



Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bauer, Ord.

Schlussbericht Entwicklung von Verbrennungstechnologien im CEC für die klimaschonende Energieerzeugung

Teilvorhaben 2F:
Filmgekühlte Turbinenschaufel

Bearbeiter:

Marc Fraas
Dr.-Ing. Achmed Schulz
Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer (Projektleiter)

Industriepartner:

SIEMENS

Förderkennzeichen:

03ET7011P

Berichtszeitraum:

01.01.2014 – 31.12.2014

September 2015

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Verantwortung für den
Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt beim Autor

Vorhaben-Nr.: 2F

Verbundprojekt:	Entwicklung von Verbrennungstechniken im CEC für klimaschonende Energieerzeugung
Teilprojekt 2.3:	Kühlluftreduktion von Turbinenschaufeln
Unterprojekt 2F:	Filmgekühlte Turbinenleitschaufel
Firma/Institut:	Karlsruher Institut für Technologie KIT, Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Industriepartner:	Siemens AG

Gliederung

I. Kurze Darstellungen zu

- Aufgabenstellung
- Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde
- Planung und Ablauf des Vorhabens
- wissenschaftlichem und technischen Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere
 - Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden
 - Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

II. Eingehende Darstellung

- der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele
- der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises
- der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit
- des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans
- des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen
- der erfolgten und geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

Vorhaben-Nr.: 2F**I. Kurze Darstellungen zu****– Aufgabenstellung**

Die Filmkühlung ist eine wirkungsvolle Methode zur Reduzierung der thermischen Belastung von Hochtemperaturkomponenten von Gasturbinen, wie z.B. Brennkammerflamrohr und Turbinenschaufeln. Neue Fertigungsverfahren, mit deren kommerzieller Einführung in den nächsten Jahren zu rechnen ist, gestatten eine nahezu beliebige geometrische Gestaltung der Kühlluftbohrungen. Besonders die Konturierung der Bohrungseintritte in den Kühlkanälen der Turbinenschaufeln gestattet eine gezielte Einflussnahme auf die typischen Wirbelstrukturen eines Kühlluftstrahls und damit eine Verbesserung des Filmkühlverhaltens. Um realistische Strömungsverhältnisse am Bohrungseintritt in einem skalierten Versuchsaufbau realisieren zu können, ist ein geschlossener Sekundärluftkreislauf erforderlich.

In dem durch das BMWI und die Fa. SIEMENS AG geförderten und im Rahmen von COOREFLEX-Turbo durchgeführten Vorhaben "Hocheffiziente Filmkühlung mit optimierter Bohrungsgeometrie" (FKZ 03ET7021F) wird der Gestaltung des Bohrungseintritts und der Analyse des Einströmvorgangs in die Bohrung besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Der in diesem Vorhaben eingesetzte Versuchsaufbau gestattete aber lediglich die Versorgung einer einzelnen skalierten Bohrung mit Kühlluft. Da für eine sorgfältige Bewertung des Kühlpotentials dieser neuartigen Kühlluftbohrungen auch die Interaktion der Bohrungen untereinander (Kühlluftbohrungen sind häufig in Reihen angeordnet) sowohl auf der Eintritt- wie auch auf der Austrittseite betrachtet werden muss, musste der verfügbare Sekundärluftkanal ertüchtigt werden, d.h. der zirkulierte Kühlluftvolumenstrom musste der Zahl der zu untersuchenden Bohrungen (5) angepasst werden. Es war somit ein Sekundärluftgebläse mit fünffacher Förderkapazität erforderlich. Da der Sekundärluftkreislauf geschlossen ist, muss die durch das Gebläse in die Strömung eingebrachte Leistung wieder über einen Kühler abgeführt werden, der ebenfalls der erhöhten Leistung angepasst werden musste.

In diesem Vorhaben musste aus den oben genannten Gründen ein druck- und temperaturfestes Gebläse für den Sekundärluftkreislauf beschafft werden. Zuvor waren detaillierte Berechnungen zum erforderlichen Druckaufbau und des zu fördernden Massenstroms des Gebläses notwendig. Nach Lieferung des Gebläses war dieses in die Versuchsinfrastruktur des Instituts für Thermische Strömungsmaschinen zu integrieren und die Leistungsdaten zu überprüfen.

– Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Institut für Thermische Strömungsmaschinen ist seit mehr als zwei Jahrzehnten erfolgreich auf dem Gebiet der gekühlten Gasturbinen sowohl experimentell als auch theoretisch/numerisch tätig. Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich in jüngster Zeit auf die Bewertung des Potentials neuer generativer Herstellmethoden für die weitere Verbesserung der Kühlung von Heißgaskomponenten. In verschiedenen Versuchsanlagen werden deshalb die Filmkühleigenschaften, d.h. die adiabate Filmkühleffektivität, der Wärmeübergang und das Strömungsverhalten, detailliert untersucht. Hierzu verfügt das Institut über eine sehr gut entwickelte Infrastruktur. Es ste-

Vorhaben-Nr.: 2F

hen entsprechende Strömungskanäle mit Luftvorwärmung sowie die notwendig Messtechnik samt Auswertung zur Verfügung. Außerdem stehen für Fertigung und Aufbau von Versuchsanlagen institutseigene Werkstätten bereit.

In einem Projekt, das sich insbesondere den Einströmbedingungen in Kühlluftbohrungen widmet, konnte bisher lediglich eine einzelne Kühlluftbohrung einer realistischen Strömungssituation ausgesetzt werden, da der Kühlluftmassenstrom im Sekundärkanal limitiert war. Da in realen Bauteilen aber zumeist Bohrungsreihen verwendet werden und somit eine Interaktion der einzelnen Bohrungen stattfindet, müssen im Experiment mindestens 5 Bohrungen betrachtet werden. Das Unterprojekt 2F "Filmgekühlte Turbinenleitschaufel", das die Beschaffung eines größeren Sekundärluftgebläses zum Ziel hatte, stellt deshalb eine hervorragende Ergänzung des Versuchsaufbaus dar und ermöglicht nun die Entwicklung neuer Bohrungseinlässe.

– Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Festlegung der Leistungsdaten des Sekundärluftgebläses mussten zunächst die aerodynamischen Parameter der Kühlluftpassage ermittelt werden. In enger Zusammenarbeit mit dem Industriepartner SIEMENS wurden typische Reynolds- und Machzahlbereiche der schaufelinternen Strömung festgelegt und die in der realen Schaufel auftretende Konstellation von Kühlluftpassage, Kühlluftbohrung und externer Heißgasströmung identifiziert.

Die Anforderungen an das Sekundärluftgebläse wurden von einem Angebot der Firma FIMA am besten erfüllt. In ausführlichen Vorgesprächen wurde die Konfiguration der zu liefernden Maschine mit Vertretern des Herstellers festgelegt. Hierbei waren neben der Erfüllung der Leistungsanforderungen auch die räumlichen Gegebenheiten des Labors einzuhalten.

Während der Lieferzeit wurden die laborseitigen Voraussetzungen für die Aufstellung des Gebläses geschaffen, d.h. es musste eine elektrische Aufrüstung des Aufstellungsorts erfolgen (Motorleistung 75kW) und die Anbindung an den geschlossenen Kühlluftkreislauf musste durch entsprechende konstruktive Maßnahmen (Verrohrung, Gestelle, Kühler) durchgeführt werden.

Nach Lieferung und Aufstellung erfolgten die elektrische Anbindung und die Parametrisierung des Frequenzumrichters für den drehzahlvariablen Betrieb des Sekundärluftgebläses. In einem provisorischen geschlossenen Sekundärluftkreislauf wurden die Dichtheit sowie die Leistungsdaten des Gebläses erfolgreich überprüft. Der Sekundärluftkanal des Versuchsstandes konnte bis zum Abschluss dieses Vorhabens leider noch nicht vollständig in Betrieb genommen werden, so dass ein provisorischer Aufbau zur Überprüfung des Gebläses gewählt wurde.

– Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Der Einfluss der Strömung im Sekundärluftkanal wurde in der Vergangenheit bereits ausführlich untersucht. Hay et al. (1983) untersuchten den Einfluss der Querströmung auf den Durchflusskoeffizienten C_D von zylindrischen Bohrungen. Dabei wurden die Orientierung des Sekundärströmungskanals, die Machzahlen im Sekundär-

Vorhaben-Nr.: 2F

und Heißluftkanal sowie das Druckverhältnis über die Bohrung variiert. Es konnte gezeigt werden, dass der Durchflusskoeffizient mit steigendem Druckverhältnis über die Bohrung zunimmt und sich einem Grenzwert annähert. Der Wert des Druckverhältnisses, für den sich ein Grenzwert einstellt ist dabei abhängig von den Machzahlen in beiden Kanälen. Thole et al. (1997) untersuchten den Einfluss der Querströmung auf kurze Bohrungen, wie sie typisch sind in Gasturbinen. Dabei wurde der Durchflusskoeffizient bestimmt und Strömungsgrößen im Heißgaskanal gemessen. Sie konnten zeigen, dass die Strömung am Bohrungsausstritt von der Querströmung im Sekundärluftkanal beeinflusst wird. Gritsch et al. (2000) untersuchten den Einfluss von interner und externer Querströmung auf das Durchflussverhalten für Diffusorbohrungen. Als wesentliches Resultat der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Diffusorbohrungen unter gleichen Bedingungen höhere Durchflusskoeffizienten als zylindrische Bohrungen aufweisen. Eine ausführliche Studie über die Einflüsse des Anstellwinkels einer Bohrung und der Geschwindigkeiten in beiden Kanälen wurde von Gritsch et al. (2001) durchgeführt. Der Durchflusskoeffizient hängt demnach nicht nur von der Geometrie sondern auch von den Strömungsbedingungen an Ein- und Austritt der Bohrung ab. Eine Erhöhung des Anstell- bzw. Einbauwinkels führt zu höheren Verlusten. Den Einfluss der Querströmung auf die Filmkühleffektivität für zylindrische und Diffusorbohrungen untersuchten Saumweber et al. (2001). Sie konnten zeigen, dass der Einfluss der Strömung im Sekundärluftkanal von der Bohrungsgeometrie abhängt. Eine parallele Ausrichtung der beiden Kanäle hat allgemein nur einen geringen Effekt auf die Filmkühleffektivität. Eine Querströmung am Bohrungseintritt hat bei zylindrischen Bohrungen einen positiven Effekt auf die Filmkühleffektivität. Im Gegensatz dazu verringert sich die Effektivität einer Diffusorbohrung unter Queranströmung.

Zur Erhöhung der Turbulenz und damit des Wärmeübergangs werden in den internen Kanälen einer Gasturbinenschaufel Rippen eingesetzt. Der Einfluss dieser Rippen auf den Durchflusskoeffizient wurde von Bunker und Bailey (2001) untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine Platzierung der Bohrung zwischen zwei Rippen nur einen geringen Effekt hatte. Eine Platzierung direkt vor oder nach einer Rippe führt dagegen abhängig von der Orientierung des Sekundärluftkanals im Vergleich zum Hauptströmungskanal zu einer Erhöhung oder Absenkung des Durchflusskoeffizienten. Heneka et al. (2010) zeigten, dass die Verluste am Bohrungseintritt und damit der Durchflusskoeffizient hauptsächlich von der Umlenkung der Strömung am Eintritt herrühren. Heneka et al. (2011) stellten dar, dass Rippen mit 45° und 60° eine deutliche Verbesserung des Durchflusskoeffizienten im Vergleich zu Rippen mit 75° und 90° brachten. Diese führen in einer Querströmungsanordnung zu besseren Durchflusskoeffizienten als der rippenlose Vergleichsfall.

Die geometrische Gestaltung des Eintritts der Kühlluftbohrung, die mit heutigen generativen Herstellverfahren möglich ist, mit dem Ziel, das Wirbelsystem der Kühlluftströmung so zu beeinflussen, dass stabile Kühlfilme entstehen, wurde bisher wenig untersucht. Vor allem die Kombination aus geometrischer Gestaltung des Bohrungseintritts und realistischer Querströmung in der Kühlluftpassage wurde bisher nicht betrachtet. Durch das neue Sekundärluftgebläse lassen sich diese Bedingungen in stark vergrößertem Maßstab nachbilden. Eine sehr detaillierte Erfassung von Strömungs- und Wärmeübergangskenngrößen wird dadurch ermöglicht.

Vorhaben-Nr.: 2F

II: Eingehende Darstellung

– der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

AP1: Definition der aerodynamischen Parameter der Kühlluftpassage. Die geplanten Filmkühluntersuchungen werden an stark vergrößerten Modellen unter Laborbedingungen durchgeführt. Um die Ergebnisse der Laboruntersuchungen auf die realen Bedingungen einer Gasturbine übertragen zu können, müssen die Strömungen aerodynamisch ähnlich sein, d.h. die Reynolds- und Machzahlen der beiden Strömungen müssen identisch sein. Wenn von einer Strömung ein Teil abgezweigt wird, wie das im Inneren einer Turbinenschaufel durch den Strömungseintritt in die Kühlluftbohrungen geschieht, ist das Verhältnis der Geschwindigkeiten von großer Bedeutung. Das gilt selbstverständlich auch auf der Schaufelaußenseite, wo Kühlluftstrahlen in die heiße Strömung ausgeblasen werden.

In einem ersten Schritt wurden deshalb die Strömungsverhältnisse in der Kühlluftpassage einer realen Gasturbinenschaufel analysiert. Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Mach- und Reynoldszahl in der Kühlluftpassage einer realen Gasturbinenschaufel. Da die Kühlluft der ersten Turbinenstufe nach dem Verdichter entnommen wird, entsprechen die thermodynamischen Parameter der Kühlluft (Druck, Temperatur) weitestgehend den Daten am Verdichteraustritt. Die Geschwindigkeiten in einer Kühlluftpassage sind in verschiedenen Gasturbinen stark unterschiedlich und können Werte annehmen die einer Machzahl von bis zu 0.5 entsprechen. Im vorliegenden Versuchsaufbau werden allerdings nur Machzahlen von bis zu 0.3 berücksichtigt. Die Strömung in der Kühlluftpassage kann somit als inkompressibel betrachtet werden; die Einhaltung der Reynoldszahl als Ähnlichkeitskenngröße ist somit völlig ausreichend. Aus dem dargestellten Zusammenhang ergibt sich eine maximale Reynoldszahl $Re_D \approx 30000$. Als charakteristische geometrische Größe in der Definition der Reynoldszahl wurde der Durchmesser der Kühlluftbohrung gewählt (0,7mm).

Entscheidend für den Effekt der Querströmung in der Kühlluftpassage auf die Filmkühlwirkung an der heißen Oberfläche ist zusätzlich das Verhältnis der Geschwindigkeiten u_c in der Bohrung und u_{int} in der Kühlluftpassage. Für ein großes u_c/u_{int} spielt die Geschwindigkeit in der Kühlluftpassage nur eine untergeordnete Rolle, während sie für kleine Verhältnisse der entscheidende Faktor ist. Bei stationären Gasturbinen von des Industriepartners Siemens bewegt sich das Verhältnis u_c/u_{int} zwischen 5 und 30. Mit steigender Ausblaserate nimmt das Verhältnis zu. Um realistische Bedingungen nachzubilden, soll innerhalb einer Versuchsreihe die Reynoldszahl konstant gehalten und die Ausblaserate variiert werden. In Bild 2 ist das Geschwindigkeitsverhältnis für drei verschiedene Reynoldszahlen über der Ausblaserate dargestellt. Die geringste Ausblaserate im Versuch soll 0,5 betragen. Reynoldszahlen kleiner 5000 sind aufgrund der geringen dynamischen Drücke mit großen Messunsicherheiten behaftet und werden deshalb nicht berücksichtigt. Außerdem ist bei solch geringen Reynoldszahlen der Effekt der Querströmung vernachlässigbar, d.h. es könnten Plenumsbedingungen am Bohrungseintritt angenommen werden.

Vorhaben-Nr.: 2F

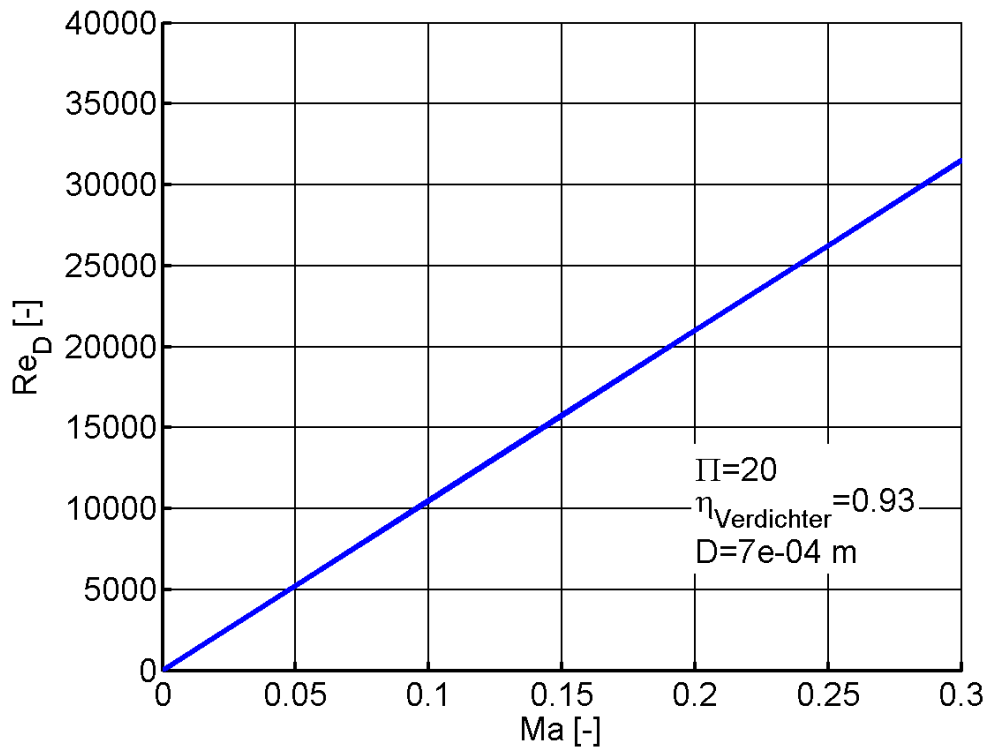


Bild 1: Zusammenhang Reynoldszahl und Machzahl in der Kühlluftpassage

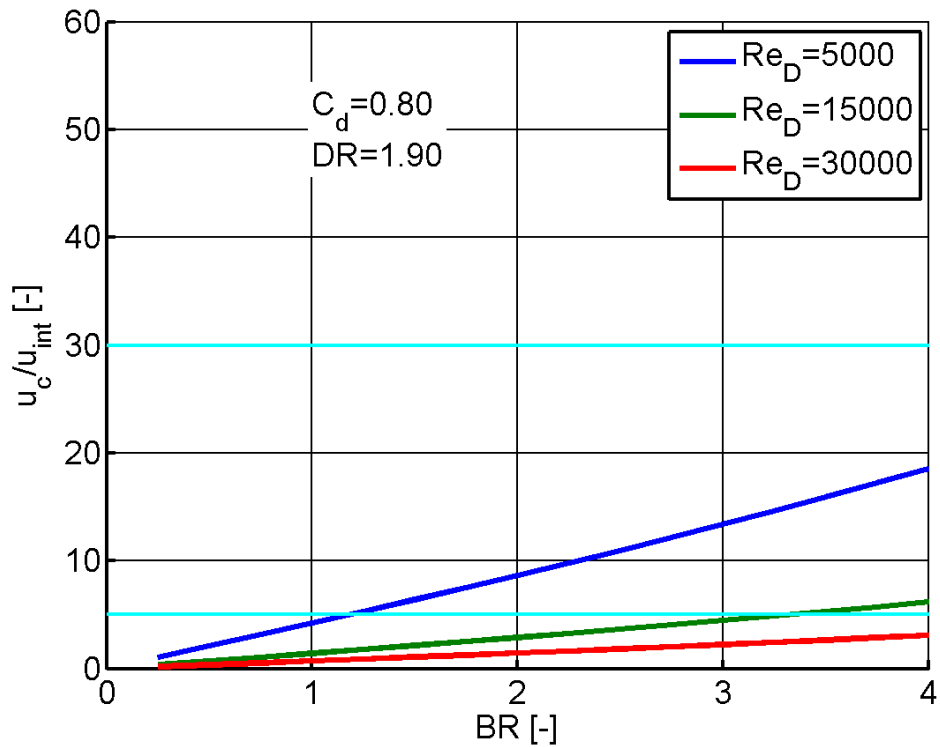


Bild 2: Zusammenhang Geschwindigkeitsverhältnis und Ausblaserate

Vorhaben-Nr.: 2F

Eine Analyse der in Bild 1 und 2 dargestellten Zusammenhänge ergibt, dass bei den Versuchen sowohl eine geringe Reynoldszahl $Re_D < 10000$ als auch $Re_D > 25000$ untersucht werden sollte. Somit können in den Versuchen Fälle abgebildet werden, in denen die Querströmung sowohl großen als auch geringen Einfluss auf das Filmkühlverhalten hat.

Mit den Abmessungen des Sekundärluftkanals von 70 mm Höhe und 500 mm Breite kann somit ein zu fördernder Volumenstrom für ein Gebläse bestimmt werden. Der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Reynoldszahl ist in Bild 3 für zwei verschiedene Ausblaseraten dargestellt. Das im Rahmen des Projektes beschaffte Gebläse ist in der Lage, den geforderten Volumenstrombereich abzudecken.

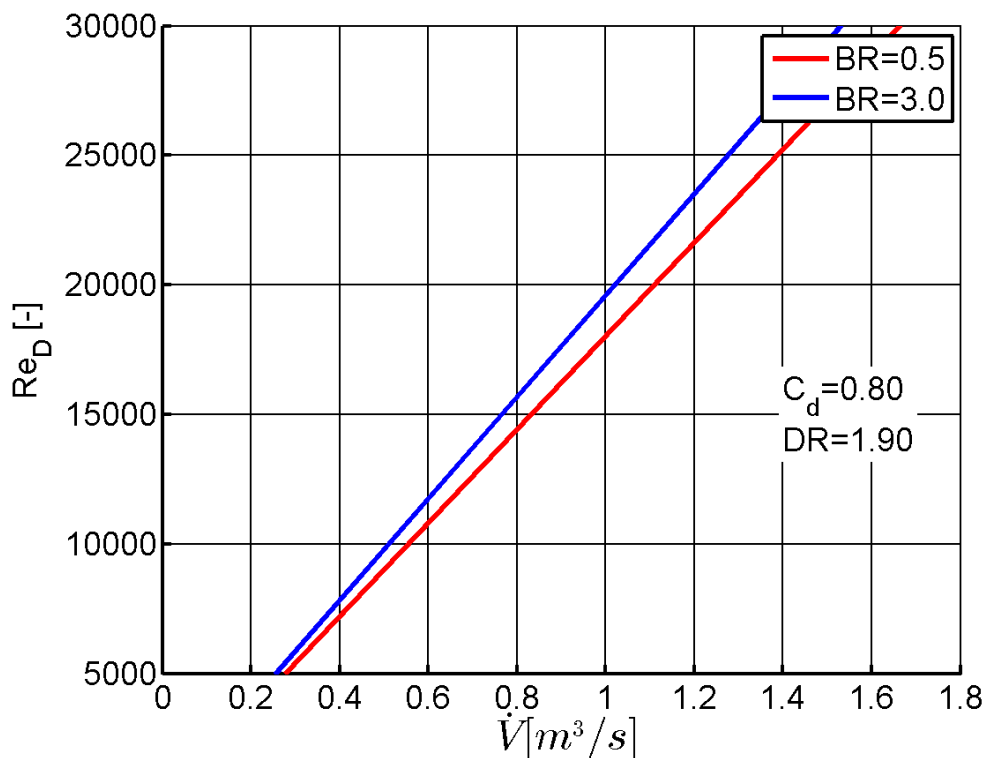


Bild 3: Zusammenhang Reynoldszahl und Volumenstrom im Kanal

AP 2: Konstruktion und Aufbau des geschlossenen Sekundärluftkreislaufs. Der Sekundärluftkreislauf ist als geschlossener Kreislauf ausgeführt. Eine Zuleitung für Druckluft ermöglicht, die durch die Kühlluftbohrungen entweichende Luft nachzuliefern. Im stationären Fall entspricht die ausgeblasene Kühlluft genau der zugeführten Druckluft. Durch Messung des zugeführten Luftmassenstroms kann mit sehr hoher Genauigkeit der Kühlluftmassenstrom durch die Bohrungen bestimmt werden. Sämtliche Anlagenteile des geschlossenen Sekundärluftkreislaufs müssen deshalb dicht sein.

Der Kreislauf besteht aus dem Gebläse, einem Kühler, fest installierten Rohren und Schläuchen. In Bild 4 ist eine CAD Zeichnung des Aufbaus des Luftkreislaufes dargestellt. Der Kühler wird benötigt, um die durch das Gebläse zugeführte Wärme wieder abzuführen, so dass sich der Kreislauf nicht erhitzt. Gebläse und Kühler sind

Vorhaben-Nr.: 2F

über ein fest installiertes Rohr verbunden. Hinter dem Kühler wird die Luft mit festen Rohren in Richtung der Versuchsstrecke geleitet. Dargestellt sind die Rohre bis zum Punkt des Schlauchanschlusses. Da der Sekundärluftkanal drehbar ist, um verschiedene Anströmbedingungen zu simulieren, wird dieser mit Schläuchen mit dem Kreislauf verbunden. Durch die Verwendung der Schläuche wird ein hoher Grad an Flexibilität gewährleistet.

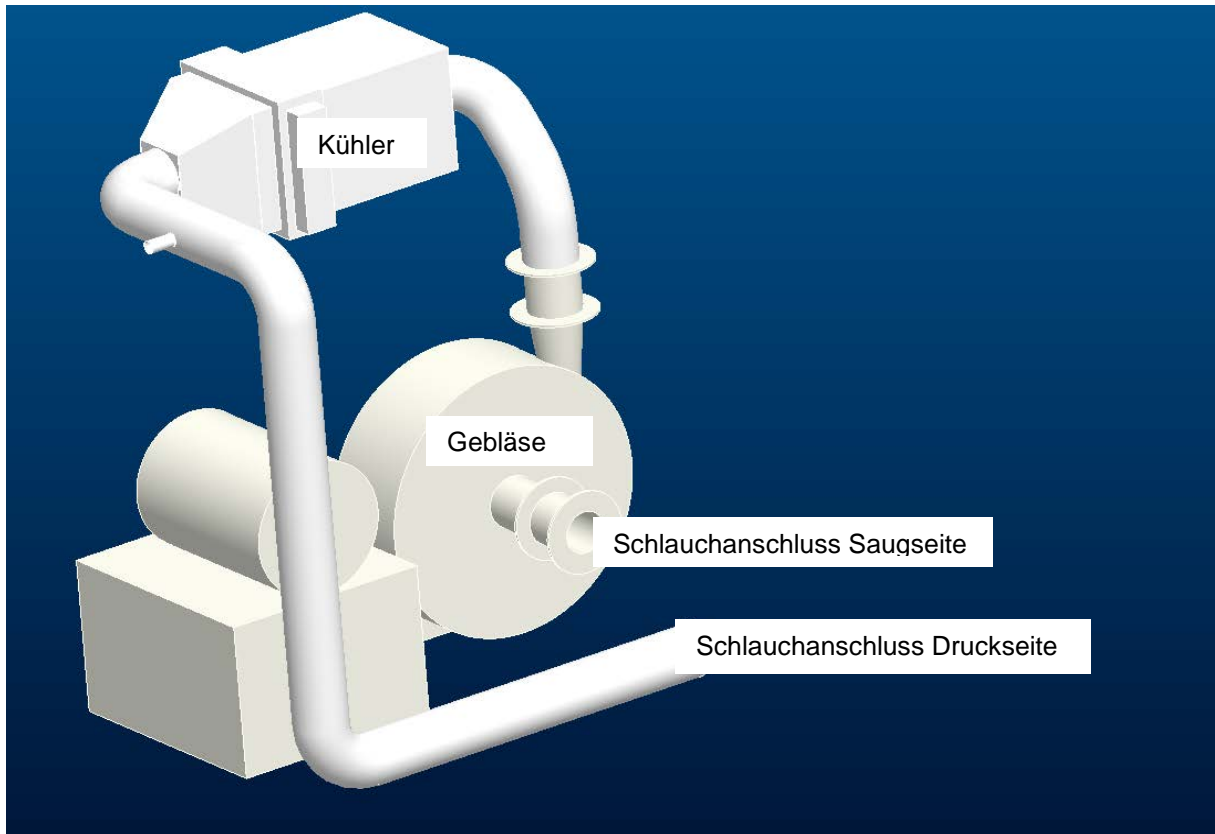


Bild 4: Übersicht Aufbau des Luftkreislaufes

In Bild 5 ist der aufgebaute Luftkreislauf dargestellt. Zu sehen ist das Gebläse sowie die Luftzu- und abführung vom Versuchskanal und der verwendete Schlauch. Des Weiteren ist auch der Frequenzumrichter zu sehen, dieser wird verwendet um den nötigen Betriebspunkt im Versuch einzustellen. Die Verbindung zwischen Gebläse und Kühler ist in Bild 6 dargestellt, während in Bild 7 die Verrohrung am Austritt des Kühlers zu sehen ist.

Vorhaben-Nr.: 2F

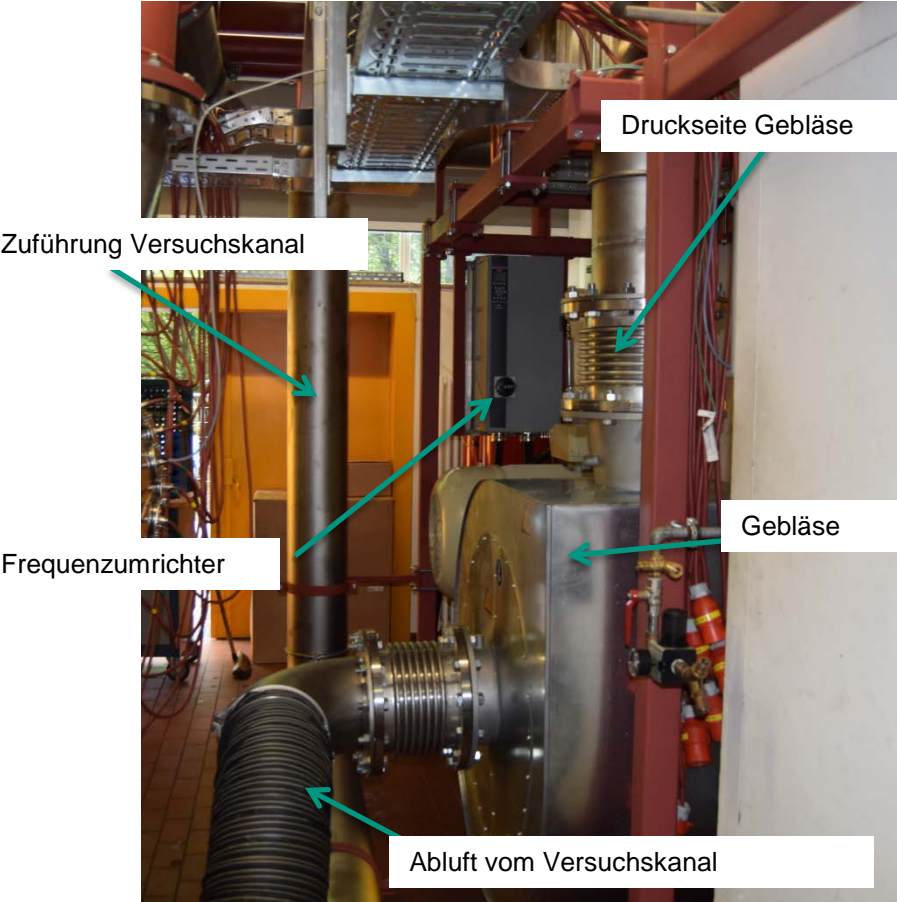


Bild 5: Übersicht Luftkreislauf

Vorhaben-Nr.: 2F



Kühler

Zuführung Kühler

Bild 7: Verbindung Gebläse Kühler



Zuführung Versuchs-kanal

Bild 6: Verrohrung Austritt Kühler

Vorhaben-Nr.: 2F

AP 3: Inbetriebnahme, Überprüfung der Dichtheit des Sekundärluftkreislaufs. Der geschlossene Luftkreislauf wurde erfolgreich in Betrieb genommen. Da der nicht zu diesem Projekt gehörende Versuchskanal noch nicht zur Verfügung stand, wurde der Kreislauf stattdessen mit einem Schlauch kurzgeschlossen. Diese Konfiguration ist in Bild 8 dargestellt. Es konnte bei der Inbetriebnahme gezeigt werden, dass das Gebläse den geforderten Anforderungen entspricht. Die erforderliche Motordrehzahl konnte wie vorgesehen über den Frequenzumrichter eingestellt werden. Die durch das Gebläse eingebrachte Wärme entspricht den Herstellerangaben und kann über den Wärmetauscher dem Kreislauf wieder entzogen werden.

Wie bereits dargelegt wird der Massenstrom durch die Bohrungen bestimmt, indem der zugeführte Luftmassenstrom gemessen wird. Diese Annahme ist allerdings nur gültig, wenn der Kanal dicht ist. Bei der Inbetriebnahme des Kanals wurde die Dichtheit überprüft und konnte dabei nachgewiesen werden.

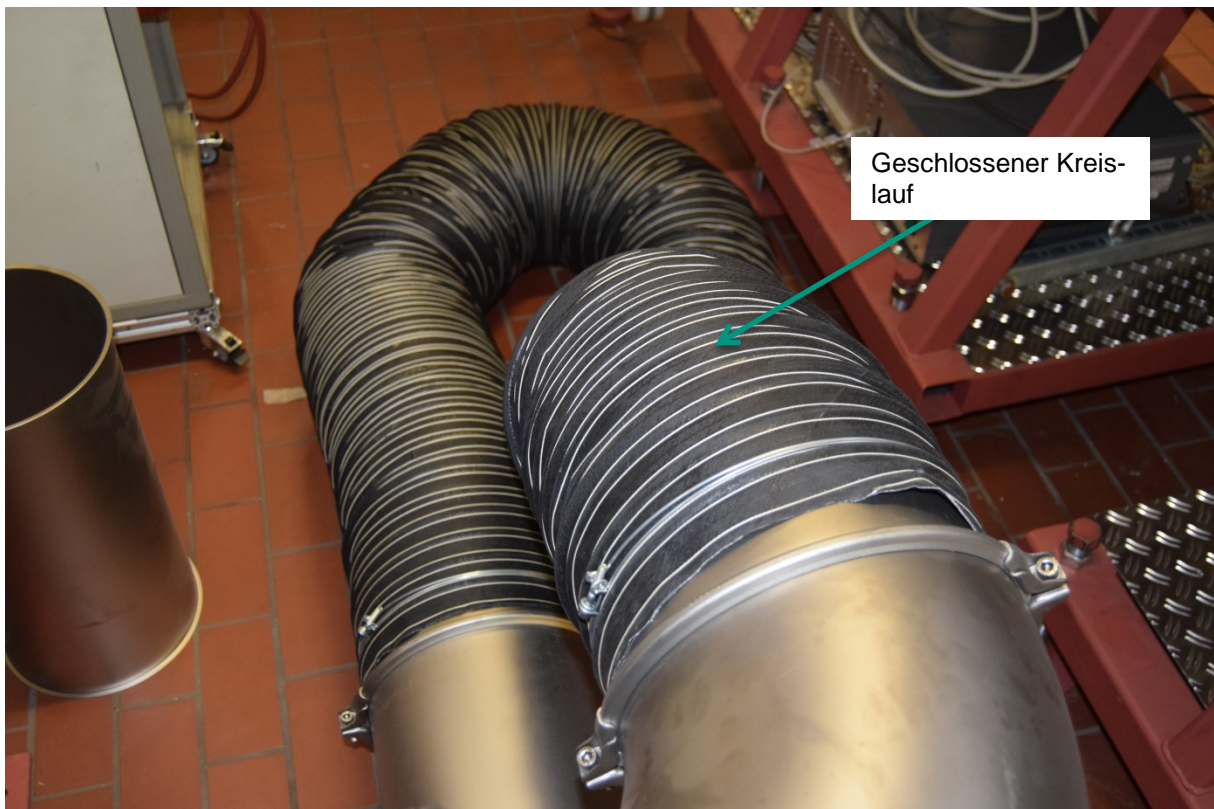


Bild 8: Geschlossener Kreislauf für Inbetriebnahme

Vorhaben-Nr.: 2F

AP 4: Überprüfung der aerodynamischen Parameter und des Strömungsprofils in der Kühlluftpassage. Der in diesem Projekt aufgebaute Versuchsstand soll verwendet werden, um Querströmungseinflüsse für Filmkühlbohrungen zu untersuchen. Wie bereits im Projektantrag erläutert, wird der aufgebaute Kreislauf mit einem im Rahmen des AG-Turbo Projektes Cooreflex 3.3.1 aufgebauten Versuchskanal kombiniert. Wegen der Komplexität des 3.3.1 Versuchsstandes kam es hier jedoch zu Verzögerungen im Projekt. Aufgrund dieser Verzögerungen konnten das Anströmprofil und die aerodynamischen Parameter noch nicht überprüft werden.

Fazit

Im Rahmen des Projektes wurden ein Gebläse und der dazugehörige Luftkreislauf ausgelegt und aufgebaut. Durch den Kanal werden in Zukunft detaillierte Messungen von Strömungseffekten auf der Schaufelinnenseite für mehrere parallele Bohrungen möglich sein. Der Kanal stellt somit einen deutlichen Mehrwert im Vergleich zum vorherigen Zustand dar und wird seinen Beitrag dazu leisten, Effekte in Filmkühlbohrungen besser zu verstehen und deren Effektivität zu erhöhen. Die Dichtheit des Kanals konnte nachgewiesen werden, somit ist eine hohe Genauigkeit in der Bestimmung des Massenstroms durch die Filmkühlbohrungen möglich.

Vorhaben-Nr.: 2F**– der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die in diesem Vorhaben bewilligten Fördermittel wurden für Personal-, Sach- und Investitionsmittel eingesetzt. Die Höhe und Verwendung der einzelnen Fördermittel ist detailliert im zahlenmäßigen Nachweis VNZA nach 6.2.2 AnBest-P gegeben. Nachfolgend wird auf die wichtigsten Positionen eingegangen.

Personalmittel: Für 1,5 Monate war ein wissenschaftlicher Mitarbeiter mit abgeschlossenem technischem Universitätsstudium (0812) für die Bearbeitung der Auslegung des Gebläses und die Konstruktion des Sekundärluftkreislaufes erforderlich. Studentische Hilfskräfte (0822) wurden zur Unterstützung des Wissenschaftlers eingesetzt.

Investitionen und Sachmittel: Bei den Investitionen (0850) handelt es sich um das erforderliche Radialgebläse.

Weiterhin wurden von Seiten des Instituts für Thermische Strömungsmaschinen erhebliche Leistungen erbracht, die zu einem erfolgreichen Abschluss des Forschungsvorhabens in der zur Verfügung stehenden Zeit führten. Dabei handelte es sich in erster Linie um wissenschaftliche Anleitung der Projektsachbearbeiter und Infrastrukturmaßnahmen, wie z.B. die Bereitstellung eines elektrischen Anschlusses für das Sekundärluftgebläse.

– der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit der vor dem Projekt vorhandenen Infrastruktur war es nicht möglich, 5 parallele Bohrungen gleichzeitig mit Kühlluft zu versorgen und gleichzeitig realistische Reynoldszahlen im Kühlluftkanal zu gewährleisten. Da die Strahlinteraktion jedoch einen großen Einfluss auf die Filmkühleffektivität hat war es notwendig, die vorhandene Infrastruktur aufzurüsten. Damit können in Untersuchungen realistischere Randbedingungen eingestellt und Bohrungen zielgerichteter optimiert werden.

– des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der aufgebaute Kanal ermöglicht es, mehrere parallele Filmkühlbohrungen unter Anströmung auf der Kaltluftseite zu untersuchen. Damit kann die Interaktion der einzelnen Strahlen und der Effekt der Strömung auf der Kanalunterseite zeitgleich untersucht werden. Der variable Aufbau mit Schläuchen ermöglicht es, die Orientierung des Kühlluftkanals zum Heißluftkanal zu variieren und somit unterschiedliche Bedingungen in einer Gasturbinenschaufel abzubilden. Durch das beschaffte Gebläse kann auch der Einfluss unterschiedlicher Reynoldszahlen auf der Kaltluftseite untersucht werden.

– des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Bei anderen Stellen sind keine Fortschritte bekannt.

Vorhaben-Nr.: 2F

– der erfolgten und geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

Die das Vorhaben in wesentlichen aus dem Aufbau eines Kanals bestand, können noch keine wissenschaftlichen Erkenntnisse veröffentlicht werden. Zukünftige Ergebnisse unter Verwendung des aufgebauten Kreislaufes sollen aber auf internationalen Konferenzen einem breiten Fachpublikum zugänglich gemacht werden.

Literatur

Bunker, Ronald S. und Bailey, Jeremy C. 2001. Film Cooling Discharge Coefficient Measurements in a Turbulated Passage With Internal Crossflow. *Journal of Turbomachinery*. 2001, Bd. 123, 4, S. 774.

Gritsch, M., et al. 2000. Effect of Internal Coolant Crossflow Orientation on the Discharge Coefficient of Shaped Film-Cooling Holes. *Journal of Turbomachinery*. 2000, Bd. 122, 1, S. 146.

Gritsch, Michael, Schulz, Achmed und Wittig, Sigmar. 2001. Effect of Crossflows on the Discharge Coefficient of Film Cooling Holes With Varying Angles of Inclination and Orientation. *Journal of Turbomachinery*. 2001, Bd. 123, 4, S. 781.

Hay, N., Lampard, D. und Benmansour, S. 1983. Effect of Crossflows on the Discharge Coefficient of Film Cooling Holes. *Journal of Engineering for Power*. 1983, Bd. 105, 2, S. 243.

Heneka, C., Schulz, A. und Bauer, H.-J. 2011. Influence of internal parallel and v-shaped ribs on the discharge coefficient of a cylindrical film cooling hole. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2011, Bd. 225, 7, S. 985-994.

Heneka, Christian, Schulz, Achmed und Bauer, Hans-Jorg. 2010. Effect of Internal Rib Configurations on the Discharge Coefficient of a 30 deg-Inclined Film Cooling Hole. *Heat Transfer Research*. 2010, Bd. 41, 7, S. 769-786.

Saumweber, Christian, et al. 2001. Effects of Entrance Crossflow Directions to Film Cooling Holes. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2001, Bd. 934, 1, S. 401-408.

Thole, K. A., et al. 1997. Effect of a Crossflow at the Entrance to a Film-Cooling Hole. *Journal of Fluids Engineering*. 1997, Bd. 119, 3, S. 533.