

1 Einführung und Zielsetzung

In der modernen Luftfahrt sind Turbinen-Luftstrahltriebwerke aufgrund ihrer hohen Leistungsdichte als Antrieb nicht wegzudenken. Um die Nachhaltigkeit im Flugverkehr zu steigern, haben sich im Jahr 2009 die Verantwortlichen der Luftfahrt auf eine Klimaschutzstrategie geeinigt, durch die der CO₂-Ausstoß weiter reduziert und die Effizienz von Flugzeugen gesteigert werden sollen. Neben der Reduktion von aerodynamischen Verlusten und der Verwendung von leichteren Werkstoffen wird der Effizienzsteigerung der Antriebe eine große Bedeutung zugeschrieben. Bei einer Anzahl von 45,6 Millionen Flügen im Jahr 2018 (Statistisches Bundesamt, 2021) und mit teilweise über 200.000 Flügen pro Tag wird das Potenzial zur Energieeinsparung in diesem Sektor deutlich.

Der in Triebwerken ablaufende Prozess zur thermischen Energiewandlung wird auch in stationären Gasturbinen zur Stromerzeugung eingesetzt. Obwohl die Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen international weiter zurückgefahren wird, werden auch zukünftig noch Gasturbinen benötigt, um die Netzstabilität zu gewährleisten. Durch die große Flexibilität bei den verwendeten Brennstoffen sind Gasturbinen zudem prädestiniert, um zukünftig auch mit alternativen Brennstoffen, wie Bio- oder Synthesegas bzw. synthetischen Flüssigbrennstoffen eingesetzt zu werden (Chiong et al., 2018).

Durch die Corona-Krise und den damit verbundenen internationalen Reisewarnungen kam es zu einem bedrohlichen Umsatzeinbruch bei den Fluggesellschaften. Selbst die größten europäischen Gesellschaften, wie die Deutsche Lufthansa AG oder auch Air France-KLM S.A., konnten diese Krise ohne staatliche Hilfe nicht überstehen. Im Gegenzug zu der notwendigen finanziellen Unterstützung wurde von vielen Fluggesellschaften ein Abkommen unterzeichnet, durch das der Flugverkehr CO₂ neutraler gestaltet werden soll. Dies wird nicht ausschließlich durch die Reduktion von Inlandsflügen, sondern auch durch eine Erneuerung der Flotte mit effizienteren und schadstoffreduzierten Maschinen geschehen.

Eine Effizienzsteigerung dieser Maschinen kann durch die Reduktion von aerodynamischen Verlusten sowie die Anhebung der Turbineneintrittstemperatur und Anpassung des Gesamtdruckverhältnisses erreicht werden. Mit Temperaturen von bis zu 2000 K wird ohne ausreichende Kühlung die zulässige Materialtemperatur der heißgasführenden Bauteile, wie Turbinenschaukeln oder Seitenwände der Brennkammer, überschritten. Der zur Kühlung dieser hochbelasteten Bauteile genutzte Luftmassenstrom beträgt in aktuellen Maschinen 20 % - 30 % des Luftmassenstromes durch das Kerntriebwerk. Da dieser Teil der Luft verlustbehaftet komprimiert werden muss, jedoch nicht am gesamten thermodynamischen Kreisprozess teilnimmt, reduziert sich der Wirkungsgrad der Maschine. Um zukünftig den Kühlluftmassenstrom verringern zu können, muss die Unsicherheit der Auslegungswerkzeuge weiter reduziert werden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei der Wärmeübergang und daher auch die Grenzschicht zwischen dem heißen Gas und den zu kühlenden Oberflächen. Der Wärmeübergang und auch die aerodynamischen Verluste sind maßgeblich vom Grenzschichtzustand und somit von der laminar-turbulenten Transition an den umströmten Bauteilen abhängig. Selbst nach jahrzehntelanger Forschung haben die modernsten Berechnungsmodelle zur Vorhersage des laminar-turbulenten Übergangs bei hoher Freistromturbulenz immer noch eine unzureichende Genauigkeit (Mayle, 2018). Der zu

erwartende Fehler wird bei Berechnungen von komplexen Grenzschichtströmungen mit stark anisotroper Freistromturbulenz und gekrümmten Oberflächen noch deutlich größer. Zusätzlich wirkt sich die Oberflächenbeschaffenheit stark auf die Transition aus. Durch den Verschleiß keramischer Schutzschichten sowie Ablagerungen von z. B. Asche und Sand ändert sich die Oberflächenrauheit dazu kontinuierlich während des Betriebs. Weiterhin werden durch additive Fertigungsverfahren wie selektives Lasersintern neue Gestaltungsfreiheiten ermöglicht, bei denen fertigungsbedingt allerdings mit einer erhöhten Rauheit zu rechnen ist.

Trotz vieler detaillierter experimenteller Untersuchungen und Fortschritten bei der Direkten Numerischen Simulation (DNS) sind die Vorgänge, die zur laminar-turbulenten Transition führen, noch immer nicht vollständig verstanden. Vor allem seien hier die Einflüsse der turbulenten Längenmaße sowie der Oberflächenbeschaffenheit genannt, die nach wie vor Forschungslücken aufweisen. Im letzten Jahrzehnt konnten mithilfe von DNS große Fortschritte erzielt werden. Der beträchtliche Rechenaufwand dieser Untersuchungen erlaubt jedoch keine statistische Auswertung, da nur kurze Zeitintervalle gerechnet werden können. Der stochastische Charakter der laminar-turbulenten Transition ist deshalb auch mit DNS nicht gut zu erfassen. Für die Entwicklung von zuverlässigen Berechnungsmodellen werden deshalb weitere experimentelle Untersuchungen benötigt, die möglichst viele Informationen über die turbulente Freiströmung und die Vorgänge in der Grenzschicht liefern.

Im Rahmen dieser Arbeit soll diese Lücke durch detaillierte Messungen an einem neu entwickelten Thermowindkanal geschlossen werden. Die so erstellte Testfalldatenbank bietet eine Basis für die Entwicklung von neuen Berechnungsmodellen. Um den Einfluss der Oberflächenkrümmung und damit von Görtler-Wirbeln und weiteren Sekundärinstabilitäten zu verhindern, werden die Untersuchungen an einer ebenen Messplatte durchgeführt. Um dennoch realitätsnahe Strömungsbedingungen zu erhalten, wird über konturierte Kanalober- und unterseiten eine Druckverteilung erzeugt, wie sie auch an Turbinenschaufeln vorliegt. Der Versuchsaufbau erlaubt zudem erstmals eine voneinander unabhängige Variation der Turbulenzintensität und der turbulenten Längenmaße, welche die Haupteinflussgrößen auf die Grenzschicht darstellen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in vier größere Abschnitte. In Kapitel 2 wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich der transitionalen Grenzschichtströmungen mit hoher Freistromturbulenz und starken Druckgradienten gegeben. In Kapitel 3 wird der neu entwickelte Thermowindkanal mit der eingesetzten Messtechnik beschrieben. In der darauffolgenden experimentellen Untersuchung erfolgt sowohl die Untersuchung der transitionalen Grenzschichtströmungen sowie die detaillierte Charakterisierung der turbulenten Freiströmung. Der letzte Teil der Arbeit befasst sich mit der Modellierung der turbulenten Freiströmung und der transitionalen Grenzschicht.

2 Stand der Forschung

Die aerodynamischen Verluste sowie der äußere Wärmeübergang an thermisch hochbelasteten Bauteilen, wie zum Beispiel Turbinenschaufeln von Flugtriebwerken oder Gasturbinen, hängen maßgeblich von den Strömungsverhältnissen im wandnahen Bereich bzw. in der sog. Grenzschicht ab. Der Zustand der Grenzschicht ist entweder laminar, vollturbulent oder kann einen Mischzustand dazwischen annehmen. Wird zum Beispiel eine Turbinenschaufel umströmt, so bildet sich zunächst stromab der Staustromlinie eine laminare Grenzschichtströmung mit gerichteten Stromlinien aus, die sich im Vergleich zu turbulenten Grenzschichten durch geringere Strömungsverluste und einen niedrigeren Wärmeübergang auszeichnet. Die laminare Strömung kann stromab instabil werden und in einen turbulenten Zustand übergehen. Dieser Übergang wird auch als laminar-turbulente Transition bezeichnet und kann nahezu schlagartig oder auch fließend stattfinden und sich über einen weiten Bereich erstrecken. Im darauf folgenden turbulenten Bereich ist die Grenzschicht durch Turbulenzwirbel geprägt, durch die sowohl die Strömungsverluste als auch der Wärmeübergang stark ansteigen.

Diese Arbeit fokussiert auf den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung und dessen Beeinflussung durch die Freistromturbulenz. Nachfolgend werden deshalb zunächst die möglichen Transitionsmechanismen erläutert und der aktuelle Stand der Forschung zusammengefasst.

2.1 Übersicht über Transitionsmechanismen

Da sowohl die Reibungsverluste als auch der Wärmeübergang in laminaren Grenzschichtströmungen deutlich geringer sind als im turbulenten Fall, ist die Vorhersage des laminar-turbulenten Übergangs bei der Auslegung von Bauteilen, wie Turbinenschaufeln, von großer Bedeutung. Wie hoch die Reibungskräfte und der Wärmeübergang sind, wo die Transition beginnt und über welchen Bereich sie sich erstreckt, ist von vielen Faktoren abhängig. Die Haupteinflussgrößen sind hierbei die Reynoldszahl, der Druckgradient, die Freistromturbulenz sowie die Oberflächenbeschaffenheit (Mayle, 1991; Stripf, 2007; Mayle, 2018). Weiterhin wird die Grenzschicht durch instationäre Nachläufe stromaufliegender Schaufeln, Oberflächenkrümmung, Vibrationen, das Machzahlniveau sowie den Temperaturunterschied zwischen Heißgas und Schaufeloberfläche beeinflusst.

Je nach Randbedingung kann die Transition in Form einer natürlichen Transition oder einer Bypasstransition erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist die Transition über eine abgelöste Scherschicht, die jedoch nicht als gesonderter Transitionsmechanismus betrachtet wird. Bei geringer Freistromturbulenz ($Tu < 1\%$) findet eine natürliche Transition statt, bei der kleine Störungen innerhalb der Grenzschicht entstehen und durch eine Instabilität der Grenzschicht immer weiter anwachsen. Der zweite und in dieser Arbeit untersuchte Mechanismus der Transition wird als Bypass-Transition bezeichnet und tritt bei Grenzschichtströmungen mit erhöhter Freistromturbulenz auf. Hierbei entstehen die Störungen entgegen der natürlichen Transition nicht von selbst in der Grenzschicht, sondern werden durch Interaktionen mit der turbulenten Freistromturbulenz induziert. Die Einflüsse der Freistromturbulenz, die zur Bypasstransition führen, können zusätzlich durch Oberflächenrauheiten verstärkt werden. Bei der Transition über eine

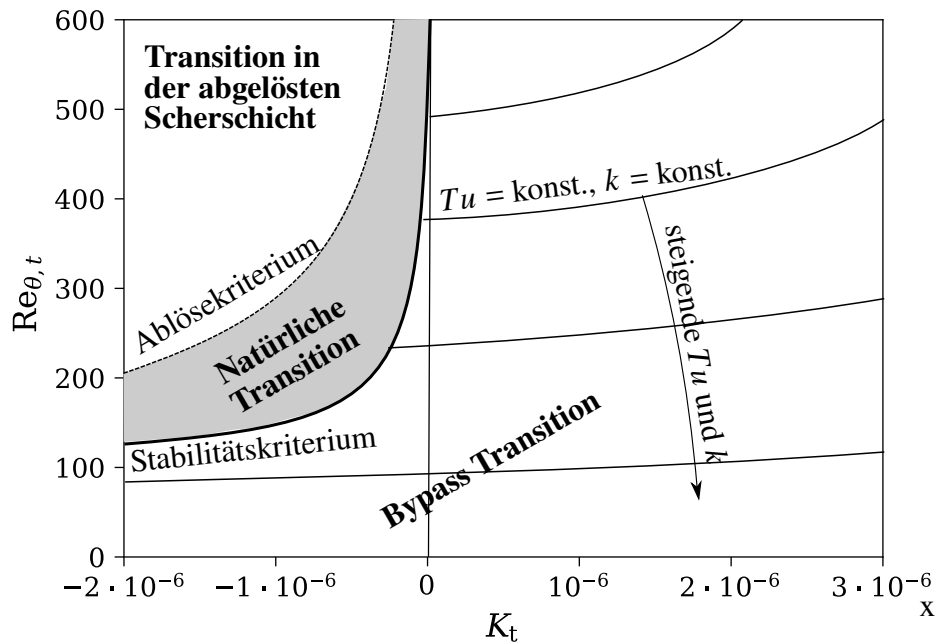


Abbildung 2.1: Transitionsmechanismen nach Mayle (1991) und Stripf (2007)

abgelöste Scherschicht löst die laminare Grenzschicht von der Wand ab und geht daraufhin in den turbulenten Zustand über. Der höhere Querimpulsaustausch in der turbulenten Strömung kann stromab der Ablösung zum Wiederaanlegen der Grenzschicht führen.

Mithilfe der Impulsverlustdickenreynoldszahl

$$\text{Re}_{\theta,t} = \frac{\bar{u}_{\infty} \cdot \theta}{\nu} \quad (2.1)$$

und dem dimensionslosen Beschleunigungsparameter

$$K_t = \frac{\nu}{\bar{u}_{\infty}^2} \frac{d\bar{u}_{\infty}}{ds} \quad (2.2)$$

lässt sich nach Mayle (1991) eine transitionale Grenzschicht einer der zwei Transitionsarten (*natürlich*, *bypass*) oder einer abgelösten Grenzschicht zuordnen. Die Impulsverlustdickenreynoldszahl wird hierbei mit der lokalen Freistromgeschwindigkeit \bar{u}_{∞} , der Impulsverlustdicke θ und der kinematischen Viskosität ν gebildet. Für die Bestimmung des Beschleunigungsparameters wird zudem der Geschwindigkeitsgradient in der Freistromung $d\bar{u}_{\infty}/ds$ benötigt. Die Unterteilung in die zuvor beschriebenen Bereiche wird in Abb. 2.1 verdeutlicht. Neben den genannten Größen Impulsverlustdickenreynoldszahl $\text{Re}_{\theta,t}$ und Beschleunigungsparameter K_t wird in dieser Darstellung auch der Einfluss der Turbulenzintensität Tu , die das Verhältnis von Geschwindigkeitsfluktuationen zur mittleren Geschwindigkeit einer turbulenten Strömung darstellt, gezeigt. Ein ähnlicher Einfluss lässt sich auch über die Oberflächenrauheit erzielen, die im Diagramm vereinfacht über die Rauheitshöhe k gekennzeichnet ist. Der Einfluss der Freistromturbulenz ist ein großer Bestandteil dieser Arbeit. Dabei wird unter anderem gezeigt, dass die Turbulenzintensität einen wesentlichen Einfluss auf die Bypass-Transition hat, aber auch die turbulenten