

J. Woisetschläger (2004) *Thermografische Untersuchungen zur Optimierung von Strömungsvorgängen*, Tagungsband Bauphysiktagung, TU-Graz, pp 98 - 102

Thermografische Untersuchungen zur Optimierung von Strömungsvorgängen

Jakob Woisetschläger

Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik
Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25, A-8010 Graz, Österreich
jakob.woisetschlaeger@tugraz.at

Kurzfassung: Die Notwendigkeit einer Reduktion der Kohlendioxidemissionen führt zu neuen Kraftwerkskonzepten. Daher findet zur Zeit ein weltweiter Wettstreit bei der Entwicklung neuer Technologien zur Kohlendioxidrückhaltung statt, bei denen es sowohl um die eigentliche Rückhaltung bei der Emission, als auch um die Endlagerung des eingefangenen Kohlendioxids geht. Seit 1987 werden an der Technischen Universität Graz Forschungsarbeiten in dieser Richtung durchgeführt, die zur Entwicklung des international als „Graz Cycle“ bezeichneten Kraftwerksprozesses geführt haben, der eine vollständige Rückhaltung aller Emissionen erlaubt. Kernstück eines solchen innovativen Kraftwerksprozesses sind neuartige Turbinen, welche sich durch höhere Temperaturen, neuartige Werkstoffe, besseres aerodynamisches Design und moderne Kühltechnologien bei gleichzeitiger Kostenoptimierung auszeichnen. Für diese Entwicklungsarbeiten steht an der Technischen Universität eine 3MW Verdichteranlage zur Verfügung, die große, unter hohem Druck stehende Luftmengen zu Prüfständen liefern kann. In diesen Prüfständen werden moderne Turbinenstufen kontinuierlich im Überschallbereich durchströmt und untersucht. Aufgrund der rauen Bedingungen in diesen Maschinen müssen Strömungen und Oberflächentemperaturen berührungsfrei mittels laser-optischen Verfahren und Thermografie erfasst werden. Der Einsatz thermografischer Verfahren ermöglichte die Entwicklung einer neuartigen Filmkühlung für thermisch hochbeanspruchte Gasturbinen. Detaillierte thermografische Untersuchungen solcher innovativer Überschallkühlfilme wurden im stationären Überschallwindkanal der Technischen Universität Graz durchgeführt und führten zur Erteilung eines Patentes.

Einleitung

80% der Energieproduktion der Menschheit basiert auf fossilen Brennstoffen wie Öl, Gas oder Kohle. Aufgrund des wachsenden Bedarfs an Energie in den Entwicklungsländern und China prognostiziert die Internationale Energie Behörde (IEA) auch zukünftig starke Investitionen in die Erzeugung elektrischer Energie mittels fossiler Brennstoffe [1]. Eng verknüpft mit diesem erhöhten Bedarf an fossilen Brennstoffen ist eine Zunahme an Kohlendioxidemissionen. Vorhersagen des Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) sprechen von einer Beeinflussung der Atmosphäre durch die Emission von Treibhausgasen, welche zu einer weltweiten Klimaänderung führen wird [2]. Zur Zeit wird diskutiert in welchem Ausmaß eine Erhöhung der anthropogenen Emission - insbesondere des Kohlendioxids (CO_2) - Einfluss auf ein zukünftiges Klima haben wird. Sicher ist jedoch, dass die Stärke und die Häufigkeit extremer Wettersituationen zunehmen wird [3].

Die Erhöhung der Effizienz moderner Kraftwerke bei der Erzeugung elektrischer Energie ist eine Möglichkeit die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren. Während in den späten 60er Jahren des 20. Jahrhunderts die Effizienz in der Erzeugung elektrischer Energie aus fossilen Brennstoffen bei weniger als 40% lag, stieg diese bis heute auf 60%. Zusätzlich benutzen Kraftwerke mit Kraft-Wärmekopplung die Restwärme für Heizungs- und Kühlzwecke und ermöglichen Kraftwerksgesamtwirkungsgrade von mehr als 90%.

Eine weitere Möglichkeit ist die Umstellung der Kraftwerke auf Gas anstelle von Kohle, da bei Gas lediglich 370kg CO_2 je MW erzeugter Leistung freigesetzt wird, wogegen bei Kohle dieser Wert bei 870kg/MW liegt. Leider ist in den bevölkerungsreichen Regionen (China, Indien) Gas nicht in ausreichender Menge vorhanden.

Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit verschiedene Methoden vorgeschlagen um CO_2 aus dem Abgas auszuschleiden oder den Brennstoff gleich vor der Verbrennung in ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff umzuwandeln [4, 5]. Ein neuartiger Aspekt bei dieser Technologie ist neben der Kohlendioxidrückhaltung die mögliche Feuerung der Turbinen mit Wasserstoff.

Die Konzentration des CO_2 im Abgas kann durch direkte Verbrennung des fossilen Brennstoffs mit Sauerstoff anstelle von Luft erhöht werden (Solche Anlagen zur Sauerstoffgewinnung sind bereits heute großtechnisch verfügbar). In einem solchen Kraftwerkskreisprozess würde das Arbeitsmedium lediglich aus Dampf (aus dem Verbrennungswasser) und CO_2 bestehen, wobei während des Betriebes einer solchen Anlage CO_2 und Wasser in genau jener Menge entnommen werden, in welcher diese bei der Verbrennung erzeugt wurden. Ein solcher Kreisprozess wurde 1987 erstmals von H. Jericha an der Technischen Universität Graz vorgestellt und wird in der internationalen Literatur als „Graz-Cycle“ geführt [6, 7] (Abbildung 1).

Da durch die direkte Verbrennung mit Sauerstoff sehr hohe Temperaturen entstehen und durch die Verwendung von CO_2 und Dampf eine anderes Arbeitsmedium als in konventionellen Turbinen zum Einsatz kommt, werden an die im Graz Cycle verwendeten Turbinen besondere Herausforderungen gestellt. Hohe Drehzahlen, Überschallströmungen, hohe Temperaturen und eine Vielzahl von instationären Effekten zeichnen diese Maschinen aus.

Versuchseinrichtungen

Am Institut für Thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik der Technischen Universität Graz wurden spezielle Prüfstände errichtet, die eine Untersuchung moderner Turbinenstufen und deren Beschaukelung erlauben. Ziel dieser Untersuchungen ist die Gewinnung realer Daten um in weiterer Folge numerische Algorithmen zu entwickeln, die ein wertvolles Hilfsmittel für den Konstrukteur solcher Maschinen darstellen.

Im zweiten Kellergeschoss des Institutes versorgt eine Verdichterstation (mit max. 3MW elektrischer Leistungsaufnahme) die einzelnen Prüfstände (Abbildung 2). Im ersten Kellergeschoss ist dies ein Turbinenschaukelprüfstand in einem feuerfesten Labor und in der Laborhalle des Erdgeschosses wird eine Überschallversuchsturbine mit diesen großen Mengen an Druckluft versorgt.

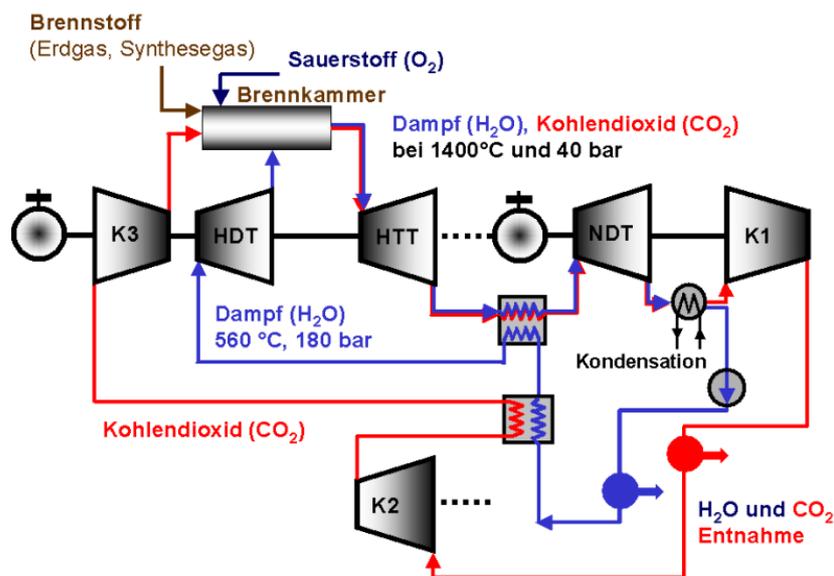


Abb.1 Schaltung des „Graz-Cycle“ (Oxyfuel-plant). In diesem Kraftwerksprozess kann das CO_2 durch direkte Verbrennung mit Sauerstoff und Verwendung eines Arbeitsmediums aus Dampf und CO_2 direkt aufgefangen werden. Mit HTT wird die Hochtemperaturturbinen, mit HDT und NDT die Hoch- und die Niederdruckturbinen und mit K die Kompressoren bezeichnet.

In der rauen Umgebung von Überschallströmung und schnell rotierenden Turbinen kommt es zu einem hohen Verschleiß an Messsonden sowie zu Fehlanströmungen. Aus diesem Grund werden verstärkt laseroptische und thermografische Systeme zur Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturen herangezogen. Hierzu wird durch spezielle Sichtfenster optischer Zugang auch im infraroten Wellenlängenbereich gewährt. Einige der verwendeten Messsysteme sind in Abbildung 3 dargestellt.

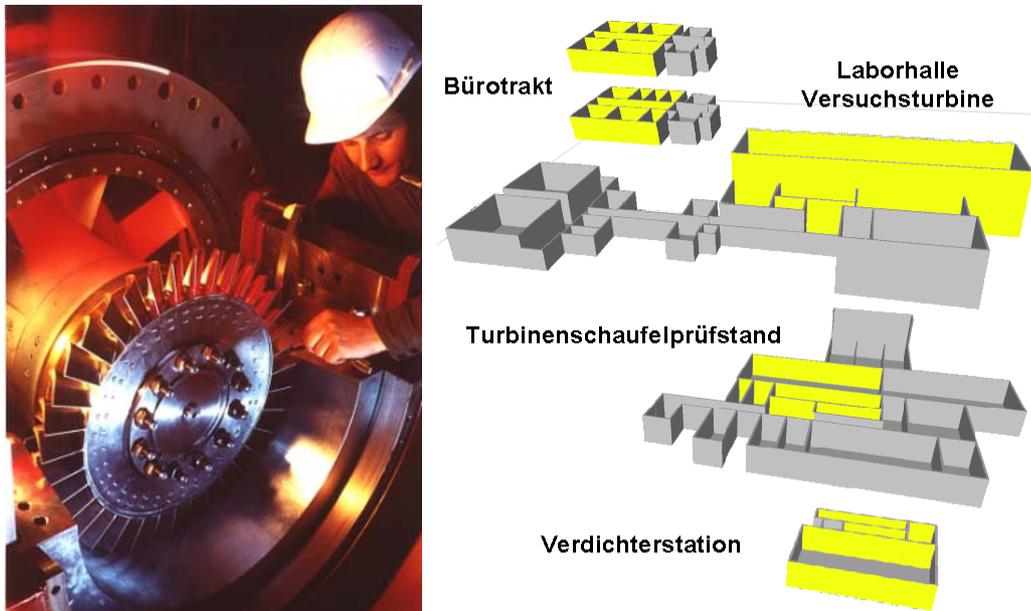


Abb.2 Versuchsturbine und Raumplan des Institutes für Thermische Turbomaschinen der Technischen Universität Graz. Im zweiten Kellergeschoss befindet sich eine 3MW Verdichterstation, die 15 kg Luft pro Sekunde bei einem Druckverhältnis von etwa 3 zu den einzelnen Prüfständen liefern kann. Neben einem Schaufelgitterprüfstand befindet sich auch eine Überschallversuchsturbine (Drehzahl 11.500 Upm, Mach 1,4) am Institut. Links im Bild ist die einstufige Versuchsturbine zu sehen.

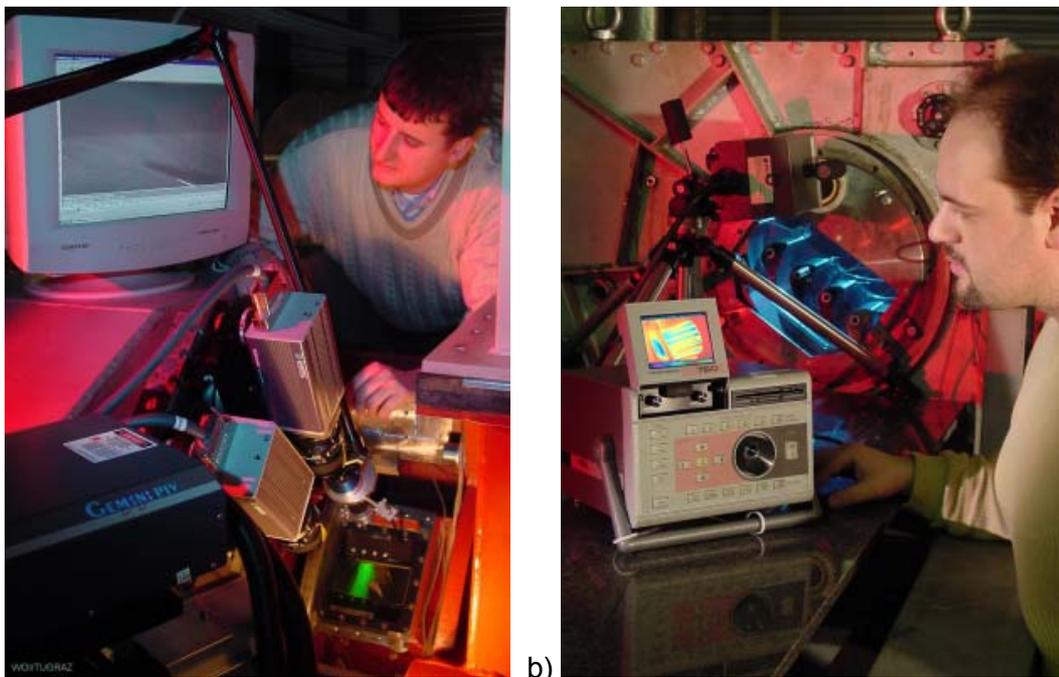


Abb.3 a) Stereoskopische Particle-Image-Velocimetry (3D-PIV) und Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) im Einsatz an der Überschallversuchsturbine; **b)** Verwendung einer thermografischen Kamera zur Entwicklung optimierter Kühlfilmausbläsung an Turbinenschaufeln. (Inframetrics 760 heute FLIR, in Österreich NBN-Elektronik)

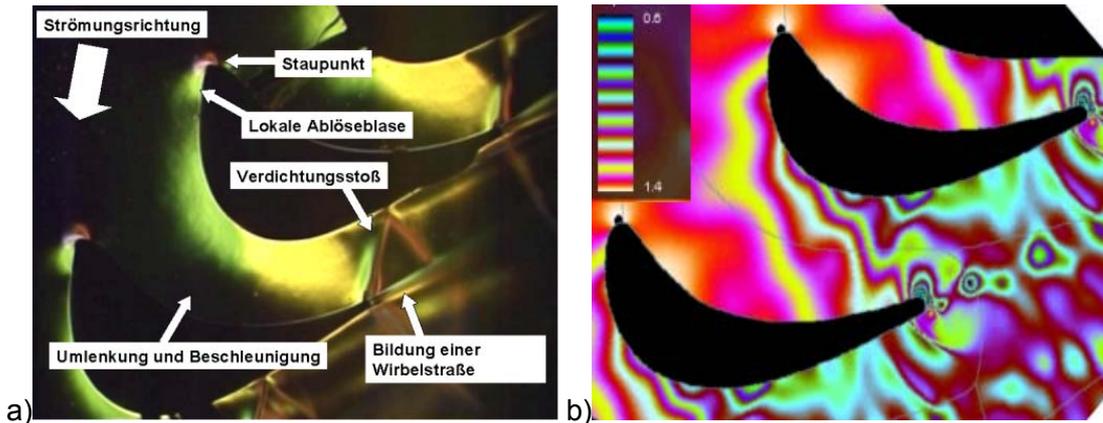


Abb.4 a) Schlierenvisualisierung der Strömung durch ein Turbinenschaufelgitter, **b)** Vergleichende numerische Strömungsberechnung [8, 9]

Um in einer Gasturbine mit einer geringen Zahl von Turbinenstufen auskommen zu können, wurde in der Vergangenheit das Druckverhältnis über ein Stufe ständig erhöht. Dies führte zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bis zur Überschallgeschwindigkeit, sodass in modernen Turbinen Verdichtungsstöße und starke Druckgradienten die Strömung dominieren (Abbildung 4). Grenzschichtströmungen und insbesondere die aus der Turbinenschaufeloberfläche ausgeblasenen Kühlfilme werden durch diese Störungen besonders stark beeinflusst.

Thermografische Untersuchung innovativer Kühlfilme zur Turbinenschaufelkühlung - Versuchsaufbau

Um Turbinenschaufeln vor den hohen Temperaturen der Hauptströmung aus der Brennkammer schützen zu können (bis 1500°C ; weit über der ertragbaren Materialtemperatur), wird verhältnismäßige kühle Luft durch das Schaufelinnere zur Oberfläche geleitet, wo diese Kühlluft durch kleine Schlitze oder Bohrungen austritt. Diese ausströmende Luft soll sich dann als schützender Film an die Schaufeloberfläche legen. In vielen Fällen durchschlägt der Kühlfilm aber die Strömungsgrenzschicht und wird von der Hauptströmung verblasen oder wird durch starke Druckschwankungen sogar in die Kühlbohrungen zurückgedrückt, wobei insbesondere der Bereich der Schaufelnase von diesen Druckschwankungen stark betroffen ist.

Daher wurde an der Technischen Universität Graz ein neuartiges Kühlsystem entwickelt, welches das hohe Druckverhältnis moderner Turbinen ausnützt [10-16]. Hierbei tritt der Kühlfilm überkritisch aus der Schaufelnase aus, d.h. die Strömung erricht im engsten Querschnitt des Kühlschlitzes Schallgeschwindigkeit. Beim Austritt aus der (schrägen) Öffnung kommt es zur Bildung eines Prandtl-Meyer Expansionsfächers, der den Kühlfilm fest an einer der Oberfläche haften lässt. (Abbildung 5)

Ein linear angeordnetes Array dieser Turbinenschaufeln wurde im Überschallwindkanal des Institutes untersucht, wobei der optische Zugang über Fenster aus Barium-Fluorid (75 mm Durchmesser, 5 mm Stärke, Intépro BV oder CRYSTAL GmbH) sowie goldbeschichtete Oberflächenspiegel gewährleistet wurde. Der von 1 abweichende Transmissionsgrad dieser Fenster im Infraroten wird herstellerseitig angegeben. Die Oberflächentemperatur des Glases wurde

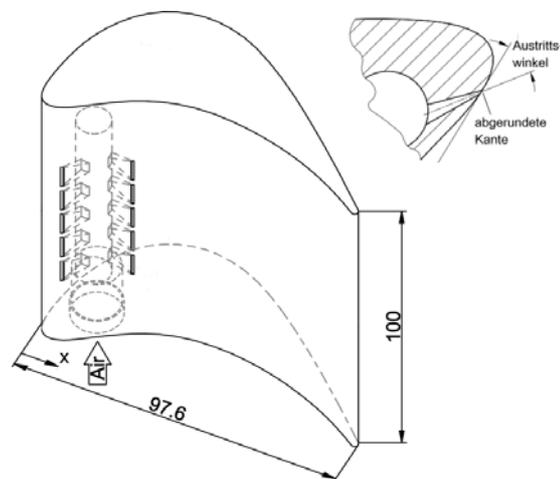


Abb.5 Schaufelgeometrie und Kühlfilmaustritt [16]

zur Kompensation der Messungen mittels eines Thermoelements ermittelt. Die Randbedingungen (Druck und Temperatur in der Zuströmung, Druck und Temperatur in der Abströmung des Schaufelgitters) wurden mittels Scanivalve ZOC14NP/16Px-50 psid und National-Instruments AT-MIO-16H-9 A/D-Wandlerkarte, sowie K-Typ Thermoelemente und Burr Brown PCI 200010T-2 Anschlussplatinen während der Messung kontinuierlich aufgezeichnet (die Datenauswertung erfolgte mit National Instruments LABVIEW Routinen). Eben solche Druck- und Temperaturmessstellen befanden sich in der Zuleitung des Kühlmediums zu den Turbinenschaufeln. Als Kühlmedium wurde entweder Luft oder Kohlendioxid verwendet. Letzteres wird bei den geringeren Versuchstemperaturen benutzt um das richtige Dichteverhältnis zwischen heißer Hauptströmung und kaltem Kühlmedium richtig darzustellen. Die Erfassung der Durchflussmenge des Kühlmediums erfolgte mit einem Durchflussmessgerät ½-27-GNSVT-45 der Firma Fischer Bailey & Porter sowie der dazu gelieferten Software (benötigt Druck und Temperatur als zusätzliche Eingabe). Der Volumenstrom der Hauptströmung wurde mittels Normblenden in den Verdichterzuleitungen erfasst. Um den hohen Turbulenzgrad einer Turbinenströmung (aus der Brennkammer) richtig simulieren zu können, kamen Turbulenzgitter zum Einsatz, die in der Zuströmung angebracht durch die an den einzelnen Gitterstäben entstehenden Wirbelstraßen und deren Zerfall eine Turbulenzerhöhung bis 10% Turbulenzgrad ermöglichten. (Der Turbulenzgrad wird definiert als das Verhältnis zwischen Schwankungswert einer Strömungsgröße zu deren Mittelwert). Für die in hier vorgestellte Arbeit ergaben sich die in Tabelle 1 dargestellten Randbedingungen.

Tab.1 Strömungsbedingungen bei der Untersuchung innovativer Kühlfilme

Hauptströmung	Zuströmung	Abströmung	Kühlfilm	Zuströmung
Totaltemperatur [K]	332		Totaltemperatur [K]	299,5
Totaldruck [bar]	2,11		Druckverhältnis (aus Totaldruck Kühlfilm zu Totaldruck Hauptströmung)	1,99
statischer Druck [bar]		1,01		
isentropische Machzahl	0,39	1,08		
Turbulenzgrad [%]	4			

Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur der Turbinenschaufeln kam eine thermografische Kamera der Firma INFRAMETRICS (Modell 760, heute FLIR, in Österreich nbn-Elektronik) zum Einsatz. Dieses System verwendet einen Quecksilber/Cadmium/Tellur Detektor der von einem Sterling-Kühler auf 77K gekühlt wird. Durch ein einstellbares Filterrad kann zwischen verschiedenen Frequenzbändern im Infraroten gewählt werden (3-5 μm , 8-12 μm), sodass der Temperaturbereich je nach eingestellten Bereich bis 100°C (normal), bzw. bis 1000°C (extended) bei Maximaltemperaturen von -20 bis 400°C (normal) und 20 bis 1500°C (extended) betragen kann. Durch die normale Alterung des Detektors und die dadurch erforderlichen regelmäßigen Kalibrierungen des Detektors beim Hersteller beträgt die absolute Genauigkeit der Temperaturmessung $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (worst case). Um eine flächenhafte Aufzeichnung der Temperatur zu ermöglichen, kommen bei diesem System zwei schnell rotierende Spiegel als Scannereinheit zum Einsatz, die entweder beide gemeinsam (Kamerafunktion, 256 x 255 Pixel, 50Hz, 3:4 aspect ratio) oder einzeln (schnelle Zeilenkamera 256 Pixel mit 7800 Hz Wiederholrate) betrieben werden können. Durch die Verwendung eines einzelnen Detektors und die Möglichkeit der Mittelung mehrerer Aufnahmen ergibt sich allerdings die Möglichkeit relative Temperaturmessungen innerhalb eines Feldes mit einer Genauigkeit besser $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ durchzuführen.

Um die Effizienz des Kühlfilms optimal bestimmen zu können, muss die Wärmeleitung des Schaufelmaterials vernachlässigt werden können. Aus diesem Grund wurden die Messungen bei geringeren Temperaturen als den in der Turbine auftretenden, mit Schaufeln aus Acrylglas durchgeführt (0.18 W/mK).

Die Messung der Temperatur über die abgegebene Strahlung beruht auf dem im Planck'schen Strahlungsgesetz beschriebenen Zusammenhang zwischen der Temperatur und der in einem bestimmten Wellenlängenbereich abgegebenen Strahlung. Dieses Gesetz

gilt nur für den idealen „schwarzen“ Strahler (Emissionsgrad $\varepsilon = 1$). Für reale Materialien liegt dieser Wert unter 1, wobei ein sehr geringer Wert - wie z.B. bei poliertem Aluminium $\varepsilon = 0,04$ - bedeutet, dass dieses Material hauptsächlich die Infrarotstrahlung der Umgebung reflektiert (im Falle des polierten Aluminiums sind so 96% der detektierten Infrarotstrahlung reflektierte Umgebungsstrahlung). Aus diesem Grund wurden die Turbinenschaufeln mit einem schwarzen Hochtemperaturlack beschichtet, dessen Emissionsgrad bekannt war. Thermografische Messsysteme erlauben die Eingabe des Emissionsgrades und der Umgebungstemperatur um bei Emissionsgraden kleiner 1 für die reflektierte Infrarotstrahlung kompensieren zu können. In Tabelle 2 sind zum Vergleich die Emissionsgrade einiger gängiger Materialien angegeben [17]:

Um die Wirkung der Kühlfilme über die gesamte Schaufeloberfläche vermessen zu können wurde die thermografische Kamera unter verschiedenen Winkel auf die Oberfläche gerichtet. Diese verschiedenen Anordnungen sind in Abbildung 6 dargestellt.

Tab.2 Anhaltswerte für den Emissionsgrade gängiger Materialien [17] (Wasser und Fensterglas sind im betrachteten IR-Bereich nicht transparent)

Material	Emissiongrad	Material	Emissiongrad	Material	Emissiongrad
Acrylglas	0,86	Farbe (schwarz)	0,90 – 0,99	menschliche Haut	0,98
Aluminium	0,04 - 0,05	Gusseisen poliert	0,2 – 0,3	Papier	0,8 – 0,9
Aluminium oxidiert	0,1 - 0,2	Gusseisen oxidiert, rostig	0,6 – 0,9	Ruß	0,95 – 0,96
Beton	0,92	Glas (Fenster)	0,94 – 0,96	Stahl poliert	0,07
Erdboden, Sand (Wassergehalt !)	0,9 – 0,95	Holz	0,9	Stahl oxidiert, rau	0,8 – 0,9
Fiberglas	0,75	Kupfer	0,02 – 0,07	Wasser(oberfläche)	0,96
Farbe (weiß)	0,85 – 0,95	Kupferoxid	0,5 – 0,6	Ziegel	0,8 – 0,9

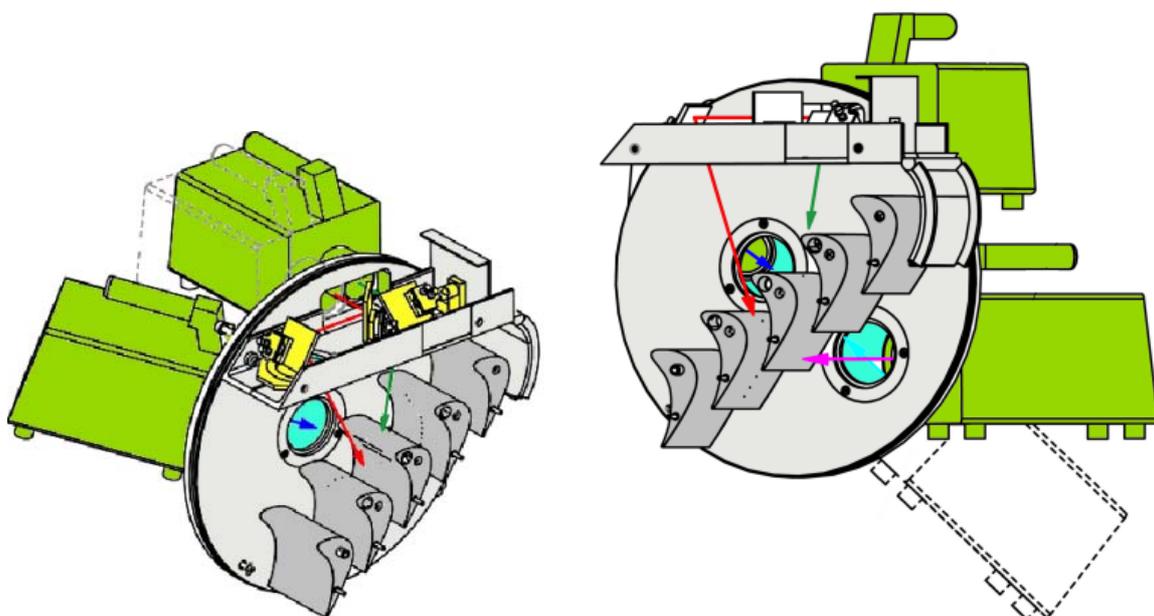


Abb. 6 Anordnung der thermografischen Kamera zur Beobachtung der gesamten gekühlten Turbinenschaufeloberfläche [16]

Die starke Krümmung der Schaufeloberfläche und die damit verbundenen unterschiedlichen Perspektiven der Beobachtung bringen allerdings das Problem mit sich, dass in einigen Richtungen der Beobachtungswinkel in Bezug auf die Oberflächennormale sehr groß wird. Wie jede Strahlung wird auch IR richtungsabhängig von der Oberfläche emittiert, sodass streifende Messungen das Ergebnis stark verfälschen kann. Für die meisten nichtleitenden Materialien ist der Emissionsgrad bis zu einem Winkel von etwa 60° von der Oberflächennormalen nahezu konstant um dann schnell abzunehmen (Abbildung 7)

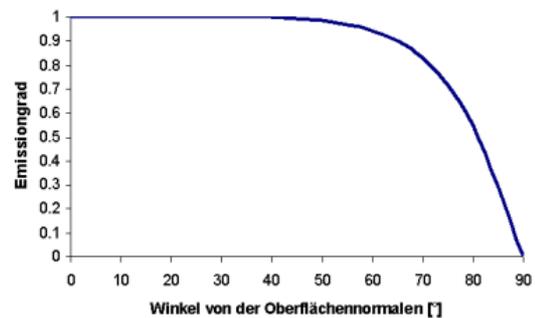


Abb.7 Beispiel für die Abhängigkeit des Emissionsgrades von der Beobachtungsrichtung (vgl. [17,18]). Angegeben ist die relative Änderung des Emissionsgrades in Abhängigkeit vom Winkel zwischen Beobachtungsrichtung und Oberflächennormale

Bei streifender Beobachtung kann es daher zur Beeinträchtigung der Messergebnisse kommen. Um diesem Fehler entgegenzuwirken, wurden Referenzaufnahmen bei konstanter Oberflächentemperatur aufgezeichnet. Zusätzlich wurden an bestimmten Punkten der Oberfläche mit Hilfe von Thermoelementen die Oberflächentemperatur bestimmt. Diese Punkte müssen im Gesichtsfeld der Kamera erscheinen und werden dann zur Kontrolle herangezogen um auch absolute Temperaturen sicher angeben zu können.

Bei allen grauen Strahlern (Emissionsgrad kleiner als 1) muss eine Umgebungstemperatur mitbestimmt werden, also jene Temperatur bei der die innere Oberfläche des Prüfstandes im Mittel gleichmäßig abstrahlt. Hierfür wurde die Strömungstemperatur herangezogen. Im Prinzip wäre es noch möglich über Stücke von Aluminiumfolien (die an Teilen der Turbinenschaufeloberfläche angebracht werden) die Abstrahlung der umgebenden Oberflächen in Reflexion zu beobachten, was eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit ermöglicht.

Bei allen grauen Strahlern (Emissionsgrad kleiner als 1) muss eine Umgebungstemperatur mitbestimmt werden, also jene Temperatur bei der die innere Oberfläche des Prüfstandes im Mittel gleichmäßig abstrahlt. Hierfür wurde die Strömungstemperatur herangezogen. Im Prinzip wäre es noch möglich über Stücke von Aluminiumfolien (die an Teilen der Turbinenschaufeloberfläche angebracht werden) die Abstrahlung der umgebenden Oberflächen in Reflexion zu beobachten, was eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit ermöglicht.

Thermografische Untersuchung innovativer Kühlfilme zur Turbinenschaufelkühlung - Ergebnisse

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die bei eingeschaltetem Kühlfilm gemessenen Temperaturverteilungen mit den unter gleicher Perspektive gemessenen Temperaturverteilungen ohne Kühlfilm referenziert. Das Ergebnis einer solchen Messung für den Bereich der Turbinenschaufelnase ist in Abbildung 8 dargestellt.

Um eine Aussage über die Qualität der neuen Filmkühlung zu erhalten, wurde die Kühlungseffizienz über die Schaufelhöhe gemittelt und mit einer konventionellen und heute üblichen Filmkühlung (Lochblasung bei geringer Druckdifferenz zwischen Kühlmedium und Hauptströmung) verglichen, wobei die konventionelle Filmkühlung unter vergleichbaren Bedingungen aufgenommen wurde (Abbildung 9).

In Abbildung 9 ist die Kühlungseffizienz für das innovative Kühlsystem (ICS) mit den Werten des konventionellen Kühlsystems (CCS) verglichen, indem die Kühlungseffizienzen über der Sehnenlänge s der Turbinenschaufel (s_{tot} gesamte Sehnenlänge) aufgetragen wurden. Deutlich ist zusehen, dass im Bereich der Schaufelnase, sowie im Bereich der thermisch höher belasteten Druckseite (konkave Schaufelseite) die Kühlungseffizienz deutlich verbessert wurde, während im Bereich der Saugseite (konvexe Seite der Turbinenschaufel) die Werte beider Kühlverfahren vergleichbar sind. Mit ein Grund für die vergleichsweise geringe Erhöhung der Kühlungseffizienz im Bereich der Saugseite ist die starke Beschleunigung der Strömung, die dort im Bereich von 67% der Sehnenlänge einen Verdichtungsstoß hervorruft (siehe auch Abbild 4a).

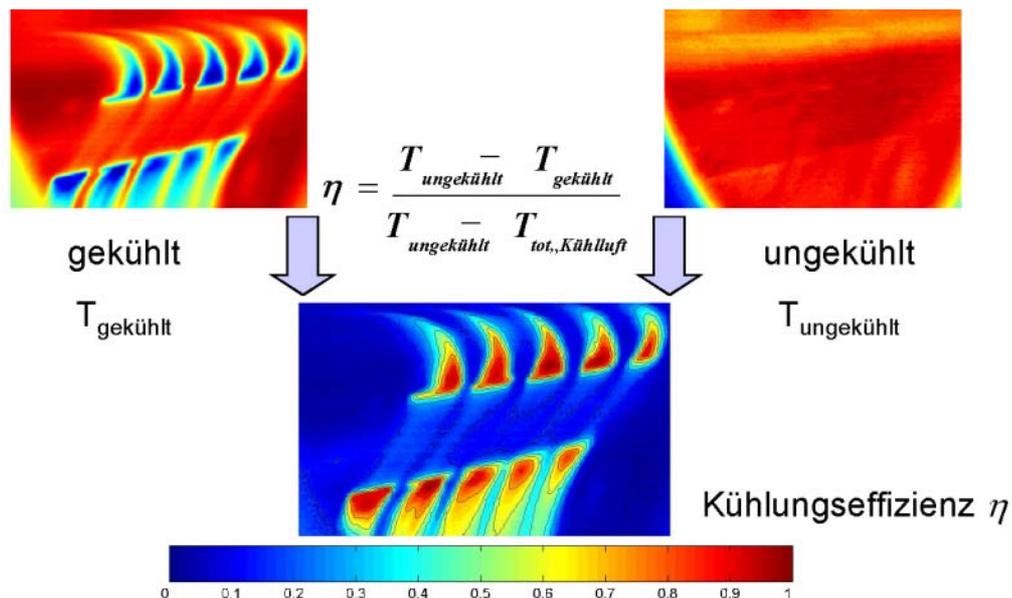


Abb. 8 Für die an der technischen Universität Graz entwickelte innovative Turbinenschaufelkühlung an der Turbinenschaufelnase ermittelte Kühlungseffizienz [16]

Der Kühlmassenstrom ist mit etwa 0,05 kg/s in beiden Fällen ungefähr gleich, allerdings ist für die innovative Turbinenschaufelkühlung ein erheblich höheres Druckverhältnis zwischen Kammer des Kühlmediums und dem Totaldruck in der Hauptströmung notwendig (fast 2 anstelle knapp über 1 im Falle der konventionellen Kühlung). Dies bedeutet, dass das Verhältnis zwischen dem aus der Schaufel ausgeblasenen Kühlfilmströmung und der Masse des durch einen Schaufelkanal strömenden Hauptstroms bei etwa 0,04 liegt.

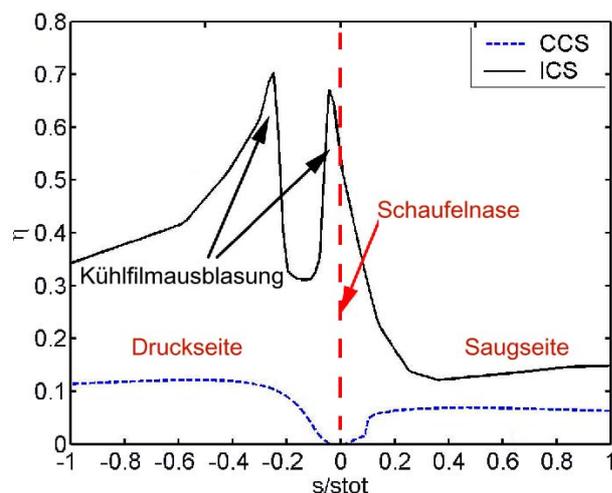


Abb. 9 Vergleich der Kühlungseffizienz der hier vorgestellten innovativen Filmkühlung (ICS) mit einer konventionellen (CCS) [16]

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Einsatz thermografischer Temperaturbestimmung zur Strömungsoptimierung anhand der Untersuchung eines neuartigen Kühlverfahrens für moderne Turbinenbeschaufelungen vorgestellt. Bei der Beschreibung des Versuchsaufbaus wurde vor allem auf die Problematik adiabater Oberflächen, bekannter Emissionskoeffizienten und deren Richtungsabhängigkeit, sowie auf Beobachtung durch IR-durchlässige Fenster und Spiegel eingegangen. Auf die Sinnhaftigkeit einer punktuellen Referenzierung durch Temperaturmessungen mittels Sonden wurde hingewiesen. Mittels der international üblichen Vergleichsgröße der Filmkühlungseffizienz konnte das Ergebnis der Messungen an dem neuen Kühlverfahren zu einem anderen, konventionellen Kühlverfahren für Turbinenschaufeln in Beziehung gesetzt werden.

Danksagung

Die Arbeiten zur Turbinenschaufelkühlung wurden von der europäischen Union im Rahmen des Projektes DITTUS gefördert. Die Entwicklung der optischen Messtechnik für die Untersuchung moderner transsonischer Turbinen erfolgte im START-Programm Y-57TEC des österreichischen Fonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung (FWF). Herrn Dipl.-Ing. Emil Göttlich sei für die Durchsicht des Manuskripts gedankt.

Literatur

- [1] International Energy Agency, 2002, "World Energy Outlook 2002", IEA (www.iea.org), Paris F
- [2] J. T. Houghton, Y Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dui, K. Maskell und C. A. Johnson, (2001) "Climate change 2001: The Scientific Basis", Intergovernmental Panel on Climate Change (www.ipcc.ch), Cambridge University Press
- [3] R. T. Watson and all IPCC authors, 2001 "Climate change 2001: Synthesis Report", Intergovernmental Panel on Climate Change (www.ipcc.ch), Cambridge University Press
- [4] K. Thambimuthu, J. Davidson und M. Gupta, 2002, "CO₂ Capture and Reuse", proceedings of the IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage, Regina, Canada 18-21 November 2002, published by the Energy research Centre of the Netherland, pp 31-52
- [5] J. Davison, P. Freund und A. Smith, 2001, "Putting carbon back into the ground", Report, IEA Greenhouse Gas R&D Program (www.ieagreen.org.uk), Cheltenham UK
- [6] H. Jericha, E. Göttlich, W. Sanz, und F. Heitmeir, 2003, "Design Optimization of the Graz Cycle Prototype Plant", Proc. ASME TURBO EXPO 2003, Atlanta, GA, paper GT2003-38120, (BEST PAPER AWARD) in print for ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, June 2004
- [7] H. Jericha, 1987, "Efficient steam cycle with internal combustion of hydrogen and stoichiometric oxygen for turbines and piston engines", Int. J. Hydrogen Energy, Vol.12, No.5, pp 345-354
- [8] J. Woisetschläger, N. Mayrhofer, B. Hampel, H. Lang und W. Sanz, 2003, „Laser-optical investigation of turbine wake flow“, Exp.Fluids 34, pp 371-378
- [9] P. Pieringer, W. Sanz und F. Neumayer, 2003, "Numerical investigation of the three-dimensional flow through a transonic turbine stage", Proceedings 5th European Conference on Turbomachinery, Praque, 2003, pp 1115-1131
- [10] J. Woisetschläger, H. Jericha, W. Sanz und F. Gollner, 1995, "Optical Investigation of Transonic Wall-Jet Film Cooling", ASME Cogen Turbo Power, Vienna '95, ASME Paper 95-CTP-26
- [11] A. Gehrler, J. Woisetschläger und H. Jericha, 1997, "Blade Film Cooling by Underexpanded Transonic Jet Layers", International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Orlando '97, ASME Paper 97-GT-246
- [12] J. Woisetschläger, H. Jericha, W. Sanz, H.P. Pirker, A. Seyr, und T. Ruckebauer, 1997, "Experimental Investigation of Transonic Wall-Jet Film Cooling in a Linear Cascade", Turbomachinery – Fluid Dynamics and Thermodynamics, Antwerpen '97, pp 447-451
- [13] S. Moser, H. Jericha, J. Woisetschläger, A. Gehrler und W. Reinalter, 1998, "The Influence of Pressure Pulses to an Innovative Turbine Blade Film Cooling System", International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Stockholm '98, ASME Paper 98-GT-545
- [14] S. Moser, M. Ivanisin, J. Woisetschläger und H. Jericha, H. 2000, "Novel Blade Cooling Engineering Solution", International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, Munich 2000, ASME Paper 2000-GT-242
- [15] E. Göttlich, H. Lang, W. Sanz und J. Woisetschläger, 2002, "Experimental Investigation of an Innovative Cooling System (ICS) for High Temperature Transonic Turbine Stages", ASME Turbo Expo 2002, Amsterdam, ASME Paper GT-2002-30341
- [16] E. Göttlich, L. Innocenti, A. Vasca, W. Sanz, J. Woisetschläger, B. Facchini, H. Jericha und E. Rossi, 2004, "Measurement and Simulation of a Transonic Innovative Cooling System (ICS) for High-Temperature Transonic Turbine Stages", ASME Turbo Expo 2004, Vienna, ASME Paper GT-2004-53712
- [17] W.L. Wolfe, G.J. Zissis [Eds], 1993, "The Infrared Handbook – Revised Edition", IRIA Series in Infrared & Electro-Optics, Environmental Research Institute of Michigan, Michigan
- [18] E. Gartenberg, 1996, "Infrared Thermography" in Lecture Series 1996-07, "Temperature Measurements", Ed. T.Arts, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode Sainte Genése, Belgium