Weisen die rippeninduzierten Sekundärströmungen des ersten Kanals in die selbe Richtung wie die krümmerinduzierten Sekundärbewegungen, so ist der wärmeübergangssteigernde Effekt des Krümmers deutlich reduziert.
- Mit zunehmender Rotation steigt der Gesamtwärmeübergang im Modell durch den zunehmenden Turbulenzgrad tendenziell an.
- Aufgrund des geringeren Einflusses des Druckverlustes auf den Nutzungsgrad, nimmt dieser somit auch mit der Rotation zu, und zeigt für die 120°-Rippen die günstigsten Werte.

In Bezug auf die Auslegung von Innenkühlkanälen bleibt damit festzuhalten, dass die Eintrittsrandbedingungen, der Rippenwinkel und die Wahl der zu berippenden Wand entscheidend für eine optimale Kühlwirkung sind. Der Einfluss der Rotation kann lokal zu hohen Gradienten in der Wandtemperatur führen. Global ist der Corioliskrafteffekt, verglichen mit dem glatten Modell, moderat.

Zu den Ursachen der im Rahmen dieser Arbeit festgestellten Effekte können in vielen Fällen nur Vermutungen angestellt werden. Für fundierte Aussagen ist die genaue Kenntnis des Strömungsfeldes erforderlich. In der Literatur gibt es für angestellte Rippen in rotierenden Kanälen keine Angaben. Untersuchungen auf diesem Gebiet sind daher notwendig und sollten mit modernen Lasermesstechniken (PIV, LDA o.ä.) am rotierenden, berippten Kanal durchgeführt werden, um Aussagen über die Hauptströmungskomponenten aber auch über die Turbulenzstruktur zu erhalten.

Weitere Wärmeübergangsuntersuchungen sind ebenfalls als fortführende und ergänzende Arbeiten zu empfehlen. Ein Hauptaugenmerk sollte dabei, in Verbindung mit den genannten Strömungsfeldmessungen, auf dem "invertierten" Rotationseffekt bei 45°-Rippen liegen. Wichtig ist dabei auch der Einfluss der Fliehkräfte, die in realen Kühlkanälen nicht zu vernachlässigen sind. Desweiteren sollte die Struktur des Rippenhinterkantenwirbels, insbesondere bei 120°-Rippen, unter dem Einfluss der Corioliskraft untersucht werden.

Bei der Verwendung der mit dieser Arbeit verfügbaren Daten ist immer zu berücksichtigen, dass als alleiniger Rotationseinfluss der Effekt der Corioliskraft auf das Strömungs- und Temperaturfeld betrachtet wurde, was die Validierung numerischer Berechnungsmethoden vereinfachen dürfte. Für die Auslegung von Innenkühlkanälen darf die Fliehkraft jedoch nicht unterschätzt werden.

Literatur

- [1] ICAO: *Annual Report of the Council*. International Civil Aviation Organization, 2001.
- [2] HENNECKE D. K.: *Turbine Blade Cooling in Aero Engines*. Von Karman Institute for Fluid Dynamics, 1982.
- [3] HENRICH E.: *Kühlung von hochbelasteten Gasturbinenschaufeln*. MTU Focus, Seiten 27 – 32, 1996.
- [4] LIU T.-M., TZENG Y.-Y., CHEN C.-C.: *Fluid Flow in a 180 Deg Sharp Turning Duct With Different Divider Thicknesses*. ASME J. of Turbomachinery, 121:569–576, 1999.
- [5] LIU T. M., CHEN C. C.: *Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Smooth Passage With a 180 Deg Rectangular Turn*. Int. J. of Heat and Mass Transfer, 42:231–247, 1999.
- [6] SCHABACKER J.: *PIV Investigation of the Flow Characteristics in Internal Coolant Passages of Gas Turbine Airfoils With Two Ducts Connected by a Sharp 180 Deg Bend*. Dissertation, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 1998.
- [7] BRADSHAW P.: *The Effect of Streamline Curvature on Turbulent Flow*. No. 169, AGARDograph, 1973.
- [8] LEZIUS D. K., JOHNSTON J. P.: *Roll-Cell Instabilities in Rotating Laminar and Turbulent Channel Flows*. J. of Fluid Mechanics, 77:153–175, 1976.
- [9] MCMILLIN R. D., LAU S. C.: *Effect of Trailing-Edge Ejection on Local Heat (Mass) Transfer in Pin Fin Cooling Channels in Turbine Blades*. ASME J. of Turbomachinery, 116:159–168, 1994.
- [10] CHEAH S. C., IACOVIDES H., JACKSON D. C., JI H., LAUNDER B. E.: *LDA Investigation of the Flow Development Through Rotating U-Ducts*. ASME J. of Turbomachinery, 118:590–596, 1996.
- [11] CHANTELOUP D., JUANEDA Y., BOELCS A.: *Flow Effects on the Heat Transfer Distribution in a Two-Pass Internal Coolant Passage of Gas Turbine Airfoils*. Paper GT-2002-30214, ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, June 3-6, 2002.
- [12] RAU G.: *Einfluss der Rippenanordnung auf das Strömungsfeld und den Wärmeübergang in einem Kühlkanal mit quadratischem Querschnitt*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998.

-
- [13] LIOU T.-M., CHEN M.-Y., TSAI M.-H.: *Fluid Flow and Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Square Duct With In-Line 90 Deg Ribs*. ASME J. of Turbomachinery, 124, 2002.
- [14] BAEHR H. D., STEPHAN K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Verlag, 1998.
- [15] JISCHA M.: *Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch*. Vieweg, 1982.
- [16] PRESSER K. H.: *Experimentelle Prüfung der Analogie zwischen konvektiver Wärme- und Stoffübertragung bei nicht-abgelöster Strömung*. Wärme- und Stoffübertragung, Seiten 225–236, 1968.
- [17] PIQUET J.: *Turbulent Flows: Models and Physics*. Springer Verlag, 1999.
- [18] BAUER W.: *Berechnung turbulenter Strömungen mit starken Stromlinienkrümmungen beziehungsweise Rotation*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998.
- [19] BERG H. P.: *Experimentelle Bestimmung des örtlichen inneren Wärmeübergangs von Turbinenleit- und Laufschaufeln mit Hilfe der Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1991.
- [20] WAGNER J. H., JOHNSON B. V., HAJEK T. J.: *Heat Transfer in Rotating Passages With Smooth Walls and Radial Outward Flow*. ASME J. of Turbomachinery, 113:42–51, 1991.
- [21] RICHTER J.: *Der Einfluss einer Anstellwinkeländerung auf den Stoff-/ Wärmeübergang an einer filmgekühlten Schaufelvorderkante*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1999.
- [22] GOLDSTEIN R. J., CHO H. H.: *A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation*. Experimental Thermal and Fluid Science, Seiten 416–434, 1995.
- [23] HAN J. C., DUTTA S., EKKAD S. V.: *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology*. Taylor & Francis, 2000.
- [24] IACOVIDES H., KELEMENIS G., RAISEE M.: *On the Effects of Inclined Ribs on the Flow and Heat Transfer in Straight Cooling Passages; an Experimental and Computational Study*. Paper ATI-CST-029/01, Proceedings of 4th European Conference on Turbomachinery, Florence, Italy, 2001.
- [25] IACOVIDES H., JACKSON D. C., KELEMENIS G., LAUNDER B. E.: *The Measurement of Local Wall Heat Transfer in Stationary U-Ducts of Strong Curvature, With Smooth Walls and Rib-Roughened Walls*. ASME J. of Turbomachinery, 122:386–392, 2000.

-
- [26] CASARSA L., CAKAN M., ARTS T.: *Characterization of the Velocity and Heat Transfer Fields in an Internal Cooling Channel With High Blockage Ratio*. Paper GT-2002-30207, ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, June 3-6, 2002.
- [27] RAU G., CAKAN M., MOELLER D., ARTS T.: *The Effect of Periodic Ribs on the Local Aerodynamic and Heat Transfer Performance of a Straight Cooling Channel*. ASME J. of Turbomachinery, 120:368–375, 1998.
- [28] CHANTELOUP D.: *Experimental Investigation of Heat Transfer and Flow Characteristics in Various Geometries of 2-Pass Internal Cooling Passages of Gas Turbine Airfoils*. Dissertation, EPFL Lausanne, 2003.
- [29] CHANTELOUP D.: *EPFL Static Rig: Flow Measurement Final Report*. Brite EuRam, Interner Projektbericht, 1998.
- [30] CHANTELOUP D.: *EPFL Static Rig: Heat Transfer Measurement Final Report*. Brite EuRam, Interner Projektbericht, 2002.
- [31] CHANTELOUP D., BOELCS A.: *PIV Investigation of the Flow Characteristics in 2-Leg Internal Coolant Passages of Gas Turbine Airfoils*. Paper ATI-CST-031/01, Proceedings of 4th European Conference on Turbomachinery, Florence, Italy, 2001.
- [32] JOHNSON B. V., WAGNER J. H., STEUBER G. D., YEH F. C.: *Heat Transfer in Rotating Serpentine Passages With Trips Skewed to the Flow*. Paper 92-GT-191, ASME Turbo Expo 1992, Cologne, Germany, June 1-4, 1992.
- [33] LIOU T. M., CHEN M. Y., WANG Y. M.: *Heat Transfer, Fluid Flow and Pressure Loss Measurements Inside a Rotating Two-Pass Duct With Detached 90 Deg Ribs*. Paper GT-2002-30201, ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, June 3-6, 2002.
- [34] ACHARYA S., ELIADES V., NIKITOPOULOS D. E.: *Heat Transfer Enhancements in Rotating Two-Pass Coolant Channels With Profiled Ribs: Part 1-Average Results*. ASME J. of Turbomachinery, 123:97–105, 2001.
- [35] NIKITOPOULOS D. E., ELIADES V., ACHARYA S.: *Heat Transfer Enhancements in Rotating Two-Pass Coolant Channels With Profiled Ribs: Part 1-Average Results*. ASME J. of Turbomachinery, 123:107–114, 2001.
- [36] CHO H. H., LEE S. Y., RHEE D. H.: *Effect of Rib Configurations on Heat/Mass Transfer in a Two-Pass Rotating Duct*. ISROMAC-9, 10th-14th February, Honolulu, USA, 2002.
- [37] AL-HADHRAMI L., HAN J. C.: *Effect of Rotation on Heat Transfer in Two-Pass Square Channels With Parallel and Crossed 45 Deg Angled Rib Turbulators*. Paper HT-ABS-031, ISROMAC-9, 10th-14th February, Honolulu, USA, 2002.

- [38] AZAD G. S., UDDIN M. J., HAN J. C., MOON H.-K., GLEZER B.: *Heat Transfer in a Two-Pass Rectangular Rotating Channel With 45 Deg Angled Rib Turbulators*. ASME J. of Turbomachinery, 124:251–259, 2002.
- [39] IACOVIDES H., LAUNDER B. E.: *Computational Fluid Dynamics Applied to Internal Gas-Turbine Blade Cooling: a Review*. Int. J. of Heat and Fluid Flow, 16:454–470, 1995.
- [40] JANG Y.-J., CHEN H.-C., HAN J.-C.: *Flow and Heat Transfer in a Rotating Square Channel With 45 Deg Angled Ribs by Reynolds Stress Turbulence Model*. ASME J. of Turbomachinery, 123:124–132, 2001.
- [41] AL-QAHTANI M., CHEN H.-C., HAN J. C.: *Effect of Rotation on Heat Transfer in Two-Pass Square Channels With Parallel and Crossed 45 Deg Angled Rib Turbulators*. Paper GT-2002-30216, ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, June 3-6, 2002.
- [42] SAHA A. K., ACHARYA S.: *Large Eddy Simulation of Flow and Heat Transfer in a Periodic Rib-Roughened Square Duct*. Paper HT-ABS-014, ISROMAC-9, 10th-14th February, Honolulu, USA, 2002.
- [43] MATTERN C.: *Konvektive Stoffübertragung an gekrümmten Prallflächen in einem rotierenden Kühlsystem und deren Analogie zur Wärmeübertragung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998.
- [44] METAIS B., ECKERT E.R.G.: *Forced, Mixed and Free Convection Regimes*. ASME J. of Heat Transfer, 86:295–296, 1964.
- [45] RATHJEN L., HENNECKE D. K., ELFERT M., BOCK S., HENRICH E.: *Investigation of Fluid Flow, Heat Transfer and Pressure Loss in a Rotating Multi-Pass Coolant Channel with an Engine-Near Geometry*. No. ISABE99-7201, AIAA, 1999.
- [46] RATHJEN L., HENNECKE D. K., BOCK S., KLEINSTUECK R.: *Detailed Heat/Mass Transfer Distributions in a Rotating Two-Pass Coolant Channel With Engine-Near Cross-Section and Smooth Walls*. ICHMT Turbine 2000, Cesme, Turkey, 2000.
- [47] DITTUS F. W., BOELTER L. M. K.: *Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Tube*. University of California Publications in Engineering, 2:443–461, 1930.
- [48] HAN J. C., ZHANG P.: *Effect of Rib-Angle Orientation on Local Mass Transfer Distribution in a Three-Pass Rib-Roughened Channel*. ASME J. of Turbomachinery, 113:123–130, 1991.
- [49] CHYU M. K.: *Regional Heat Transfer in Two-Pass and Three-Pass Passages With 180-deg Sharp Turns*. ASME J. of Turbomachinery, 113:63–70, 1991.
- [50] GNIELINSKI. V: *Gleichungen für den Wärme- und Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen*. Forschung Ingenieurwesen, 41:8–16, 1975.

-
- [51] RATHJEN L., HENNECKE D. K., SIVADE C., SEMMLER K.: *Detailed Experimental and Numerical Heat/Mass Transfer Investigations in a Rotating Two-Pass Coolant Channel With Staggered 45 Deg Ribs*. Paper HT-ABS-034, ISROMAC-9, 10th-14th February, Honolulu, USA, 2002.

A Anhang

Versuchsrandbedingungen

Die aufgeführten Tabellen enthalten die für numerische Berechnungen erforderlichen Eintrittsrandbedingungen. Es handelt sich hierbei um über die Versuchsdauer gemittelte Werte. Sie sind gültig für die in der Diskussion gezeigten Ergebnisse aus den Wärme- / Stoffübergangsuntersuchungen mit $Re = 25000$. Der entsprechende Luftmassenstrom am Modelleintritt liegt bei ca. $\dot{m}_{inlet} = 0.0137 kg/s$.

Konfiguration 1:

Bildnummer	5.10a/5.14	5.10b	5.10c/5.17
Ro	0	0.1	0.2
$p_{st,inlet}$ in Pa	84559	83639	84965
T_{inlet} in K	294.4	297.9	297.5

Konfiguration 3:

Bildnummer	5.10a/5.14	5.10b	5.10c/5.17
Ro	0	0.1	0.2
$p_{st,inlet}$ in Pa	82156	84478	85543
T_{inlet} in K	293.5	293.8	298.3

Lebenslauf

21.11.1969	geboren in Kiel
1990	Erlangung der Allgemeinen Hochschulreife am Technischen Gymnasium Bruchsal
1990 - 1996	Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der Technischen Universität Darmstadt
1997 - 2002	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Gasturbinen und Flugantriebe der Technischen Universität Darmstadt
seit 2002	Entwicklungsingenieur bei der Heidelberg Postpress Deutschland GmbH