

Kapitel 6

Zusammenfassung

Die wichtige Frage, ob die Zyklonkühlung als eine Kühlmethode für Turbinenbeschaukelungen eingesetzt werden kann, kann positiv beantwortet werden. Das globale Niveau des Stoffübergangs ist vergleichbar bzw. liegt über dem eines berippten Kühlkanalmodells, vergleiche [59]. Der Faktor liegt bei ca. 1 bis 1.4, wobei hier nochmals angemerkt sein soll, dass dies die Untergrenze der Verbesserung darstellt, da die eingangs erläuterte Problematik mit der Wahl des Bezugspunktes hier direkt zum Tragen kommt. Dies deckt sich auch mit den in der Literatur gemachten Aussagen bezüglich des Wärmeübergangs. Die Verteilung des Stoffübergangs über den Umfang der Messstrecke unter rotierenden Bedingungen ist sehr homogen im Verhältnis zur Verteilung bei der voll turbulenten, drallfreien Rohrströmung. Die Rotation selbst hat keinen nachweisbaren Einfluss auf das globale Niveau des Stoffübergangs, es kommt aber zu lokalen Umverteilungen im Stoffübergang. Die Umverteilung nimmt die Form einer Helix mit geringer Steigung an. Hervorgerufen wird dies durch den Drallkern der Strömung, der eine ebensolche Helixform stationär ausbildet. Als Ursache wird ein Stabilitätsproblem vermutet, da keiner der Betriebsparameter einen eindeutigen Einfluss auf dieses Verhalten hat. Weder im stehenden noch im rotierenden Fall kann ein Precessing Vortex Core nachgewiesen werden. Die bekannten Untersuchungen, z. B. [30], zum PVC beziehen sich jedoch auf Bereiche nach einer plötzlichen Querschnittserweiterung, die im vorliegenden Fall nicht vorhanden ist. Somit muss ein PVC nicht notwendigerweise vorhanden sein.

Es wird vermutet, dass aus jedem Spalt des Drallerzeugers ein Jet austritt, der sich um seine eigene Achse dreht. Dies führt zu axialen Geschwindigkeitsüberhöhungen an der Rohrwand, die sich auch im Stoffübergang nachweisen lassen, da sie dort Bereiche erhöhten Übergangs ausbilden. Mit zunehmender Lauflänge wandert der Jet in Richtung Rohrmittelachse, sodass die Auswirkungen auf den Stoffübergang abnehmen. Es entsteht ein Rillenmuster im Stoffübergang, das die Form einer Doppelhelix hat.

Die Ergebnisse des globalen Stoffübergangs zeigen, dass der Einfluss der Reynoldszahl größer ist als der der geometrischen Drallzahl. In beiden Fällen kommt es bei einer Erhöhung des Parameters zu einer Verbesserung im Stoffübergang. Dies widerspricht der Aufstellung von Ergebnissen von Chang et al. [14], die nur eine geringe Abhängigkeit von der Reynoldszahl postulieren. Allerdings wird dort nicht erläutert,

wie der Drall erzeugt wird. Eine andere Art der Drallerzeugung könnte daher die Ursache für die angeführte Abweichung sein. Kitoh [20] weist nach, dass sich selbst bei gleicher globaler Drallzahl die Geschwindigkeitsverteilungen stark verändern, wenn die Erzeugung des Dralls variiert. In den vorliegenden Untersuchungen scheint die Strömungsform recht stabil zu sein und sich auch durch mäßige Veränderungen am Auslass nicht zu ändern, was über gleiche Werte im Stoffübergang gezeigt wird. Eine extreme Querschnittsverengung, im konkreten Fall auf 2,8% der Ausgangsfläche, lässt den Stoffübergang bei gleichem Massenstrom um rund 15% absinken. Bei einer extremen Querschnittsverengung, gepaart mit einer exzentrischen Lage des Auslasses, scheint sich die Strömungsform komplett zu verändern, wie sich aus den charakteristischen Mustern im Stoffübergang ableiten lässt. Zusätzlich sinkt der globale Wert des Stoffübergangs auf den Wert der entsprechenden zentrischen Querschnittsverengung ab. Die hier untersuchte Querschnittsverengung stellt sicherlich ein Extremfall dar, da in ausgeführten Schaufeln die Querschnittsfläche um Werte auf ca. 20% reduziert wird.

Verursacht durch den Drallerzeuger steigt der Totaldruckverlust der Drallströmung im stehenden System gegenüber dem der drallfreien Strömung mit scharfkantigem Einlauf auf das bis zu 40-fache an. Die aus den PIV-Daten exemplarisch berechnete radiale Verteilung des statischen und dynamischen Druckes zeigt, dass ein großer Gradient im statischen Druck über den Rohrradius auftritt. Demgegenüber ist der dynamische Anteil vernachlässigbar. Der Druckaufbau durch die Systemrotation ist abhängig von der Drehzahl und im untersuchten Bereich wesentlich geringer als der Druckaufbau durch den Drall selbst.

Charakteristisch für die Drallströmung ist das globale Rückströmgebiet nahe der Rohrmittelachse, das sich über die gesamte Messstrecke ausdehnt, wie dies auch bei King et al. [19] erwähnt wird. Der Durchmesser des Rückströmgebietes nimmt hierbei mit zunehmender Lauflänge ab. Ebenso ist eine Abnahme des Dralls mit zunehmender Lauflänge zu verzeichnen.

Die Helixform, die der Drallkern bei nur einem Drallerzeugerspalt einnimmt, wird ebenfalls von Hay und West [2] beschrieben. Entgegen deren Vermutung, dass sich das Strömungsbild nach ca. $5x/D$ homogenisiert hat, kann mithilfe der PIV-Messmethode nachgewiesen werden, dass selbst nach $10x/D$ noch eine starke Asymmetrie herrscht.

Die überproportionale Verbesserung des Stoffübergangs im Verhältnis zur drallfreien Rohrströmung ist auf zwei Punkte zurückzuführen. Erstens die überhöhten Wandgeschwindigkeiten und zweitens die scheinbar sehr große Turbulenz in der Drallströmung, wie dies auch schon von Chang et al. [14] vermutet wird.

Ein Nachweis von Görtler-Wirbeln kann nicht erbracht werden, da diese zu kleinskalig und instationär sind; es bleibt nachzuweisen, ob sie im vorliegenden Fall vorhanden sind.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass an der Universität Stuttgart parallel Untersuchungen an derselben Geometrie sowohl numerisch mit Systemrotation als auch direkte Wärmeübergangsmessungen mit Hilfe der Flüssigkristallmethode ohne Systemrotation durchgeführt werden. Zum Vergleich liegen von diesen Untersuchungen allerdings noch keine abschließenden Ergebnisse vor, sodass hierauf verzichtet

werden muss.

Im Falle der permanenten Drallerzeugung durch tangential eingebrachte Bohrungen über den kompletten Messbereich ist ein eindeutiger Einfluss der Rotation zu verzeichnen. Für den Fall, dass die Corioliskraft entgegen der Ausströmrichtung der Bohrungen wirkt, vermindert sich im direkten Nachlauf der Bohrungen der Stoffübergang. Zusätzlich kann mit steigender Rotation eine Verschiebung des erhöhten Stoffübergangs im Bereich der Bohrungen in Richtung der wirkenden Zentrifugalkraft festgestellt werden. Innerhalb der Bohrungsreihe fällt auf, dass, hervorgerufen durch den zunehmenden axialen Geschwindigkeitsanteil, ebenfalls eine Verschiebung des Musters im Stoffübergang aus der Bohrungs-Längsachse auftritt. Es ist zu vermuten, dass bei einer Umkehr der Systemrotation, d. h. einer Umkehr der Corioliskraftrichtung eine Erhöhung des Stoffübergangs eintritt. Vergleichbare Ergebnisse werden von Glezer et al. [6] erzielt.

6.1 Übertragbarkeit auf technische Anwendung

Die geschilderten Ergebnisse gelten prinzipiell für die untersuchte Geometrie, sowohl bezüglich des Zyklonkanals als auch des Drallerzeugers. Eine Änderung dieser Geometrieparameter, wie sie zwangsläufig in der Realität nötig ist, kann die Ergebnisse verändern. So weist Kitoh [20] nach, dass sich die Geschwindigkeitsverteilungen bei unterschiedlicher Art der Drallerzeugung unterscheiden, obwohl die globalen, d. h. räumlich gemittelten, Drallzahlen vergleichbar sind. Die Gestaltung des Vorderkantenkanals in einer ausgeführten Turbinenschaufel ist nicht vollständig rund. Zwar wird sich auch in eckigen Kanälen eine Drallströmung einstellen, wie dies aus anderen Untersuchungen bekannt ist, doch stellen sich in den Ecken Wirbel ein, in denen der Stoffübergang bzw. der Wärmeübergang aufgrund mangelnden Fluidaustausches maßgeblich erniedrigt sein wird.

Die hochbelasteten Stufen einer modernen Turbine verfügen in der Regel immer über Filmkühlung. Die Rückwirkungen der Filmkühlbohrungen und der abnehmenden Masse im Zyklonkanal auf den Zyklon werden in diesem Vorhaben nicht untersucht, müssen aber beachtet werden. Dies wird im Nachfolgevorhaben geschehen. Umgekehrt beeinflusst der Zyklon im Inneren auch die Filmkühlung. Die aufgetretene lokale Ungleichverteilung der Strömung, wie sie die Verteilung des Stoffübergangs vermuten lässt, könnte die Filmkühllegung maßgeblich ändern und somit eine Anpassung der Filmkühlung nötig machen. Dass der Zyklon im Inneren die Ausblaseprofile aus den Filmkühlbohrlöchern und auch die adiabate Filmkühleffektivität verändert, wird von Lerch [45] gezeigt.

Als Ähnlichkeitsparameter werden die Rotationszahl und die Reynoldszahl, jeweils bezogen auf den Rohrdurchmesser, verwendet. Die Reynoldszahl wird hierbei über den Massenstrom bestimmt. Zur Charakterisierung der Drallstärke wird die geometrische Drallzahl eingeführt. Sie gilt also, wenn die Geometrie des Drallerzeu-

gers beibehalten wird. Eine Änderung der Art der Drallerzeugung kann, selbst bei gleicher globaler Drallzahl, eine andere Strömungsform hervorrufen [20], wodurch sich der Stoffübergang ändern kann. Dies wäre auch der Fall, wenn die übliche Definition der Drallzahl verwendet würde. Würde die lokale Verteilung der Drallzahl hingegen übereinstimmen und wird weiterhin von inkompressibler Strömung ausgegangen, dann sollten auch die Strömungen gleich sein.

Die Rotationszahl ist durch die Bildung mit dem Rohrdurchmesser eine über die Messstrecke bzw. in der Realität Schaufellänge feste Größe. Die wirkende Fliehkraft auf die Strömung als Produkt aus Drehzahl und Radius ist, wie zu erkennen ist, unabhängig vom Rohrdurchmesser. Durch die Bildung der Rotationszahl mit dem Rohrdurchmesser wird dieser Tatsache keine Rechnung getragen. D. h. das Verhältnis von Zentrifugalwirkung zu Corioliswirkung wird nicht korrekt abgebildet. Aber selbst wenn die Rotationszahl mit dem Radius gebildet wird, ist es nur möglich diese für einen Punkt bzw. Radiusposition im Modell vergleichbar mit der Realität abzubilden, vorausgesetzt es ist möglich eine Parameterkombination ω, r zu finden, die im Prüfstand zu realisieren ist. Hier sind Einschränkungen wie Messbarkeit im Modell (Modellgröße), Materialfestigkeit aufgrund Drehzahl, maximale Drehzahl, gegeben durch Motorleistung, und Bauraum zu berücksichtigen.

In Kapitel 2.4 wird auf den Hilsch-Effekt in Drallrohren hingewiesen. Inwiefern dieser Effekt in der technischen Anwendung auftritt und die erzielbaren Resultate beeinflusst, kann durch Messungen des Stoffübergangs nicht nachgewiesen werden. Wenngleich auch die spezielle Form eines Hilsch-Rohres in der technischen Anwendung kaum zu finden sein dürfte, muss der Effekt in Betracht gezogen werden.

Ein Punkt, der in den Untersuchungen nicht beachtet werden kann, aber bei der Umsetzung in einer Turbinenlaufschaukel berücksichtigt werden muss, ist das Gesamtbeanspruchungskollektiv, das sich aus mechanischen und thermischen Belastungen zusammensetzt. Eine neu gestaltete Kühlkanalgeometrie bedarf einer neuen mechanischen und thermomechanischen Berechnung.