

1 Einleitung

Studien des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) zeigen auf, dass der Klimawandel durch den Menschen beeinflusst ist (IPCC (2014)). Ein Schwerpunkt der Berichte des IPCC liegt auf den Möglichkeiten zur Minderung der Treibhausgasemissionen. Durch massive Einschnitte in den Treibhausgasemissionen können laut dem Bericht die mit dem Klimawandel verbundenen Auswirkungen auf Ökosysteme, Gesundheit, Wirtschaft etc. gemindert werden. Außerdem können durch Vermeidung solcher Negativauswirkungen des Klimawandels erhebliche Kosten eingespart werden. Dies wird durch die sogenannten *mitigation costs* beschrieben und wirkt sich positiv auf das zukünftige globale Wirtschaftswachstum aus (IPCC (2014)).

Gasturbinen finden sowohl in der Luftfahrt im Transportsektor als auch in der elektrischen Energieerzeugung Anwendung. Durch die Verbrennung von Kraftstoff tragen sie zur Emission von Schadstoffen bei. Die Prognosen für ein gesteigertes Verkehrsaufkommen in der Luftfahrt (Exxon Mobil (2018)) sowie der weltweit langfristig wachsende Bedarf an stationären Gasturbinen in Kraftwerken (Exxon Mobil (2018)) unterstreichen die Wichtigkeit dieser Thematik. Die Reduzierung der Schadstoffemissionen ist eines der Entwicklungsziele der Hersteller von stationären Gasturbinen und Flugtriebwerken (AG Turbo (2014)). Dieses Ziel kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden. Auf der einen Seite werden neue schadstoffarme Verbrennungskonzepte entwickelt. Auf der anderen Seite soll der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden, was durch eine Steigerung des thermischen Wirkungsgrades geschehen kann. Zur Wirkungsgradsteigerung setzt sich das Bestreben nach steigenden Druckverhältnissen und Turbineneintrittstemperaturen in zukünftigen Generationen von Flugtriebwerken fort.

Um durch Steigerung der Turbineneintrittstemperatur zulässige Materialtemperaturen nicht zu überschreiten, bedarf es einer effizienten Kühlung der heißgasbeaufschlagten Bauteile. Aktuell ist es Stand der Technik, die ersten Hochdruckturbinenstufen nicht nur im Inneren konvektiv zu kühlen, sondern auch äußere Kühlmethoden anzuwenden. Hierbei hat sich das Prinzip der Filmkühlung etabliert. Luft wird vom Verdichter abgezapft, an der Brennkammer vorbei geleitet, den zu kühlenden Turbinenschaufeln zugeführt und durch diskrete Bohrungen auf die Oberfläche ausgeblasen. Die ausgeblasene Kühlluft wirkt als thermisch isolierende Schicht in Wandnähe und als Wärmesenke zugleich. Die Temperatur an der Bauteiloberfläche und der Wärmestrom in das Bauteil hinein können durch entsprechende Wahl von Kühlluftmenge und Position bzw. Geometrie der Kühlluftbohrungen beeinflusst werden. Da die Kühlluft nicht vollständig am thermodynamischen Kreisprozess teilnimmt, stellt sie einen Verlust dar. Um Wirkungsgradgewinne durch höhere Heißgastemperaturen nicht durch erhöhten Kühlluftbedarf zunichte zu machen, bedarf es einem effizienten Umgang mit ohnehin nur begrenzt vorhandener Kühlluft. Die Kühlwirkung wird unter anderem von der Rauigkeit auf den zu kühlenden Oberflächen beeinflusst, da Oberflächenrauigkeit sowohl die Aerodynamik im wandnahen Bereich als auch den Wärmeübergang massiv beeinflusst.

Oberflächenrauigkeit tritt sowohl in stationären Gasturbinen, als auch in Flugtriebwerken auf. Turbinenschaufeln mit thermischen Schutzschichten aus Keramik besitzen bereits im Neuzustand keine hydraulisch glatte Oberfläche. Hinzu kommt die Bildung weiterer Oberflächenrauigkeit im Betrieb beispielsweise durch Ablagerungen oder Abplatzungen. Vergangene Untersuchungen



Abbildung 1.1: Aufnahme einer modernen filmgekühlten Hochdruckturbinenschaufel nach ihrem Einsatz in einem Flugtriebwerk

zeigen, dass sich die Oberflächenrauigkeit von Gasturbinenbauteilen im Betrieb stark ändert (siehe beispielsweise Bons (2010)). In Abbildung 1.1 ist eine Hochdruckturbinenschaufel aus einem Flugtriebwerk gezeigt. Nach dem Einsatz in der Maschine sind auf der Oberfläche deutlich Ablagerungen zu erkennen. Diese befinden sich in der Regel vor allem in Bereichen auf der Druckseite und somit in der Nähe der Filmkühlbohrungen.

Aktuell sind Turbomaschinenhersteller aufgrund von Unsicherheiten in den Vorhersagemethoden zur Kühlwirkung auf rauen Oberflächen gezwungen, mehr Kühlluft als nötig auszublasen. Diese Problematik verschärft sich für zukünftige Generationen von Flugtriebwerken und stationären Gasturbinen mit gesteigerten Turbineneintrittstemperaturen. Je genauer die Kühlwirkung stromab von Filmkühlbohrungen im Auslegungsprozess bekannt ist, desto weniger Kühlluft kann in der Auslegung für den sicheren Betrieb der Maschinen vorgesehen werden. Um weitergehendes Verständnis zum Einfluss von Oberflächenrauigkeit auf die Kühlwirkung stromab von Filmkühlbohrungen aufzubauen, wird am Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) weiterhin auf diesem Themengebiet geforscht. Wichtig ist hierbei, dass experimentelle Untersuchungen unter maschinenähnlichen Bedingungen durchgeführt werden, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Einfluss von Oberflächenrauigkeit auf die Filmkühlwirkung untersucht und quantifiziert werden. Ein genaueres Verständnis des Einflusses der Oberflächenrauigkeit auf die Filmkühlwirkung führt zu einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit im Auslegungsprozess, zur Einsparung von Kühlluft und somit zu einer Steigerung des Gesamtwirkungsgrades der Maschine.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen Grundlagen sowie der aktuelle Stand der Forschung dargelegt. Es wird zunächst auf Oberflächenrauigkeit in Gasturbinen eingegangen. Anschließend werden Einflussgrößen des konvektiven Wärmeübergangs diskutiert und insbesondere der Kenntnisstand zum Wärmeübergang auf rauen Oberflächen erläutert. Abschließend wird auf das Themengebiet der Filmkühlung in Gasturbinen eingegangen. Aus den identifizierten Forschungslücken wird die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet und die gewählte Vorgehensweise beschrieben.

2.1 Oberflächenrauigkeit in Gasturbinen

Zur Beschreibung geometrischer Körper und deren Abgrenzung zum umgebenden Raum wird zwischen der idealen (Soll-)Oberfläche und der realen (Ist-)Oberfläche unterschieden. Die Differenz dieser beiden Oberflächen wird im Folgenden als Oberflächenrauigkeit bezeichnet. Formabweichungen sowie sonstige Geometrieabweichungen werden nicht betrachtet.

Es existieren verschiedene Mechanismen, die in Gasturbinen zur Entstehung von Oberflächenrauigkeit führen. Das Aufbringen thermischer Schutzschichten kann zu einer nicht zu vernachlässigenden Oberflächenrauigkeit bei Neuteilen führen (Bons (2002), Bunker (2003)). Im Betrieb führen Erosion, Korrosion oder Ablagerungen von Fremdpartikeln auf den Oberflächen von Turbinenschaufeln zu einer Steigerung der Oberflächenrauigkeit. In der Veröffentlichung von Hamed et al. (2006) sind bisherige Forschungsergebnisse zu den Themen Erosion und Ablagerungen in Turbomaschinen zusammengefasst. Rauigkeitseigenschaften variieren sehr stark und sind abhängig von der Anzahl der Betriebsstunden und Zyklen sowie der Brennstoffart und dem Einsatzort der Maschine. Der Großteil der Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf das Betriebsverhalten von Gasturbinen sind in der Veröffentlichung von Bons (2010) zusammengefasst. Ergebnisse der Studien zeigen, dass Strömungen über Oberflächen durch die Rauigkeit der Oberfläche beeinflusst werden. Für laminare Grenzschichten verändert sich der Ort des laminar-turbulenten Umschlags. Für turbulente Grenzschichten erfolgt eine Aufdickung der Grenzschicht sowie eine Veränderung der turbulenten Durchmischung in Wandnähe sowie der Wandschubspannung. Insgesamt führt eine Vergrößerung der Oberflächenrauigkeit zu einer Erhöhung der Verluste. Neben Strömungen wird auch der Wärmeübergang durch Oberflächenrauigkeit verändert. In der Turbine wird der konvektive Wärmeübergang durch Oberflächenrauigkeit erhöht. Während die Erhöhung des Wärmeübergangs auf Turbinenschaufeln für die innere Kühlung gewünscht ist, ist dies im Allgemeinen auf der Heißgasseite nicht der Fall. Insgesamt führt Oberflächenrauigkeit zu einer Minderung des Wirkungsgrades von Gasturbinen (Bammert und Sandstede (1972)). Im Laufe des Betriebs einer Maschine äußert sich ein Anstieg der Oberflächenrauigkeit in einem graduellen Absinken der Leistung bzw. des Schubs und einem Anstieg des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (Bons (2010)).

Im Folgenden werden verschiedene Kenngrößen zur Charakterisierung von Oberflächenrauigkeit beschrieben. Anschließend wird auf bisherige Veröffentlichungen mit dem Ziel der Bestimmung der Oberflächenrauigkeit in Gasturbinen eingegangen.

2.1.1 Rauigkeitskenngrößen

Zur Charakterisierung von Oberflächenrauigkeit können verschiedene Größen herangezogen werden. Durch diese Größen werden u.a. die Rauigkeitshöhe oder die Verteilung der Rauigkeit auf einer Oberfläche beschrieben. Mit Hilfe statistischer Parameter wie Steilheit R_{ku} und Schiefe R_{sk} lässt sich bewerten, ob und wie stark die Verteilung der Oberflächenrauigkeit von einer Normalverteilung abweicht. Die mittlere Rauigkeitshöhe R_a oder der quadratische Mittelwert R_q werden in der Werkstoffkunde und Fertigungstechnik zur Charakterisierung von Oberflächen verwendet. Allerdings sind in diesen Mittelwerten nicht in ausreichender Form Informationen zur Form und Dichte der Rauigkeit enthalten. Wie von Bogard et al. (1998) festgestellt und von Goodhand et al. (2015) bestätigt, eignet sich die mittlere Rauigkeitshöhe R_a nur sehr begrenzt zur Charakterisierung der Auswirkungen von Oberflächenrauigkeit auf Strömungen und Wärmeübergang. Goodhand et al. (2015) bemängelten vor allem, dass die Oberflächentopografie durch den Parameter nicht ausreichend erfasst wird.

Erste experimentelle Untersuchungen zu Rohrströmungen mit glatten und rauen Oberflächen wurden von Nikuradse (1933) und Schlichting (1936) durchgeführt. Die Rauigkeit wurde dabei durch Sandkörner mit einheitlichem Durchmesser in dichtester Packung auf die Oberfläche aufgebracht. Schlichting (1936) definierte genau diese Anordnung als *äquivalente Sandkornrauigkeit* k_s und führte sie als Vergleichsgröße ein. Eine Entdimensionierung seiner Ergebnisse führte Nikuradse (1933) mit Hilfe der Schubspannungsgeschwindigkeit u_τ und der kinematischen Viskosität ν der Strömung durch:

$$k_s^+ = \frac{k_s u_\tau}{\nu}. \quad (2.1)$$

Indem die Rauigkeitshöhe k bzw. k_s auf diese Weise zum Zustand der Strömungsgrenzschicht in Bezug gesetzt wird, lassen sich verschiedene Regime voneinander abgrenzen. Allgemein lässt sich die turbulente Strömungsgrenzschicht in verschiedene Bereiche unterteilen. Laut Schlichting und Gersten (2006) existiert eine im Vergleich zur Gesamtdicke der Grenzschicht dünne Schicht in unmittelbarer Nähe der Wand. Diese wird als viskose Unterschicht bezeichnet. Innerhalb dieser Schicht dominiert die Viskosität über turbulenten Austausch der Strömung. Für den Einfluss der Oberflächenrauigkeit ist die viskose Unterschicht entscheidend. Nach Nikuradse (1933) und Schlichting (1936) existieren drei Bereiche, die sich darin unterscheiden, wie die Oberflächenrauigkeit die Strömung beeinflusst:

Bereich I ($k_s^+ < 5$): hydraulisch glatter Bereich. Die Rauigkeitshöhe ist kleiner als die der viskosen Unterschicht der Strömungsgrenzschicht. Rauigkeitsspitzen reichen nicht weit genug in die Strömung hinein, um diese zu beeinflussen. Der Widerstandsbeiwert ist unbeeinflusst durch eine Veränderung der Oberflächenrauigkeit.

Bereich II ($5 \leq k_s^+ \leq 70$): Übergangsbereich. Die Rauigkeitshöhe ist in derselben Größenordnung wie die viskose Unterschicht der Strömungsgrenzschicht. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit ist abhängig von der Viskosität des überströmenden Fluids.

Bereich III ($k_s^+ > 70$): vollständig rauher Bereich. Die Rauigkeit ragt über die viskose Unterschicht der Strömungsgrenzschicht hinaus. Der Widerstandsbeiwert und somit der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Strömung ist unabhängig von der Viskosität.