

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES WÄRMEÜBERGANGS UND DER FILMKÜHLEFFEKTIVITÄT EINER DREIDIMENSIONALEN KONTURIERTEN TURBINENSEITENWAND

T. Hummel, J. Kneer, A. Schulz und H.-J. Bauer
Institut für Thermische Strömungsmaschinen
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Deutschland

Zusammenfassung

Mit einer dreidimensionalen Konturierung der Turbinenseitenwand wird signifikant in das komplexe Strömungsgebiet der Schaufelpassage eingegriffen (Schuepbach et al. [17]) und damit auch der Wärmeübergang maßgeblich beeinflusst (Simon et al. [19]). An filmgekühlten Seitenwänden ist eine zusätzliche Beeinflussung des Kühlfilms zu erwarten. Es liegt daher nahe eine gemeinsame Optimierung der Aerodynamik und des Wärmeübergangs durchzuführen. Am Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde ein Prüfstand zur Untersuchung des Wärmeübergangs an einer Turbinenseitenwand aufgebaut. Die Oberflächenkontur der Seitenwand wurde hinsichtlich der Reduktion aerodynamischer Verluste und der Sicherstellung einer homogenen Wandtemperaturverteilung optimiert. Die vorliegende Arbeit leistet durch die Implementierung einer komplexen Auswerteroutine für Filmkühluntersuchungen einen Beitrag zur experimentellen Untersuchung einer dreidimensionalen konturierten Turbinenseitenwand.

Das angewendete Verfahren zur Bestimmung der Filmkühlungskenngrößen ist das Superpositionsprinzip der Filmkühlung. Hierfür wird der Wärmeübergang an der Oberfläche einer mit Wasser konvektiv gekühlten Messplatte bestimmt. Zur Bestimmung des Wärmeübergangs werden sowohl die Temperaturen als auch die Wärmeströme an der Messplattenoberfläche benötigt. Die Oberflächentemperatur wird mittels Infrarotthermographie räumlich hochaufgelöst gemessen. Mit dieser Randbedingung wird eine FE-Berechnung des Temperaturfeldes im Festkörper durchgeführt und der konvektive Wärmestrom an der Oberfläche bestimmt. Durch Variation der Kühlwassertemperatur können bei Filmkühluntersuchungen der Wärmeübergangskoeffizient mit Filmkühlung und die adiabate Filmkühleffektivität anhand zweier Experimente mit jeweils unterschiedlichen thermischen Randbedingungen an der Wand bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine unausgereifte Auswerteroutine mit geringer Funktionalität durch eine gezielte Analyse weitreichend optimiert und signifikant im Funktionsumfang erweitert. Es steht nun ein Werkzeug zur Verfügung, um Wärmeübergangsuntersuchungen an dreidimensionalen konturierten Turbinenseitenwänden auszuwerten.

An einer exemplarisch durchgeführten und ausgewerteten Messung wird die Funktionsfähigkeit der Auswerteroutine gezeigt. Hierbei liegen die Temperaturen an 1,1 Mio. Punkten auf der Oberfläche mit einer Genauigkeit von 0,5 K vor. Die lokale adiabate Filmkühleffektivität, welche aus diesen Temperaturen und den Wärmeströmen berechnet wurde, steht erstmals für eine lokal gekühlte konturierte Seitenwand in dieser hohen Auflösung zur Verfügung. Anhand der Ergebnisse wird der Einfluss des Sekundärströmungssystems auf den Wärmeübergang an der Turbinenseitenwand diskutiert.

NOMENKLATUR

| | | |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------|
| α | $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ | Wärmeübergangskoeffizient |
| e_{RP} | Pixel | Fehler bei der Rückprojektion |
| l | m | Längenmaß |
| λ | $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ | Wärmeleitfähigkeit |
| \dot{m} | kg s^{-1} | Massenstrom |
| M | - | Ausblaserate |
| η | - | Adiabate Filmkühleffektivität |
| P | - | Kameraprojektionsmatrix |
| Re | - | Reynolds-Zahl |
| ρ | kg m^{-3} | Dichte |
| t | m | Teilung des Turbinengitters |
| T | K | Temperatur |
| Tu | % | Turbulenzgrad |
| \dot{q} | W m^{-2} | Wärmestromdichte |
| x, y | m | Bildkoordinaten |
| X, Y, Z | m | Objektkoordinaten |

Abkürzungen

| | |
|------|---------------------------------|
| DFT | Diskrete Fourier-Transformation |
| DLT | Direkte Lineare Transformation |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| PEEK | Polyetheretherketon |
| ROI | Region of Interest |

Indizes

| | |
|----|-------------------------------|
| 0 | Referenzfall ohne Filmkühlung |
| aW | Adiabate Wand |
| ax | Axiale Schaufelsehne |
| ch | Schaufelsehne |
| f | Größe mit Filmkühlung |
| HG | Heißgas |
| KL | Kühlluft |
| KW | Kühlwasser |
| t | Totalzustand |
| W | Größe an der Wand |

1. EINLEITUNG

Die Anforderung der europäischen Technologieplattform ACARE an neue Turbomaschinen ist ein schadstoffarmer, leiser und sparsamer Betrieb. Daher ist eines der Hauptziele bei der Entwicklung neuer Triebwerke die Steigerung des Gesamtwirkungsgrads. Der Wirkungsgrad des realen Kreisprozesses kann durch eine Erhöhung des Druckverhältnisses bei angepasster Turbineneintrittstemperatur gesteigert werden (Bräunling [4]).

Die Beherrschung der gestiegenen Prozessparameter erfordert den Einsatz effizienter Kühlmethoden, da die Turbineneintrittstemperatur jenseits der zulässigen Materialtemperaturen liegt. Die Filmkühlung, bei der ein schützender Kühlfilm über die heißgasbeaufschlagte Fläche gelegt wird, hat sich als wirksame und zuverlässige Methode etabliert. Jedoch führt der Einsatz zu aerodynamischen Verlusten und Mischungsverlusten. Weiterhin kann die Kühlluft nicht am Kreisprozess teilnehmen und ihre Enthalpie kann nur teilweise in der Turbine zurückgewonnen werden. Eine effiziente Kühlung erlaubt daher die Reduktion des Kühlluftmassenstroms und damit die Reduktion der durch die Kühlung induzierten Verluste. Aufgrund des großen Optimierungspotentials wurde die Filmkühlung am Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) bereits in vielen experimentellen Arbeiten (Baldauf [1], Ochs [14], Saumweber [16]) untersucht.

Von Schuepbach et al. [17] wurde gezeigt, dass die aerodynamischen Verluste durch die Konturierung der Seitenwand reduziert werden. Des Weiteren haben in der Schaufelpassage auftretende Sekundärströmungen, die detailliert von Wang et al. [20] untersucht wurden, einen signifikanten Einfluss auf die Filmkühlung und insbesondere den Wärmeübergang auf der Seitenwand (Simon et al. [19]). Eine Konturierung der Turbinenseitenwand erlaubt somit die Reduktion der aerodynamischen Verluste und das Erreichen einer möglichst homogenen Temperaturverteilung auf der Seitenwand. Eine gemeinsame Optimierung der Aerodynamik und des Wärmeübergangs liegt daher nahe.

Die Untersuchung des Wärmeübergangs und der Filmkühlung an einer dreidimensionalen konturierten Turbinenseitenwand ist das Ziel der vorliegenden Arbeit. BILD 1 zeigt die untersuchte Seitenwand mit lokalen Filmkühlausblasungen in teilweise transparenter Darstellung. Im Vergleich zu den bereits stark optimierten Turbinenschaufeln hat die Turbinenseitenwand hinsichtlich der Oberflächenkontur ein hohes Optimierungspotential. Die Seitenwandgeometrie

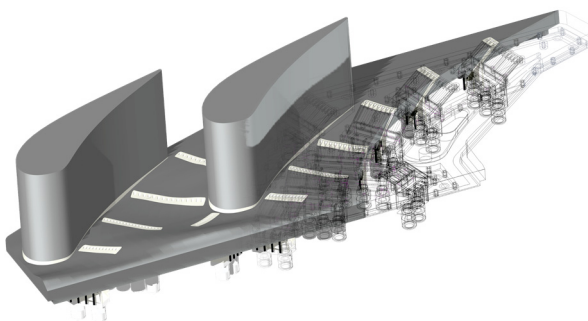


BILD 1. Dreidimensionale konturierte Turbinenseitenwand mit Filmkühleinbauten (Kneer et al. [12])

der Messplatte wurde bezüglich der Reduktion aerodynamischer Verluste und der Sicherstellung einer homogenen Temperaturverteilung auf der Seitenwand von einem Industriepartner optimiert. Zur Bewertung der Filmkühlung werden die Wärmeübergangskoeffizienten und die adiabate Filmkühleffektivität mithilfe des Superpositionsprinzips der Filmkühlung bestimmt (Choe et al. [5]). Hierfür müssen die Oberflächentemperaturen der Seitenwand und der Wärmeübergang an der Oberfläche der Messplatte bestimmt werden. Zur Messung der Oberflächentemperatur bei Filmkühlungsuntersuchungen wird die Infrarotthermographie als Messmethode eingesetzt. Die In-Situ-Kalibrierung, bei der in die Oberfläche eingebettete Thermoelemente als Stützstellen dienen, hat sich als Kalibrierungsmethode bewährt (Martiny et al. [13]). Der konvektive Wärmestrom wird mithilfe einer FE-Berechnung bestimmt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine erweiterte Auswertoutine implementiert, um Filmkühlungsuntersuchungen an dreidimensionalen konturierten Turbinenseitenwänden auszuwerten.

2. GRUNDLAGEN

2.1. Superpositionsprinzip der Filmkühlung als Messverfahren

Zur Bewertung der Filmkühlung können die filmkühlungsrelevanten Kenngrößen, welche nicht direkt messbar sind, durch Anwenden des Superpositionsprinzips der Filmkühlung berechnet werden. Zu den Kenngrößen zählen die adiabate Wandtemperatur T_{aw} bzw. die adiabate Filmkühleffektivität η_{aw} und der Wärmeübergangskoeffizient mit Filmkühlung α_f .

Das Superpositionsprinzip der Filmkühlung stellt einen linearen Zusammenhang zwischen konvektiver Wandwärmestromdichte \dot{q}_w und der Wandtemperatur T_w her. Dieser lineare Zusammenhang wurde experimentell untersucht und dessen Gültigkeit beispielsweise von Bittlinger et al. [3], Choe et al. [5] und Gritsch et al. [8] nachgewiesen. Zur Gewährleistung des linearen Zusammenhangs muss das Totaltemperaturverhältnis aus Heißgas und Kühlluft konstant gehalten werden und lediglich die Wandtemperatur T_w darf variiert werden (Gritsch et al. [8], Jones [11]). Hierdurch wird die thermische Randbedingung unabhängig von den gleichbleibenden Strömungsbedingungen variiert.

Der lineare Zusammenhang ist anschaulich in BILD 2 dargestellt. Bei einer Variation der Wandtemperatur T_w liegen alle resultierenden Wärmestromdichten \dot{q}_w auf einer Geraden mit der Steigung $-\alpha_f$. Die Gerade schneidet die Abszisse bei der adiabaten Wandtemperatur T_{aw} , bei welcher

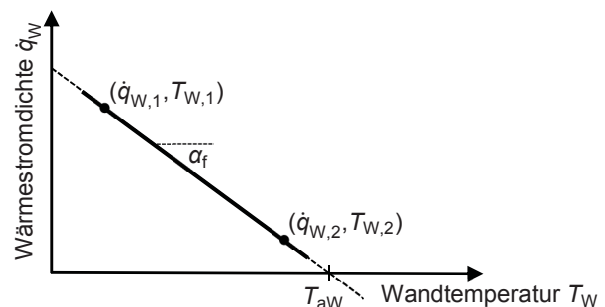


BILD 2. Superpositionsprinzip der Filmkühlung

gerade kein Wärmestrom an die Wand übertragen wird. Unter Zuhilfenahme des linearen Zusammenhangs werden die beiden Größen T_{aW} und α_f durch Interpolation bzw. Extrapolation aus zwei Punkten, jeweils bestehend aus der Wandwärmestromdichte und der Wandtemperatur, gemäß den Gleichungen (1) und (2) bestimmt.

$$(1) \quad \alpha_f = \frac{\dot{q}_{W,2} - \dot{q}_{W,1}}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

$$(2) \quad T_{aW} = \frac{T_{W,1} \dot{q}_{W,2} - T_{W,2} \dot{q}_{W,1}}{\dot{q}_{W,2} - \dot{q}_{W,1}}$$

Die Filmkühlung kann infolgedessen mit der adiabaten Wandtemperatur und dem Wärmeübergangskoeffizient mit Filmkühlung beschrieben werden (Baldauf [1]). Für die adiabate Wandtemperatur T_{aW} wird die dimensionslose Darstellung als adiabate Filmkühleffektivität η_{aW} gewählt. Hierbei wird die Temperaturabsenkung einer adiabaten Wand auf die maximale Temperaturdifferenz, die durch die Kühllufttemperatur $T_{KL,t}$ festgelegt ist, gemäß Gleichung (3) bezogen. Als Heißgasreferenztemperatur $T_{HG,ref}$ dient hierbei die Recoverytemperatur, die Dissipation bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten berücksichtigt (Jischa [10]). Der Wärmeübergangskoeffizient mit Filmkühlung α_f wird auf den Referenzfall ohne Filmkühlung bezogen und als Wärmeübergangserhöhung mit Filmkühlung α_f/α_0 verwendet.

$$(3) \quad \eta_{aW} = \frac{T_{HG,ref} - T_{aW}}{T_{HG,ref} - T_{KL,t}}$$

Bei diesem Messverfahren kann der Fehler bei der Bestimmung von T_{aW} reduziert werden, indem sich ein Messpunkt möglichst nahe am adiabaten Zustand befindet. Hierdurch fallen Fehler aus dem anderen Messpunkt mit der geringeren Wandtemperatur weniger ins Gewicht. Weiterhin wird durch Gleichung (1) deutlich, dass die beiden Messpunkte möglichst weit auseinander liegen sollten, um den Fehler bei der Berechnung von α_f möglichst gering zu halten.

Damit das Messverfahren angewendet werden kann, müssen den mittels Infrarotthermographie bestimmten Temperaturen die Koordinaten der Oberfläche zugeordnet werden, um sie als Randbedingungen bei der Berechnung der Wärmeströme nutzen zu können. Dies geschieht in diesem Fall mit der Methode der Direkten Linearen Transformation aus dem Bereich der Photogrammetrie.

2.2. Methode der Direkten Linearen Transformation

Der Bereich der Photogrammetrie umfasst Messverfahren zur Bestimmung von Form und Position von Objekten im Raum anhand von Fotografien. Dadurch ist es möglich dreidimensionale Objekte mittels zweidimensionaler Aufnahmen zu rekonstruieren.

Zur Modellierung eines Kamerasystems kann die *Zentralprojektion*, ein Teilgebiet der projektiven Geometrie, eingesetzt werden. Bei diesem einfachen Kameramodell wird angenommen, dass sich alle einfallenden Strahlen in der Linse in einem Punkt schneiden und auf den Sensor treffen. Somit entspricht die technische Umsetzung der Zentralprojektion idealerweise dem Modell einer Lochkamera. Ein Einfluss des Brennpunkts und der Linsendicke, welcher ohnehin marginal ist, wird nicht abgebildet (Hartley et al. [9]).

Eine Methode zur Bestimmung der Projektionsvorschrift einer solchen Zentralprojektion ist die *Direkte Lineare Transformation* (DLT). Sie stellt einen *linearen* Zusammenhang

zwischen den Koordinaten des Objekts und denen des Bildes her und beschreibt deswegen eine lineare Abbildung. Weiterhin wird die Projektionsvorschrift, welche durch die Kameraprojektionsmatrix P beschrieben wird, *direkt* anhand von Punktepaaren bestimmt. Ein *Punktepaar* umfasst die Objektkoordinaten und die zugehörigen Bildkoordinaten eines prägnanten Punktes. Punkte, welche für die Berechnung der Projektionsvorschrift herangezogen werden, werden als *Passpunkte* bezeichnet. Durch die Verwendung von homogenen Koordinaten ergibt sich eine lineare Abbildung gemäß Gleichung (4) mit der Kameraprojektionsmatrix P als 3x4 Matrix. In homogenen Koordinaten werden die Bildkoordinaten $(x,y)^T$ als $(x_1,x_2,w)^T$ mit $w \neq 0$ und die Objektkoordinaten $(X,Y,Z)^T$ als $(X,Y,Z,1)^T$ dargestellt. Der Faktor w stellt eine Art Skalierungsfaktor dar und die Bildkoordinaten können durch Normierung der ersten beiden Vektoreinträge mit dem dritten berechnet werden.

$$(4) \quad \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ w \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Die Kameraprojektionsmatrix P besitzt 12 unbekannte Größen. Es werden mindestens sechs Punktepaare zur Lösung des Gleichungssystems benötigt. In der Praxis werden, wenn möglich, mehr Punktepaare verwendet, wodurch ein robusteres System gegenüber Ungenauigkeiten der Koordinaten der Passpunkte erzielt wird. Eine ausführliche Beschreibung der Bestimmung der Kameraprojektionsmatrix P anhand von Punktepaaren liefert Hartley et al. [9].

3. AUFBAU UND DURCHFÜHRUNG DES EXPERIMENTS

3.1. Aufbau des Prüfstands

Zur Filmkühlungsuntersuchung an Turbinenseitenwänden wurde ein Prüfstand konstruiert und aufgebaut (Kneer et al. [12]). Der schematische Aufbau ist in BILD 3 dargestellt.

Im Heißgaskreislauf wird der Heißgasmassenstrom \dot{m}_{HG} von $2,7 \text{ kg s}^{-1}$ durch einen Radialverdichter bereitgestellt und durch eine elektrische Heizung auf die Totaltemperatur $T_{HG,t}$ von 425 K aufgeheizt. Dabei sorgen geeignete Mischer für eine homogene Temperaturverteilung. Mittels einer Düse wird das Heißgas in den rechteckigen Kanalquerschnitt geleitet. Anschließend wird mit einem Turbulenzgitter, welches vor dem Eintritt in die Schaufelkaskade eingebaut ist, ein Turbulenzgrad Tu von 10 % eingestellt, um eine definierte und realitätsnahe Anströmung zu realisieren. Danach wird das Heißgas durch die beiden Schaufelpassagen geleitet und am Austritt durch einen Diffusor abgeführt.

Im Kühlkreislauf wird die durch einen Schraubenverdichter bereitgestellte Luft getrocknet und anschließend in der Turbine eines Turboladers auf die Kühllufttemperatur T_{KL} von 273 K entspannt. Die Kühlluft versorgt sowohl die Filmkühleinsätze (*FK-1* bis *FK-7*) als auch das Spaltmodul. Durch den Einsatz mehrerer Ventile kann die Kühlluft gezielt zu den Verbrauchern geleitet werden.

Die Kaskade besteht aus 2,4 Passagen mit drei prismatischen Schaufeln, die den Mittelschnitt eines realen Leitschaufelprofils darstellen. Das Wirbelsystem in der oberen Passage ist vollständig entwickelt, weshalb sich die infrarothermographischen Messungen auf diese Passage beschränken (Kneer et al. [12]).

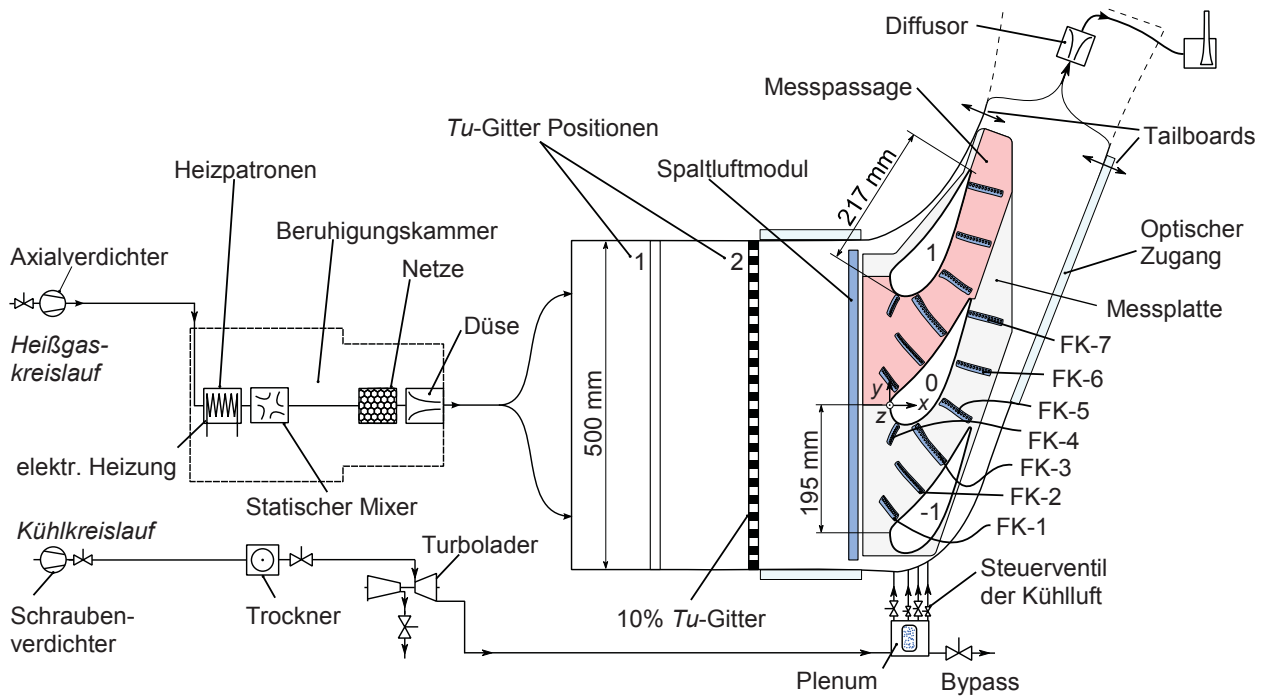


BILD 3. Aufbau des Prüfstands zur Filmkühlungsuntersuchung an Turbinenseitenwänden (Kneer et al. [12])

3.2. Aufbau der Messplatte

Die einzelnen Komponenten der Messplatte sind in BILD 4 dargestellt und werden im Folgenden diskutiert. Die Messplatte (BILD 4 A) ist aus Ti6Al4V gefertigt, da die Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu der von Stahl zu geringeren Unsicherheiten in den Wärmeübergangskoeffizienten führt (Kneer et al. [12]). Die Rückseite der Messplatte ist mit einer Kavität (BILD 4 B), durch die Wasser strömt, versehen. Durch die hohe spezifische Wärmekapazität und Durchflussmenge wird eine nahezu homogene Temperaturverteilung an der Rückseite der Messplatte erreicht. Zur Erfassung der Temperaturwerte ist die Messplatte mit zahlreichen Messstellen versehen. Auf der heißgasbeaufschlagten Seite sind 46 Thermoelemente in die Oberfläche eingelassen (BILD 4 C). Zum Messen der Oberflächentemperatur auf der Rückseite sind 16 Thermoelemente eingebettet (BILD 4 D). Die Filmkühlreihen bestehen jeweils aus einem separaten Filmkühleinsatz (BILD 4 E), welcher aus keramisch gefülltem Hochtemperaturkunststoff (NanoTool™) mit sehr geringer thermischer Leitfähigkeit gefertigt ist. Dadurch sind die Grenzflächen zwischen Filmkühleinsätzen und Messplatte adiabatisch, wodurch in der FE-

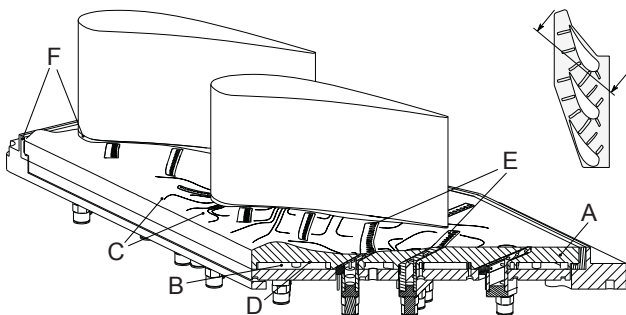


BILD 4. Aufbau der Messplatte mit konturierter Seitenwand und Filmkühleinsätzen (Kneer et al. [12])

Berechnung eine definierte Randbedingung gesetzt werden kann. Zur optimalen Versorgung der Diffusorbohrungen mit Kühlluft besitzt jeder Filmkühleinsatz ein eigenes Plenum, welches als Zwischenspeicher für die Kühlluft aus dem Kühlkreislauf dient. Weiterhin sind die Filmkühleinsätze mit Thermoelementen und Druckmessstellen für den statischen Druck versehen, um die Menge und den Zustand der ausgeblasenen Kühlluft genau überwachen zu können. Die Einsätze sind nur über dünne Stege mit der Messplatte verbunden und über dazwischen liegende Lufttaschen thermisch isoliert. Die Filmkühleinsätze besitzen zwischen 9 und 18 einzelne Diffusorbohrungen, aus denen die Kühlluft ausgeblasen wird. Die äußeren Ränder der Schaufeln und der Messplatte sind durch den Einsatz von PEEK ebenfalls thermisch vom restlichen Prüfstand bzw. der Messplatte isoliert (BILD 4 F). Damit wird gewährleistet, dass der Wärmestrom nur durch die Messplatte fließt und die Randbedingungen an den Grenzflächen in der FE-Berechnung als adiabatisch gesetzt werden können.

3.3. Durchführung von thermographischen Messungen

Damit das Superpositionsprinzip der Filmkühlung angewendet werden kann, müssen für jeden Betriebspunkt des Prüfstandes die Oberflächentemperaturen bei zwei verschiedenen thermischen Randbedingungen erfasst werden. Hierbei findet die Veränderung der thermischen Randbedingung durch die Variation der Kühlwassertemperatur T_{KW} statt. Aus den Strahlungswerten werden die Oberflächentemperaturverteilungen der beiden Messpunkte rekonstruiert (Abschnitt 4.3). Diese werden jeweils als Randbedingung bei der Durchführung einer FE-Berechnung zur Bestimmung des Temperaturfeldes und daraus abgeleiteter Wandwärmeströme vom Heißgas auf die Messplatte eingesetzt (Abschnitt 4.4). Mit den beiden daraus erhaltenen Wertepaaren, jeweils bestehend aus Temperatur und Wärmestromdichte, werden die filmkühlungsrelevanten

Kenngößen mit dem Superpositionsprinzip der Filmkühlung (Abschnitt 2.1) berechnet. Anschließend wird anhand dieser die Filmkühlung der Turbinenseitenwand diskutiert.

Zunächst wird der Betriebspunkt des Heißgaskanals über die Reynolds-Zahl Re_1 am Einlass in das Schaufelgitter eingestellt. Die Kühllufttotaltemperatur $T_{KL,t}$ wird dabei so gewählt, dass sich ein realistisches Temperaturverhältnis $T_{HG,t}/T_{KL,t}$ ergibt. Die Kenngößen des Betriebspunkts wurden über die Dauer aller Messungen konstant gehalten und sind in Tabelle TAB 1 angegeben. Als charakteristische Länge bei der Berechnung der Reynolds-Zahl wird die Sehnenlänge l_{ch} der Turbinenschaufeln verwendet.

| Physikalische Größe | Einlass (1) | Auslass (2) |
|------------------------------------|------------------|------------------|
| Reynolds-Zahl Re | $4,8 \cdot 10^5$ | $1,6 \cdot 10^6$ |
| Heißgasttotaltemperatur $T_{HG,t}$ | 425 K | |
| Kühllufttotaltemperatur $T_{KL,t}$ | 273 K | |
| Turbulenzgrad Tu | 10 % | – |

TAB 1. Kenngößen des Betriebspunkts

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Messreihen durchgeführt. Hierbei unterscheiden sich die thermischen Randbedingungen an der Wand, welche anhand der Kühlwassertemperatur T_{KW} eingestellt werden. Die Kühlwassertemperaturen der beiden Messpunkte in Messreihe 1 betragen 18 °C und 29 °C. In Messreihe 2 betragen die beiden Kühlwassertemperaturen hingegen 20 °C und 55 °C. Die Steigerung der Kühlwassertemperatur des zweiten Messpunkts in Messreihe 2 wurde durch eine Veränderung am experimentellen Aufbau zur Verbesserung der Genauigkeit der Ergebnisse durchgeführt (Abschnitt 5.4).

4. AUFBEREITUNG UND NACHBEARBEITUNG DER ERGEBNISSE

4.1. Bestimmung der Projektionsvorschrift

Um die komplette Schaufelpassage bei der Messung der Seitenwandtemperatur abzudecken, sind neun Infrarotaufnahmen nötig. Diese müssen jeweils mit einer eigenen Projektionsvorschrift zurück in den dreidimensionalen Objektraum projiziert werden. Das Infrarotmesssystem wird hierfür näherungsweise durch eine Zentralprojektion beschrieben und die Kameraprojektionsmatrix mit der Methode der Direkten Linearen Transformation bestimmt (Abschnitt 2.2).

Zuerst werden Passpunktpaare, welche jeweils aus den Koordinaten eines geometrisch prägnanten Punktes auf dem Objekt und auf dem Bild bestehen, bestimmt. Es hat sich hierbei als sinnvoll erwiesen, die Endpunkte der eingebetteten Thermoelemente und die Durchstoßpunkte der einzelnen Filmkühlbohrungen zu verwenden. Um die Thermoelemente auf den Infrarotaufnahmen sichtbar zu machen, wird ein geeigneter Filter angewendet. Die Thermoelemente bestehen, im Vergleich zur Messplatte, aus einem anderen Material und sind in einer Nut in die Messplatte eingelassen. Hierdurch herrscht an diesen Stellen, im Vergleich zur umgebenden Oberfläche, eine abweichende Seitenwandtemperatur. Mit einem Hochpassfilter auf Basis einer zweidimensionalen *diskreten Fourier Transformation* (DFT) können die Thermoelemente daher sichtbar gemacht werden. Hierdurch können die Koordinaten der Endpunkte auf den Infrarotaufnahmen bestimmt werden (BILD 5). Für

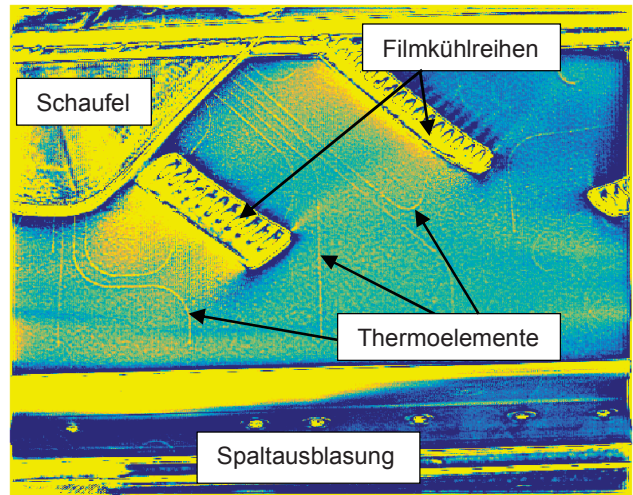


BILD 5. Infrarotaufnahme mit angewendetem Hochpassfilter nach dem Einsatz einer DFT

die Bestimmung der Koordinaten der Durchstoßpunkte der Filmkühlbohrungen ist diese Vorgehensweise nicht erforderlich, da sie auf den Infrarotaufnahmen direkt sichtbar sind. Die Koordinaten der Passpunkte auf dem Objekt können hingegen direkt aus dem CAD-System gelesen werden und sind, abgesehen von Fertigungstoleranzen, exakt.

Kleinere Abweichungen der bestimmten Koordinaten auf den Infrarotaufnahmen wirken sich direkt auf die Genauigkeit der Kameraprojektionsmatrix aus. Eine Optimierung der Koordinaten der Passpunkte ist deshalb unerlässlich. Daher wird während der Auswahl der Punkte zusätzlich manuell eine Unsicherheit der Position im Bild angegeben. Die Unsicherheit bewegt sich dabei immer im Bereich von 1 bis 3 Pixeln. Die unsicherheitsbehafteten Punktkoordinaten werden einem Optimierer auf Basis *genetischer Algorithmen* (Gerdes et al. [6]) zur Berechnung der optimalen Transformation übergeben. Der Optimierer sucht den Parameterraum (40 bis 80 Koordinaten – zweimal die Anzahl der Passpunkte) im Rahmen der angegebenen Unsicherheit ab. Die Zielgröße, welche vom Algorithmus in einem iterativen Prozess minimiert wird, ist im Rahmen dieser Arbeit der Fehler bei der Rückprojektion e_{RP} der Objektpunkte in den Bildbereich. Hierbei werden die exakten Objektpunkte X_i mit der Kameraprojektionsmatrix P der aktuellen Iteration, gemäß Gleichung (5), zurück in den Bildbereich projiziert. Anschließend werden die einzelnen euklidischen Abstände dieser auf das Bild zurückprojizierten Objektpunkte \tilde{x}_i zu den jeweiligen Bildpunkten x_i , welche für die Bestimmung der Kameraprojektionsmatrix P verwendet wurden, gemäß Gleichung (6) berechnet. Der Fehler bei der Rückprojektion ist als quadratisches Mittel der einzelnen Abstände $e_{RP,i}$ definiert. Daraufhin verschiebt der Optimierer die Passpunkte auf dem Bild innerhalb einer individuell festgelegten Toleranz des jeweiligen Punktes. Damit können die neue Kameraprojektionsmatrix und der neue Fehler bei der Rückprojektion berechnet werden.

$$(5) \tilde{x}_i = P X_i$$

$$(6) e_{RP,i} = \|\tilde{x}_i - x_i\|_2$$

Der Ablauf wird dabei iterativ durchlaufen, bis das Abbruchkriterium erreicht ist. Durch die Verwendung vieler Passpunkte verbessert sich der eingesetzte Optimierungsalgorithmus, da sich der stochastische Fehler reduziert. Die

Wahrscheinlichkeit einer korrekten Verschiebung der Punkte durch den Optimierer ist damit höher.

4.2. Temperaturkalibrierung

Die Infrarotaufnahmen müssen nach der Bestimmung der Projektionsvorschrift kalibriert werden. Die Kalibrierung stellt dabei den Zusammenhang zwischen der gemessenen Strahlung und der Objekttemperatur her. Zuerst wird jede Infrarotaufnahme über 50 Einzelbilder arithmetisch gemittelt, um das Rauschen des thermischen Detektors zu reduzieren. Im Anschluss wird die Detektorungleichförmigkeit eliminiert, um zu gewährleisten, dass ein einfallendes homogenes Strahlungssignal auch ein homogenes Detektor-signal liefert (Perry et al. [15], Schulz et al. [18]). Basierend auf einer in einem separaten Experiment bestimmten Vorkalibrierung wird eine *In-Situ-Kalibrierung* durchgeführt (Martiny et al. [13]). Hierbei wird die Vorkalibrierung mithilfe in der Oberfläche der Seitenwand eingelassener Thermoelemente für jede Infrarotaufnahme auf die jeweilige Umgebungsstrahlung angepasst. Somit können quadratische Abweichungen der gemessenen Temperaturen von unter 0,5 K erreicht werden. Die Kalibrierungskurve der Vorkalibrierung und die daraufhin angepasste Kalibrierungskurve der In-Situ-Kalibrierung einer Infrarotaufnahme sind beispielhaft in BILD 6 dargestellt. Nach der Kalibrierung liegen die Oberflächentemperaturen der Schaufelpassage in Form von einzelnen Temperaturbildern vor.

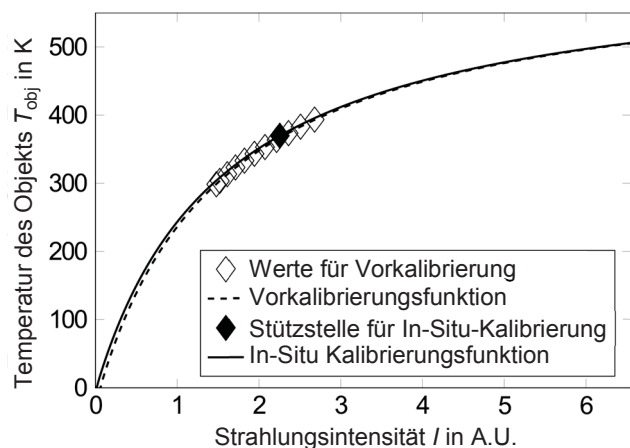


BILD 6. Kalibrierungskurven der Vor- und In-Situ-Kalibrierung einer Aufnahme

4.3. Rekonstruktion des Temperaturfelds

Das Temperaturfeld der Messpassage kann nach der Bestimmung der Projektionsvorschriften und der Kalibrierung der Infrarotaufnahmen rekonstruiert werden. Zuerst wird für jede Aufnahme eine *Region of Interest* (ROI) ausgewählt. Die ROI beinhaltet nur scharf abgebildete Bildbereiche und keine Rahmen der Zinkselenid-Fenster, welche als optischer Zugang dienen, oder Teile der Schaufeln. Um zu gewährleisten, dass die gesamte Oberfläche der Schaufelpassage abgedeckt wird, müssen sich die einzelnen ROI geringfügig überlappen. Die zurückprojizierten Ränder der einzelnen ROI eines Messpunkts aus Messreihe 2 sind beispielhaft in BILD 7 dargestellt.

Die bestimmten Projektionsvorschriften erlauben mathematisch bedingt lediglich eine Projektion dreidimensionaler Objektpunkte in den zweidimensionalen Bildbereich (Vor-

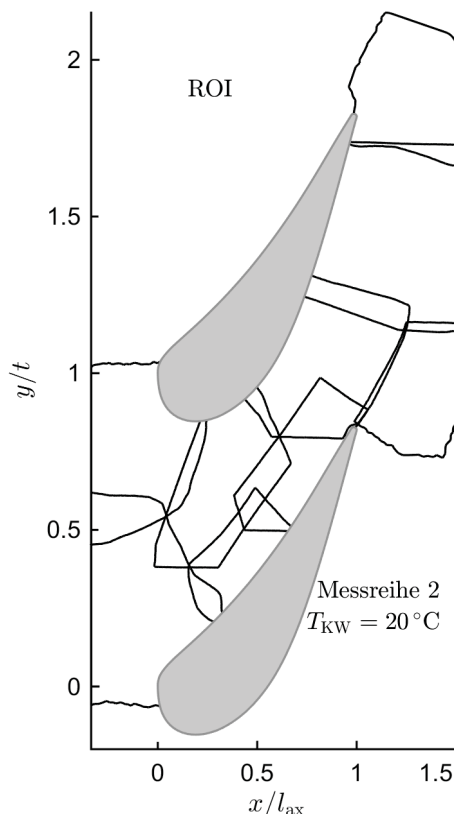


BILD 7. ROI der einzelnen Infrarotaufnahmen

wärtsprojektion). Es wurde daher eine Punktwolke, welche die Oberfläche der Messplatte darstellt, mit 1,1 Mio. Punkten angelegt. Die Auflösung in der oberen Schaufelpassage (Messpassage) ist besonders fein ausgeführt, um die Auflösung der Infrarotkamera auszunutzen. Hierdurch wird eine möglichst hohe Auflösung der im weiteren Auswerteprozess berechneten Größen gewährleistet. Zur Projektion der Temperaturbilder in den dreidimensionalen Objektbereich wird die Objektpunktwolke mittels der jeweiligen Projektionsvorschrift auf die Bildebene projiziert, der Temperaturwert im Bild ausgelesen und zurück an die entsprechende Stelle in der Punktwolke geschrieben. Dieser Vorgang wird für jede Aufnahme separat durchgeführt. Objektpunkten, die auf Bereiche außerhalb der ROI projiziert werden, werden keine Temperaturwerte zugewiesen.

In den Überlappungsbereichen, wo Temperaturwerte aus mehreren Aufnahme-positionen vorliegen, müssen diese miteinander verrechnet werden. Sowohl die berechnete Projektion als auch die Kalibrierung der Aufnahmen sind fehlerbehaftet. Dadurch werden die Temperaturbilder nicht exakt auf die korrekte Position in der Objektpunktwolke projiziert, was *Temperatursprünge* an den Bildübergängen zur Folge hat. Diese führen zu großen Fehlern und unrealistischen Wärmeströmen in der FE-Berechnung. Da die Temperatursprünge im Bereich der Kalibriergenauigkeit liegen, können die Bildübergänge geglättet bzw. ineinander überblendet werden. Die einfachste Möglichkeit zur Glättung der Bildübergänge ist eine arithmetische Mittelung der mehrfach auftretenden Temperaturwerte innerhalb der Überlappungsbereiche. Bei einer arithmetischen Mittelung schlagen die nur mäßig geglätteten Temperatursprünge jedoch deutlich im Wärmestromdichtefeld in BILD 8 a) durch.

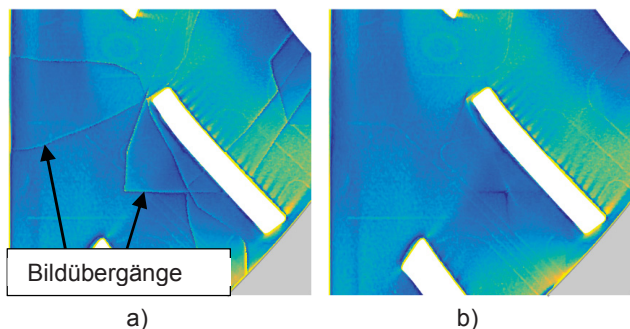


BILD 8. Qualitativer Vergleich der Glättung der Bildübergänge anhand der Wärmestromdichte bei a) arithmetische Mittelung und b) implementierter Algorithmus

Die Folge sind erkennbare Kanten, die die Ränder der Einzelaufnahmen widerspiegeln.

Infolgedessen wurde ein erweiterter Glättungsalgorithmus implementiert. Für jeden Punkt in einem Überlappungsbereich wird hierbei ein Gewichtungsfaktor berechnet, welcher den Einfluss des jeweiligen Bildes auf den resultierenden Temperaturwert festlegt. Das Ziel ist ein kontinuierlich schwächer werdender Einfluss eines Bildes hin zu seinem äußeren Bildrand, wodurch eine gleichmäßige Überblendung zum anderen Bild entsteht. Zur Berechnung der Gewichtungsfaktoren wird der euklidische Abstand der Punkte innerhalb eines Überlappungsbereichs hin zum äußeren Bildrand berechnet. Der Einfluss der Bilder im Überlappungsbereich wird anschließend damit gewichtet. Am äußeren Rand besitzt ein Bild im Überlappungsbereich somit keinen Einfluss mehr. In BILD 9 a) sind exemplarisch die Bildränder von Bild 1 (rot) und Bild 2 (blau) und der Bildrand des resultierenden Überlappungsbereichs (grün) dargestellt. Die berechneten Gewichtungsfaktoren sind für Bild 1 in BILD 9 b) und für Bild 2 in BILD 9 c) abgebildet. Zum äußeren Rand nehmen die Gewichtungsfaktoren kontinuierlich ab, wodurch ein fließender Übergang vom einen Bild

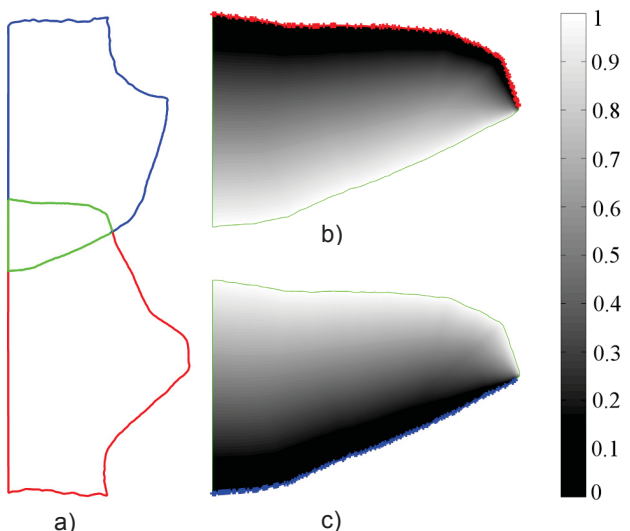


BILD 9. Implementierter Glättungsalgorithmus, a) Bildbereiche: Bild 1 (rot), Bild 2 (blau) und Überlappungsbereich (grün), b) Gewichtungsfaktoren von Bild 1, c) Gewichtungsfaktoren von Bild 2

in das andere gewährleistet ist. Die scharfen Kanten in der Wärmestromdichte, welche durch Temperatursprünge hervorgerufen werden, sind durch diese Vorgehensweise bei der Glättung in BILD 8 b) fast vollständig verschwunden.

Für die folgende FE-Berechnung der Wärmestromdichten auf der Turbinenseitenwand muss das Temperaturfeld auf die komplette Messplattenoberfläche erweitert werden. Hierfür werden die Temperaturen aus der oberen Schaufelpassage (Messpassage) in die untere Schaufelpassage kopiert und die entstandenen Überlappungsbereiche mit dem zuvor beschriebenen Algorithmus geglättet. Jeweils ein schmaler Streifen oberhalb der oberen Schaufel und unterhalb der unteren Schaufel wird mit dem *nearest neighbour* Verfahren extrapoliert, um die Temperaturgradienten an der Oberfläche an diesen Stellen gering zu halten. Das resultierende Temperaturfeld der Messpassage ist in BILD 11 dargestellt und wird in Kapitel 6 genauer diskutiert.

4.4. Berechnung des Wärmeübergangs

Der Wärmestrom, welcher vom Heißgas an die Messplatte übertragen wird, wird mithilfe der FEM bestimmt. Hierfür wird das Temperaturfeld im Inneren der Messplatte, mit den gemessenen Oberflächentemperaturen der Seitenwand und der rückseitigen Kühlwassertemperatur als Randbedingungen, berechnet (BILD 10). Die Randflächen zu den Schaufeln, Filmkühleinsätzen und der Halterung der Messplatte sind am Prüfstand durch den Einsatz eines Kunststoffes mit geringer thermischer Leitfähigkeit näherungsweise adiabat ausgeführt. Auch das Modell der FE-Berechnung bildet diese Randbedingungen ab. BILD 12 zeigt die berechneten Wärmestromdichten in der Messpassage, welche in Kapitel 6 genauer betrachtet wird.

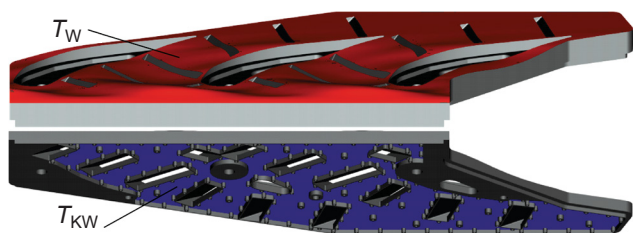


BILD 10. Obere heißgasbeaufschlagte und untere wassergekühlte Seite der Messplatte, rot: gemessene Wandtemperatur T_W , blau: Kühlwassertemperatur T_{KW} (Kneer et al. [12])

5. VERBESSERUNGEN UND OPTIMIERUNGEN

Es wurde eine gezielte Analyse der Auswerterroutine durchgeführt, um weitreichende Optimierungen und signifikante Erweiterungen im Funktionsumfang zu realisieren. Hiervon werden die sechs wichtigsten im Folgenden besprochen.

5.1. Fehlerbehaftete Projektionsvorschrift

Die Bestimmung möglichst genauer Projektionsvorschriften ist maßgeblich für die Rekonstruktion des Temperaturfelds. Zur Anwendung der Direkten Linearen Transformation ist eine Mindestanzahl an Passpunktpaaren notwendig, um alle Unbekannten der Kameraprojektionsmatrix zu bestimmen. Weiterhin macht eine möglichst große Anzahl an Passpunkten die Bestimmung der Projektion deutlich robuster. Kleinere Ungenauigkeiten fallen weniger ins Gewicht und die Wahrscheinlichkeit falsch verschobener

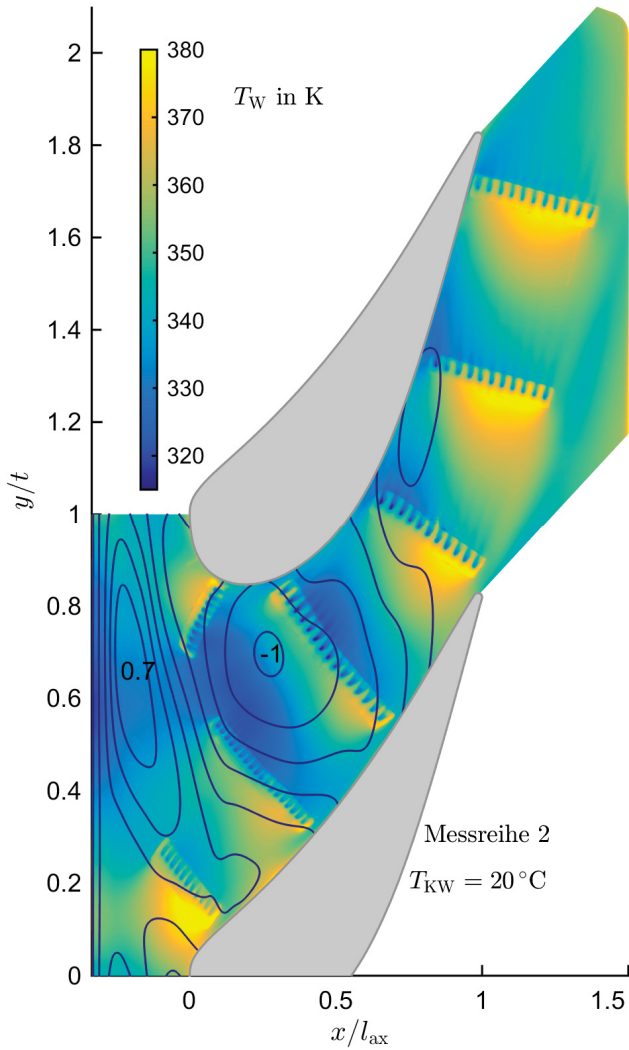


BILD 11. Temperaturfeld in der Messpassage

Passpunkte im Bildbereich durch den Optimierungsalgorithmus ist geringer. Eine direkte Bewertung der Güte der Projektion ist jedoch nicht möglich, weshalb die Auswahl der Passpunkte stets mit großer Sorgfalt erfolgt.

Unter Umständen kann es zu einer nicht eindeutigen Projektion kommen. Hierbei können Bereiche der Objektpunktwolke auf ein Bild projiziert werden, obwohl diese in der Realität nicht im Bereich des Bildes liegen. Dieses Problem taucht auf, falls eine Koordinate der Passpunkte gar nicht oder nur geringfügig variiert. Gelöst werden kann dieses Problem durch die selektive Anwendung einer Projektion von zweidimensionalen Objektpunkten auf den zweidimensionalen Bildbereich. Angewendet wurde dies für die Aufnahme im hinteren Bereich um Filmkühlreihe FK-7.

5.2. Optimierung der Güte des Temperaturfelds

Die verwendete fein aufgelöste Objektpunktwolke mit 1,1 Mio. Punkten ging aus einer Vorgängerversion mit lediglich 244 000 Punkten hervor. Die feine Punktwolke ist in der Schaufelpassage, von welcher die Infrarotaufnahmen gemacht werden, besonders fein aufgelöst. Der Einsatz einer vektorisierten Programmierung hat zur Folge, dass der numerische Aufwand nur marginal steigt. Durch Einsatz der feinen Objektpunktwolke kann die Auflösung

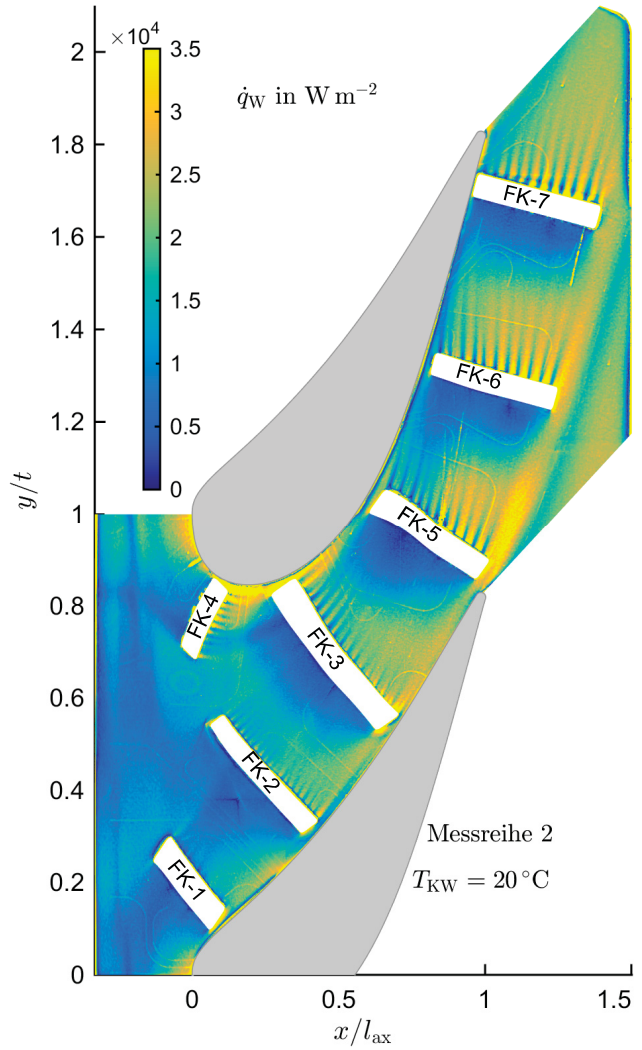


BILD 12. Wärmestromdichtefeld in der Messpassage

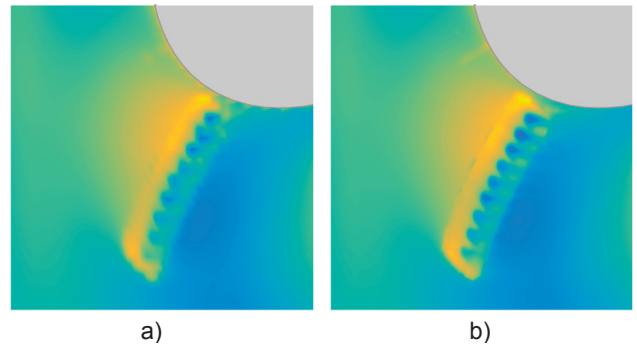


BILD 13. Oberflächentemperaturen im Bereich der Filmkühlreihe FK-4 für die a) grobe und b) feine Objektpunktwolke

der Infrarotkamera ausgenutzt werden, was zu einer schärferen Abbildung aller Bereiche führt. Besonders gut ist dies an den Filmkühlbohrungen in BILD 13 erkennbar.

Bei der Durchführung der In-Situ-Kalibrierung einer Infrarotaufnahme wird ein Thermoelement im Bildausschnitt zum Anpassen der Vorkalibrierungskurve an die Umgebungstrahlung verwendet. Da meist mehrere Thermoelemente

im Bildausschnitt liegen, variiert das Temperaturfeld in Abhängigkeit des verwendeten Thermoelements geringfügig. Die Ursache hierfür ist die leicht fehlerbehaftete Projektion der Thermoelemente in den Bildbereich. Generell ist es vorteilhaft, Thermoelemente zur Kalibrierung heranzuziehen, die bereits als Passpunkt zur Bestimmung der Projektionsvorschrift verwendet wurden. Die fehlerbehaftete Thermoelementposition weist dem gemessenen Temperaturwert des Thermoelements einen falschen Strahlungswert auf der Infrarotaufnahme zu. Sofern das Thermoelement im Gebiet nahezu konstanter Strahlungswerte liegt, wirkt sich eine fehlerhafte Projektion weniger auf die Kalibrierung aus.

5.3. Verbesserung der Ergebnisse der FE-Berechnung

Die Auflösung des FE-Rechnernetzes wurde mit der der Objektpunktewolke abgestimmt. Hierbei wurde, ausgehend von einem groben Rechnernetz mit 60 000 Knoten auf der Oberfläche der Seitenwand, ein Rechnernetz mit 960 000 Knoten an der Oberfläche erstellt. Zwar erhöht sich die Dauer einer solchen FE-Berechnung dadurch auf wenige Stunden, jedoch spielt dieser zeitliche Aufwand im gesamten Auswerteprozess eine untergeordnete Rolle. Der Vorteil des feinen Rechnernetzes wird anhand eines Vergleichs der berechneten Wärmestromdichten mit den unterschiedlichen Rechnernetzen verdeutlicht. Exemplarisch wird hierfür der Bereich der Seitenwand am Austritt der Schaufelpassage herangezogen. Die geringe Auflösung an der Oberfläche der Seitenwand des groben Rechnernetzes führt zu einem stark verschwommenen Wärmestromdichtefeld in BILD 14 a). Die Strahlen der Filmkühlausblasungen können nicht ausreichend aufgelöst werden. Der Einsatz des feinen Rechnernetzes bildet Nachläufe der Filmkühlausblasungen und Thermoelemente scharf ab (BILD 14 b). Das feine Rechnernetz kommt daher für alle durchgeführten FE-Berechnungen zum Einsatz.

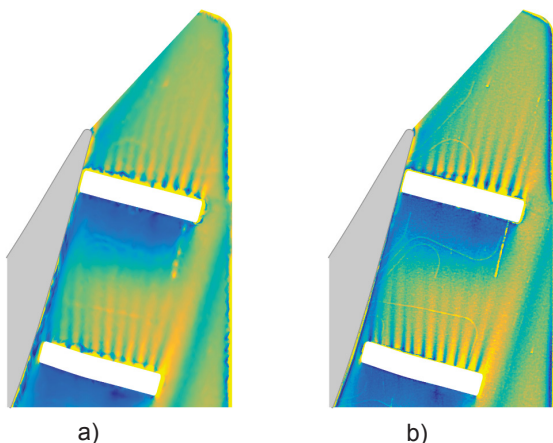


BILD 14. Wärmestromdichte \dot{q}_W für das a) grobe und b) feine Rechnernetz der FE-Berechnung

5.4. Genauigkeit der filmkühlungsrelevanten Kenngrößen

Im Folgenden wird der Einfluss der Kühlwassertemperaturdifferenz bei den Messpunkten unterschiedlicher thermischer Randbedingung auf die Genauigkeit der filmkühlungsrelevanten Kenngrößen betrachtet.

Zur Verbesserung der Genauigkeit der Wärmeübergangskoeffizienten mit Filmkühlung α_f müssen die beiden Messpunkte möglichst weit auseinander liegen (Abschnitt 2.1). Es müssen also große Differenzen in den Wandtemperaturen T_W der einzelnen Messpunkte vorliegen, was durch eine möglichst große Temperaturdifferenz des Kühlwassers zur rückseitigen Kühlung der Messplatte realisiert werden kann. Einen Vergleich der berechneten Wärmeübergangserhöhungen mit Filmkühlung α_f/α_0 bei unterschiedlichen Kühlwassertemperaturdifferenzen zeigt BILD 15. Das Ergebnis mit einer Kühlwassertemperaturdifferenz der beiden Messpunkte von lediglich 11 K (Messreihe 1) ist stark verrauscht und es sind kaum Strukturen erkennbar. Durch Erhöhung der Kühlwassertemperaturdifferenz der beiden Messpunkte auf 35 K (Messreihe 2) ist das Ergebnis deutlich schärfer und die Nachläufe der Filmkühlausblasungen sind erkennbar.

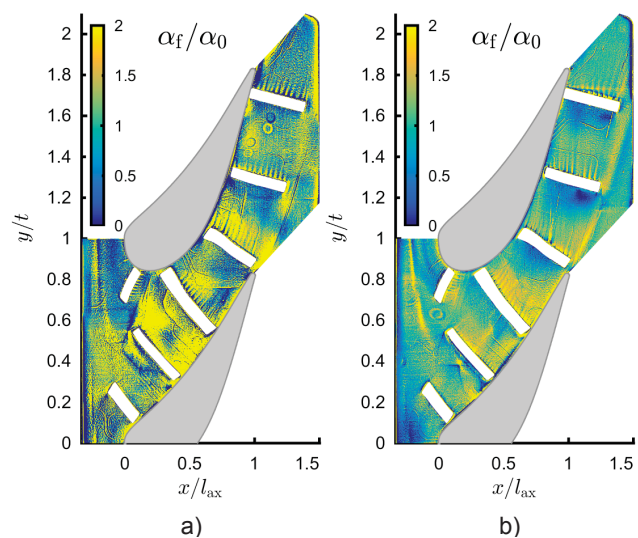


BILD 15. Wärmeübergangserhöhung mit Filmkühlung α_f/α_0 bei einer Kühlwassertemperaturdifferenz von a) 11 K und b) 35 K

Zur Erhöhung der Genauigkeit der adiabaten Filmkühleffektivität η_{aw} muss der Fehler der adiabaten Wandtemperatur T_{aw} reduziert werden. Hierfür wird ein Messpunkt möglichst nahe am adiabaten Zustand gewählt, wodurch der Einfluss des anderen Messpunkts auf die extrapolierte adiabate Wandtemperatur sinkt (Abschnitt 2.1). In BILD 16 sind die Felder der adiabaten Filmkühleffektivität der beiden Messreihen mit geringer und hoher Kühlwassertemperaturdifferenz gegenübergestellt. Durch die höhere Kühlwassertemperatur des zweiten Messpunkts von Messreihe 2 ($T_{KW,2} = 55 \text{ °C}$) ist das Feld der adiabaten Filmkühleffektivität in BILD 16 b) signifikant schärfer im Vergleich zu den stark verrauschten Ergebnissen aus Messreihe 1 ($T_{KW,2} = 29 \text{ °C}$) in BILD 16 a). Die Filmkühlung kann erst durch die hohe Kühlwassertemperaturdifferenz in Messreihe 2 bewertet werden.

Für die Messreihen im Rahmen dieser Arbeit war keine größere Temperaturdifferenz aufgrund von Einschränkungen im experimentellen Aufbau möglich. Nach Umbau und Probeversuch hat sich jedoch gezeigt, dass eine Kühlwassertemperaturdifferenz von 60 bis 80 K möglich ist. In zukünftigen Messungen kann dies zu einer weiteren Verbesserung der Ergebnisse führen. Weiterhin kann eine Messreihe

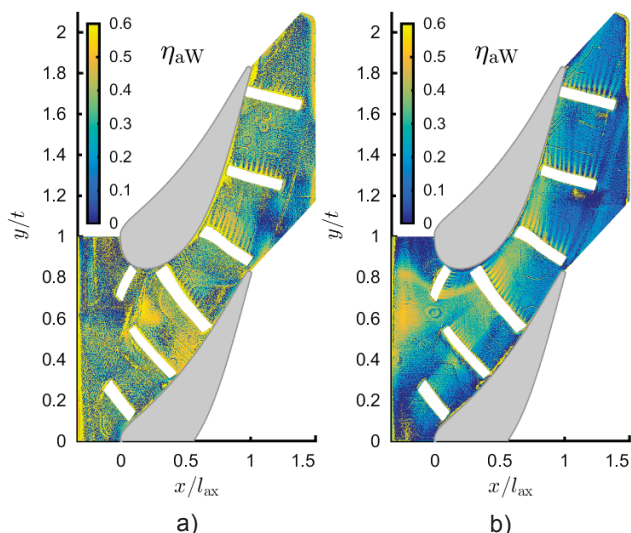


BILD 16. Adiabate Filmkühleffektivität η_{aW} bei einer Kühlwassertemperaturdifferenz von a) 11 K und b) 35 K

mit mehr als zwei Messpunkten durchgeführt werden, um das Superpositionsprinzip der Filmkühlung hinsichtlich Linearität zu überprüfen. Damit wird eine Entscheidungsgrundlage geschaffen, ob der Mehraufwand der Durchführung zusätzlicher Messpunkte mit weiteren thermischen Randbedingungen sinnvoll ist.

6. ERGEBNISSE DER EXEMPLARISCHEN MESSUNG

Für die Diskussion werden die Ergebnisse der Messreihe 2 verwendet. Die Kenngrößen der Kühlluftausblasung sind Tabelle TAB 2 zu entnehmen. Hierzu gehören die Plenumtemperaturen der einzelnen Filmkühlreihen bzw. des Spalts, der Massenstrom im Verhältnis zum Heißgasmassenstrom, das Dichteverhältnis von Kühlluft zu Heißgas und die Ausblaserate M gemäß Gleichung (7). Hierbei ist ρ die jeweilige Dichte und u die Strömungsgeschwindigkeit.

$$(7) \quad M = \frac{\rho_{KL} u_{KL}}{\rho_{HG} u_{HG}}$$

BILD 11 zeigt das gemessene Temperaturfeld der Schaufelpassage. Die x -Koordinate ist mit der axialen Sehnenlänge der Turbinenschaufel l_{ax} und die y -Koordinate mit der

| | Plenumtemperatur in K | Massenstromanteil in % | Dichteverhältnis ρ_{KL}/ρ_{HG} | Ausblaserate M |
|-------|-----------------------|------------------------|--|------------------|
| Spalt | 280,2 | 1,25 | – | – |
| FK-1 | 297,3 | – | 3,08 | 1,50 |
| FK-2 | 291,3 | – | 1,91 | 1,52 |
| FK-3 | 289,9 | – | 1,44 | 1,59 |
| FK-4 | 290,6 | – | 1,47 | 1,57 |
| FK-5 | 291,5 | – | 1,23 | 1,72 |
| FK-6 | 293,6 | – | 1,26 | 1,71 |
| FK-7 | 296,3 | – | 1,52 | 1,75 |

TAB 2. Übersicht des Betriebspunkts der Filmkühlung in der Messpassage (Messreihe 2)

Teilung t des Schaufelgitters normiert. Zusätzlich sind die Höhenlinien der Oberflächenkontur dargestellt, welche mit der betragsmäßig größten Abweichung vom ebenen Oberflächenprofil normiert sind. Vor dem Eintritt in das Turbinengitter befindet sich die höchste Erhebung der Kontur. Anschließend sinkt sie bis zum Minimum im Bereich nahe der Saugseite wieder ab. Zwischen den Filmkühlreihen $FK-5$ und $FK-6$ hebt sich die Kontur erneut an, bevor sie stromab annähernd eben ausläuft. In unmittelbarer Nähe stromauf der Filmkühlreihen steigen die Temperaturwerte stark an, was dem Aufbau der Messplatte geschuldet ist. Die Filmkühlreihen werden unter einem Winkel von 30° in die Messplatte hineingeschoben. Dadurch kann die Wärme in diesem Bereich nicht gleichmäßig durch das Kühlwasser an der Rückseite abgeführt werden. Weiterhin liegen die Temperaturen der Seitenwand in der Nähe der Saugseite tendenziell unterhalb der im Bereich der Druckseite. Die Ursache hierfür ist das Sekundärwirbelsystem, welches die Kühlluft von der Druckseite in Richtung der Saugseite transportiert.

BILD 12 zeigt das Wärmestromdichtefeld, welches auf Grundlage des Temperaturfelds durch eine FE-Berechnung bestimmt wurde. Die Filmkühlreihen werden hierbei nicht diskretisiert, weshalb an diesen Stellen keine Werte vorhanden und weiße Flächen dargestellt sind. Die von der Umgebung abweichenden Oberflächentemperaturen an den Stellen der Thermolemente bewirken ebendort eine deutliche Erhöhung der Wärmestromdichte. Daher sind die eingebetteten Thermolemente auf der ganzen Turbinenseitenwand im Wärmestromdichtefeld sichtbar.

6.1. Sekundärwirbelsystem in der Passage

Die adiabate Filmkühleffektivität auf der Seitenwand im Bereich der Druckseite in BILD 18 sinkt stromab von **A** über **B** nach **C** in einem immer größer werdenden lateralen Bereich ab. Das Sekundärwirbelsystem in der Schaufelpassage lenkt die Kühlluft vermehrt in Richtung der Saugseite ab. Besonders gut ist die Umlenkung an den mittleren Kühlluftbohrungen der Filmkühlreihe $FK-5$ zu sehen. Im Bereich der Druckseite gibt es deshalb kaum einen schützenden Kühlfilm auf der Seitenwand. Sowohl die Konturierung der Seitenwand als auch das Ausblasen von Kühlluft haben einen erheblichen Einfluss auf das Sekundärwirbelsystem. Die Kühlluft wird zwar in Richtung der Saugseite transportiert, jedoch deutlich schwächer als erwartet. Die lokalen Ausblasungen scheinen den druckseitigen Ast des Hufeisenwirbels teilweise in Strömungsrichtung zu halten und ein Auftreffen auf die Saugseite ans Ende der Passage zu verschieben. Die Untersuchungen von Barigozzi et al. [2] führten zu ähnlichen Phänomenen bei einer Seitenwand mit lokalen Kühlluftausblasungen.

6.2. Hufeisenwirbel an der Vorderkante

Die Wärmeübergangserhöhung mit Filmkühlung steigt in BILD 17 in Richtung des Staupunkts der Turbinenschaufel (Bereich **D**) stark an. Hierbei handelt es sich um den Bereich in dem der Hufeisenwirbel an der Vorderkante entsteht, die Grenzschicht dabei eingerollt und vermehrt Fluid aus der Hauptströmung an die Wand transportiert wird (Graziani et al. [7]). Zusätzlich führt das Ausblasen von Kühlluft aus dem Spalt zu einer Verstärkung des Hufeisenwirbels.

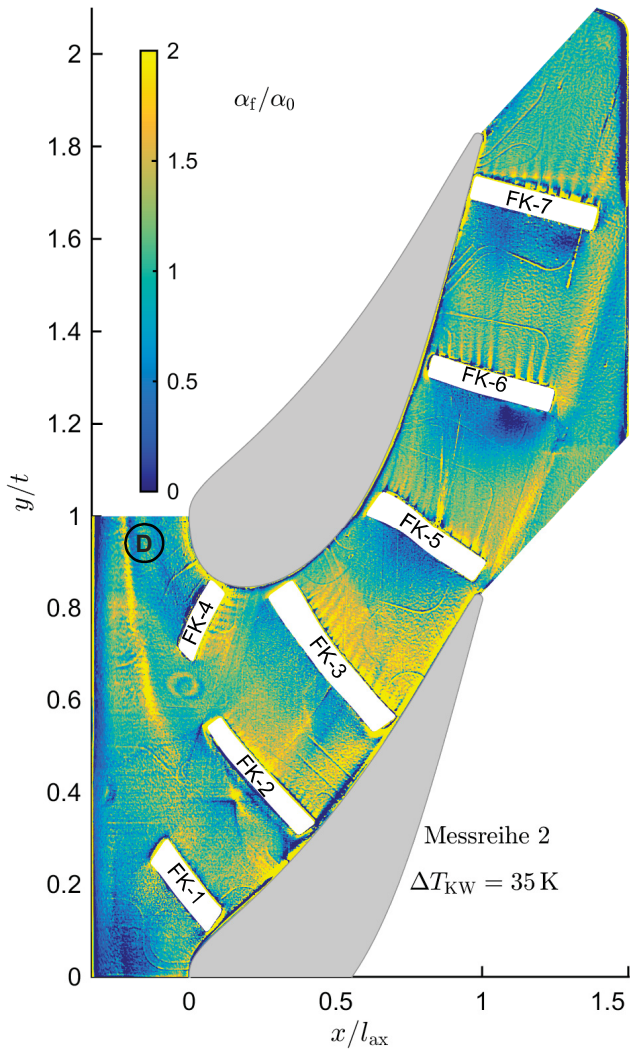


BILD 17. Wärmeübergangserhöhung mit Filmkühlung α_f/α_0 in der Messpassage (Messreihe 2)

Im Bereich der Vorderkante ist die adiabate Filmkühleffektivität in BILD 18 sehr gering. Durch das Aufrollen des Hufeisenwirbels an der Vorderkante der Schaufel gelangt kaum Kühlluft aus dem Spalt in die Nähe des Staupunkts. Die Kühlluft strömt infolgedessen hauptsächlich im mittleren Bereich zwischen den beiden Schaufeln in die Passage.

6.3. Nachläufe der Filmkühlausblasungen

Stromab der Filmkühlreihen steigt die Wärmeübergangserhöhung mit Filmkühlung in BILD 17 stark an. In diesen Bereichen wird der erhöhte Wärmeübergang auf der Seitenwand durch die Interaktion des Heißgases mit der austretenden Kühlluft hervorgerufen.

Des Weiteren ist die adiabate Filmkühleffektivität stromab der hinteren Filmkühlreihen in BILD 18 lokal stark erhöht und die Seitenwand wird durch die austretende Kühlluft vor dem Heißgas geschützt. Vor allem die Filmkühlreihen FK-1 und FK-4 scheinen stark durch den Hufeisenwirbel an der Vorderkante beeinflusst zu werden, welcher eine Kühlung des Bereichs nahe an der Schaufel verhindert. Die Untersuchungen von Barigozzi et al. [2] zeigen ähnliche Effekte

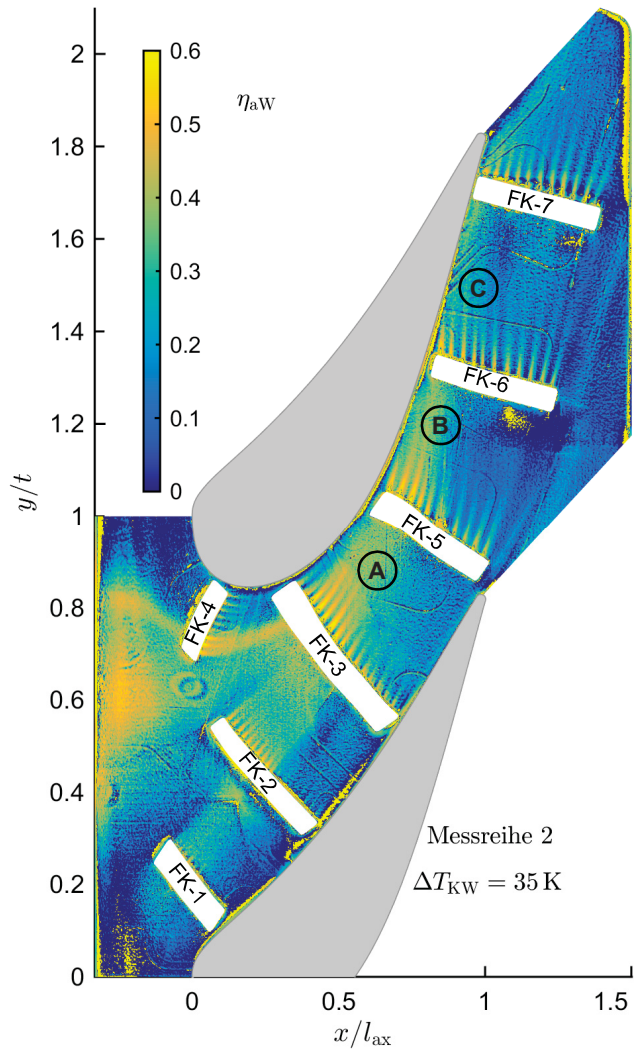


BILD 18. Adiabate Filmkühleffektivität η_{aW} in der Messpassage (Messreihe 2)

bei der Untersuchung der Filmkühlung einer dreidimensionalen konturierten Seitenwand.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Eine Kühlung der heißgasbeaufschlagten Triebwerkskomponenten ist in heutigen Gasturbinen zur Bewältigung der Prozessparameter unabdingbar. Jedoch stellt das Abzapfen von Kühlluft einen Verlust dar, welcher den Zugewinn an Effizienz durch Steigerung der Prozessparameter reduziert. Eine effiziente Kühlung ist deshalb zwingend notwendig. Hierbei besitzt die Turbinenseitenwand ein sehr großes Potential zur Optimierung der eingesetzten Filmkühlung, da eine Konturierung einen maßgeblichen Einfluss auf die Aerodynamik und den Wärmeübergang besitzt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des Wärmeübergangs und der adiabaten Filmkühleffektivität durch Anwendung des Superpositionsprinzips der Filmkühlung. Hierfür wurde eine umfassende Auswerterroutine für Infrarotaufnahmen zur Bewertung der Filmkühlung implementiert, analysiert und optimiert.

Es wurden experimentelle Untersuchungen bei jeweils zwei unterschiedlichen thermischen Randbedingungen an der

Wand durchgeführt. Die Oberflächentemperaturen der Seitenwand wurden jeweils mit neun Infrarotaufnahmen hochaufgelöst gemessen. Nach Bestimmung der Projektionsvorschrift und Anwendung der In-Situ-Kalibrierung wurde das Temperaturfeld rekonstruiert. Die auftretenden Bildübergänge, welche im Rahmen der Kalibrierengenauigkeit lagen, wurden durch einen Glättungsalgorithmus geglättet. Durch die Kalibrierung konnten quadratische Abweichungen der eingebetteten Thermoelemente von unter 0,5 K erreicht werden. Mit dem Temperaturfeld als Randbedingung wurde die Wärmestromdichte mithilfe einer FE-Berechnung bestimmt. Daraus wurden die lokalen Wärmeübergangskoeffizienten mit Filmkühlung und lokalen adiabaten Filmkühleffektivitäten durch Anwenden des Superpositionsprinzips der Filmkühlung bestimmt.

Im gesamten Auswerteprozess wurden gezielte Analysen und Optimierungen an der Routine durchgeführt. An den exemplarisch durchgeführten Messungen konnte die Funktionsfähigkeit der Auswerteroutine aufgezeigt werden. Das Ergebnis der Arbeit ist eine ausgereifte Auswerteroutine für Filmkühluntersuchungen an konturierten Turbinenseitenwänden. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass lokale Filmkühlblasungen einen signifikanten Einfluss auf das Sekundärwirbelsystem besitzen. Zusammen mit der Konturierung kann eine optimierte Kühlung der Seitenwand erreicht werden.

8. LITERATURANGABEN

- [1] Baldauf, S. (2001): Filmkühlung thermisch höchstbelasteter Oberflächen: Korrelation thermographischer Messungen. Dissertation, Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Universität Karlsruhe (TH)
- [2] Barigozzi, G., Franchini, G., Perdichizzi, A. und Ravelli, S. (2010): Film cooling of a contoured endwall nozzle vane through fan-shaped holes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Bd. 31(4), S. 576 – 585
- [3] Bittlinger G., Schulz A. und Wittig S. (1994): Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficients for Slot Injections at High Blowing Ratios, *ASME*, 94-GT-182.
- [4] Bräunling, Willy J. G. (2009): Flugzeugtriebwerke. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, 3. Aufl. ISBN 978-3-540-76368-0
- [5] Choe, H., Kays, W. M. und Moffat, R. J. (1974): The superposition approach to film cooling. *ASME*, 74-WA/GT-27
- [6] Gerdes, I., Klawonn, F. und Kruse, R. (2004): Evolutive Algorithmen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. ISBN 978-3-528-05570-7
- [7] Graziani, R. A., Blair, M. F., Taylor, J. R. und Mayle, R. E. (1980): An experimental study of endwall and airfoil surface heat transfer in a large scale turbine blade cascade. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Bd. 102(2), S. 257 – 267
- [8] Gritsch, M., Baldauf, S., Martiny, M., Schulz, A. und Wittig, S. (1999): The superposition approach to local heat transfer coefficients in high density ratio film cooling flows. *ASME Turbo Expo 1999*, 99-GT-168
- [9] Hartley, R. und Zisserman, A. (2004): *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-54051-3
- [10] Jischa, M. (1982): Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch. Vieweg. ISBN 978-3-322-91591-7
- [11] Jones, T. V. (1991): Definition of heat transfer coefficients in the turbine situation. *Institution of Mechanical Engineers - Turbomachinery: latest developments in a changing scene*, C423/046, S. 201 – 206
- [12] Kneer, J., Pütz, F., Schulz, A. und Bauer, H.-J. (2014): Application of the superposition principle of film-cooling on a non-axisymmetric turbine endwall. *15th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, ISROMAC-15*, S. 1 – 9
- [13] Martiny, M., Schiele, R., Gritsch, M., Schulz, A. und Wittig, S. (1996): In situ calibration for quantitative infrared thermography. *Quantitative InfraRed Thermography*, Bd. 96, S. 3 – 8
- [14] Ochs, M. (2011): Filmkühlung transsonischer Turbinen: Infrarotthermographisches Messverfahren zur Charakterisierung des Wärmeübergangs, Bd. 47/2011. Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Karlsruhe Institut für Technologie
- [15] Perry, D. L. und Dereniak, E. L. (1993): Linear theory of nonuniformity correction in infrared staring sensors. *Optical Engineering*, Bd. 32(8), S. 1854 – 1859
- [16] Saumweber, C. (2005): Filmkühlung thermisch hochbelasteter Gasturbinenschaufeln: Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Diffusorbohrungen. Dissertation, Institut für Thermische Turbomaschinen, Universität Karlsruhe (TH)
- [17] Schuepbach, P., Abhari, R. S., Rose, M. G., Germain, T., Raab, I. und Gier, J. (2010): Improving Efficiency of a High Work Turbine Using Non axisymmetric Endwalls – Part II: Time-Resolved Flow Physics. *Journal of Turbomachinery*, Bd. 132(2), S. 021008
- [18] Schulz, M. und Caldwell, L. (1995): Nonuniformity correction and correctability of infrared focal plane arrays. *Infrared Physics & Technology*, Bd. 36(4), S. 763 – 777.
- [19] Simon, T. W. und Piggush, J. D. (2006): Turbine end-wall aerodynamics and heat transfer. *Journal of Propulsion and Power*, Bd. 22(2), S. 301 – 312
- [20] Wang, H.-P., Olson, S. J., Goldstein, R. J. und Eckert, E. R. (1997): Flow visualization in a linear turbine cascade of high performance turbine blades. *Journal of Turbomachinery*, Bd. 119(1), S. 1 – 8