

Experimentelle Untersuchung von Anstreifvorgängen in Turbomaschinen

Oliver Munz¹, Corina Schwitzke¹, Sarah Welzenbach², Tim Fischer², Sonun Ulan Kzyz³, Hans-Jörg Bauer¹

¹ Institut für Thermische Strömungsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie, 76131 Karlsruhe
E-mail: oliver.munz@kit.edu

² Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik, Technische Universität München, 85747 Garching

³ Lehrstuhl Metallische Werkstoffe, Universität Bayreuth, 95447 Bayreuth

Stichworte: Labyrinthdichtungen, Honigwaben, Anstreifen, Prüfstand, Gasturbine

Einleitung

Die europäische Kommission hat in einem Strategiepapier für das Jahr 2050 dem weltweiten Flugverkehr ein erhebliches Wachstum von 4-5 % jährlich prognostiziert [1]. Die damit steigende Verantwortung für umweltfreundliche und nachhaltige Mobilität wurde in der Formulierung von Zielen für die Reduktion von CO₂-, NO_x- und Lärmemissionen von 65-90 % festgelegt. Eine der wichtigsten Maßnahmen, diesen Anforderungen gerecht zu werden, stellt die Effizienzsteigerung der Triebwerke dar. Um den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen und den Kraftstoffverbrauch zu senken, werden Triebwerke aufgrund des steigenden Nebenstromverhältnisses immer größer und die Turbineneintrittstemperatur sowie das Druckverhältnis nehmen zu. Hieraus ergibt sich ein erhebliches Potential, die Komponentenwirkungsgrade und somit den Gesamtwirkungsgrad durch kostengünstige Entwicklungen deutlich zu steigern.

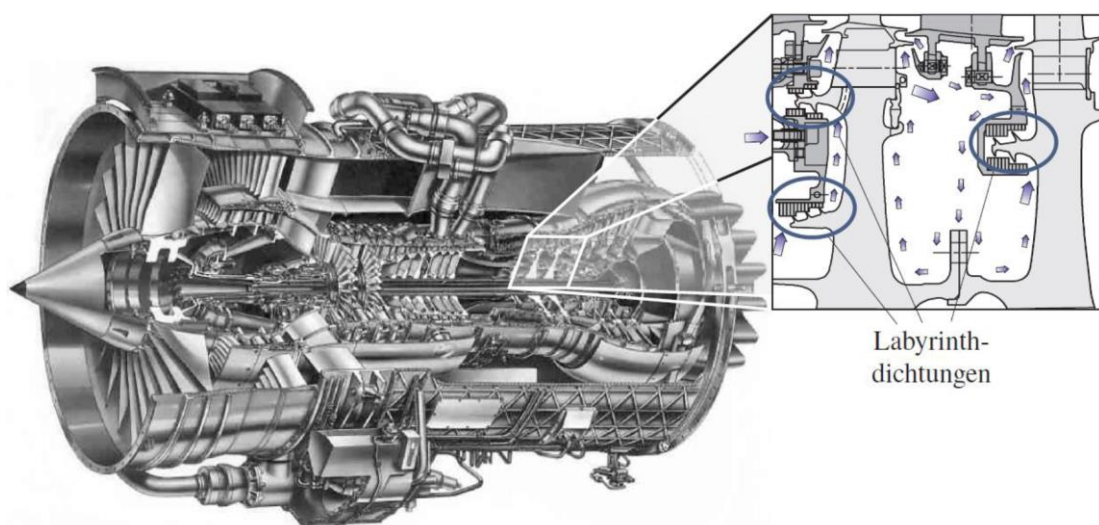


Abb. 1: Eingesetzte Labyrinthdichtungen im Kühlluftsystem des Rolls-Royce Triebwerks BR715, aus [2].

Wichtige Komponenten eines Triebwerks sind Dichtungen, die einen wirkungsgradreduzierenden Leckagemassenstrom zwischen rotierenden und statischen Bauteilen verhindern (siehe Abbildung 1). Das am häufigsten eingesetzte, berührungslose Dichtsystem in einer Turbomaschine ist die Labyrinthdichtung [3]. Neben der Reduktion des Leckagemassenstroms hat die Dichtung die Aufgabe, ein durch thermische und mechanische Ausdehnungen verursachtes Anstreifen des Rotors zu tolerieren und durch einen schnellen, kontrollierten Verschleiß des Stators den Rotor vor Beschädigungen zu schützen. Vor allem in Turbinen, wo hohe Temperaturen, Drücke und Relativgeschwindigkeiten herrschen, werden Honigwabenstrukturen als statorseitige Einlaufbeläge verwendet. Die periodische Hohlkörperstruktur der Honigwaben setzt dem Rotor einen niedrigen Kontaktdruck entgegen und erzeugt so weniger Reibenergie. Die Optimierung dieses Einlaufsystems, bestehend aus den Dichtspitzen auf dem Rotor und dem statorseitigen Einlaufbelag, hinsichtlich der Sicherheit der Komponenten und eines minimalen Leckagemassenstroms setzt ein physikalisches Verständnis für dieses komplexe tribologische System voraus. Mithilfe experimenteller Ergebnisse wird in diesem Forschungsvorhaben ein Modellierungsansatz entwickelt, der auftretende Kräfte, Temperaturen und den Verschleiß des Systems abbilden kann. Damit werden Maßnahmen abgeleitet, die die Lebensdauer, Sicherheit und Dichteffizienz der eingesetzten Dichtungen steigern und somit zu einer Erhöhung des Gesamtwirkungsgrads beitragen.

Versuchsaufbau und Durchführung

In Abbildung 2 sind die Geometrie eines Honigwabenbelages und mögliche Positionen einer Dichtspitze dargestellt. Eine Variation der Dichtspitzenposition ergibt eine Vielzahl möglicher Kontaktflächen. Zur Reduktion der Systemkomplexität und Aufbau des physikalischen Verständnisses werden in der ersten Phase nur die zwei angedeuteten Maximalpositionen des parallelen und schrägen Anstreifens an dünnen Einzelblechen untersucht. Hierfür wurde am Institut für Thermische Strömungsmaschinen ein innovativer Anstreifprüfstand aufgebaut [4,5].

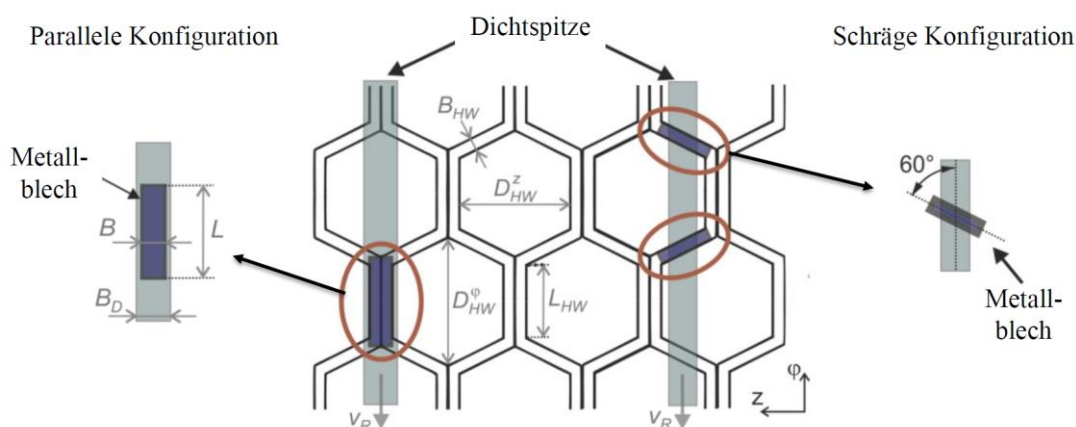


Abb. 2: Geometrie der Honigwaben und mögliche maximale Dichtspitzenpositionen, nach [4].

Der in Abbildung 3 dargestellte Prüfstand besteht aus einem Rotor, der von einem Elektromotor angetrieben wird. Auf den Rotor sind drei verschiedene Dichtspitzen-Geometrien gefertigt. Mit einer axial sowie radial beweglichen Traverse und einem Linearaktuator ist es möglich, Metallbleche der Abmessungen 20 mm x 12 mm und variabler Dicke, mit einer konstanten Geschwindigkeit und einer definierten Eindringtiefe auf den Rotor zuzustellen. Durch Konstruktion einer Hochgeschwindigkeits-Lagerung sowie der Auslegung der Rotorgeometrie und des Containers können Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/s und Zustellraten von 1,5 mm/s realisiert werden. Die einstellbaren Parameter sind somit die Relativgeschwindigkeit, die Zustellrate, die Dichtspitzengeometrie, die Blechdicke, die Anstreifkonfiguration und die Materialpaarung. Eine effiziente und kontrollierte Variation der Eingangsparameter wird mithilfe der statistischen Versuchsplanung realisiert.

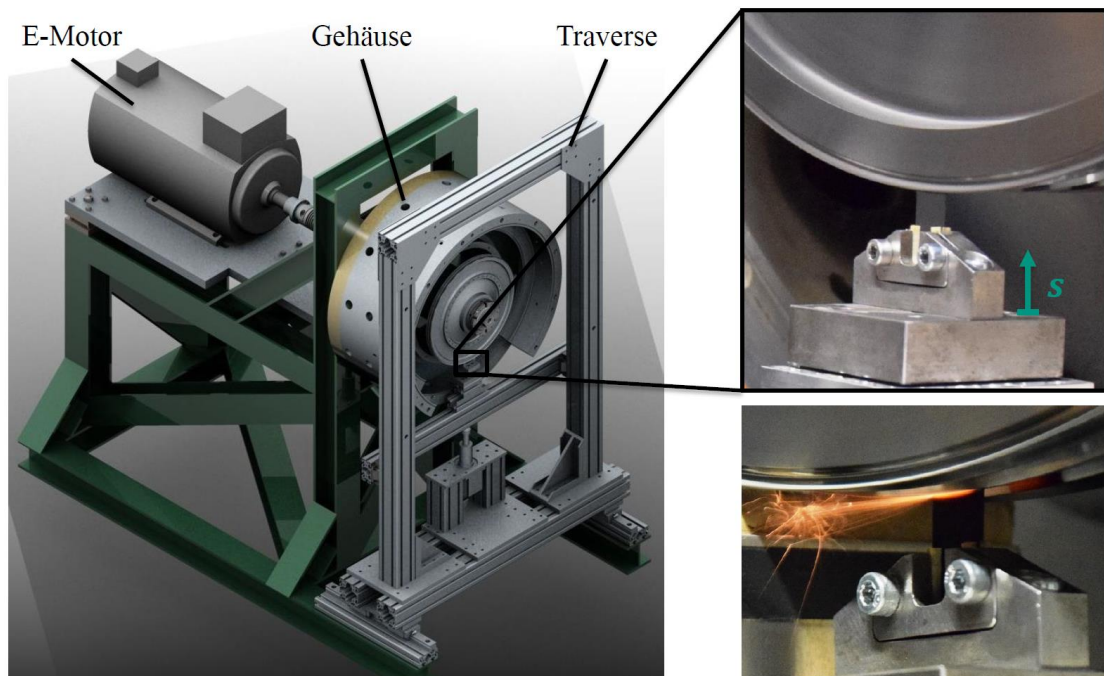


Abb. 3: Überblick über den Anstreibprüfstand am ITS, Funkenschlag während eines Anstreibversuchs.

Der Prüfstand ist mit einer berührungslosen Temperaturmesstechnik ausgestattet, mit der die Temperaturen der Dichtspitze und des Blechs erfasst werden können. Die Oberflächentemperatur der schnell rotierenden Dichtspitze wird mit zwei Hochgeschwindigkeitspyrometern für verschiedene Temperaturbereiche aufgenommen. Mithilfe einer Infrarotkamera können örtlich sehr hoch aufgelöste Temperaturprofile des stationären Blechs aufgenommen werden. Die resultierenden Reibleistungen und die Kontaktdrücke können anhand der Daten eines piezoelektrischen Kraftsensors und einer Drehmomentmesswelle berechnet werden. Alle Messwerte werden von einer simultanen Datenerfassung aufgezeichnet.

Wie am Funkenflug in Abbildung 3 zu erkennen, wird während eines Anstreichvorgangs Reibenergie frei, die das Material des Einlaufbelags bis nahe an den Schmelzpunkt der eingesetzten Werkstoffe erhitzt. Aufgrund ihres Widerstands gegenüber thermischen Belastungen und Korrosion werden hierfür hauptsächlich Nickelbasislegierungen wie Haynes 214 und Hastelloy X eingesetzt. Werkstoffdaten nahe am Schmelzbereich sind kaum in der Literatur erhältlich. Da das Werkstoffverhalten bei diesen Temperaturen einen wesentlichen Einfluss auf den Anstreichvorgang hat, werden parallel zu den Anstreichversuchen am KIT an der Universität Bayreuth physikalische und mechanische Werkstoffkennwerte bis nahe an den Schmelzpunkt ermittelt.

Simulation

An der Technischen Universität München wird ein mehrskaliges Finite Elemente (FE) Modell entwickelt und mithilfe der experimentell erfassten Temperaturen und Kontaktdrücke validiert. In das thermomechanische FE-Modell werden zusätzliche Formulierungen eingebracht, die die Mikrostruktur sowie den Verschleiß der Dichtspitze und des Blechs wiedergeben können. In Abbildung 4 ist die Ausgangsgeometrie des numerischen Modells des Blechs und der Dichtspitze dargestellt. Unmittelbar während des Anstreichens kommt es zu einer starken Erwärmung des Materials. Dies führt zu einem starken plastischen Verschleiß, erkennbar anhand einer sogenannten Aufpflanzung des Blechs in Abbildung 4.

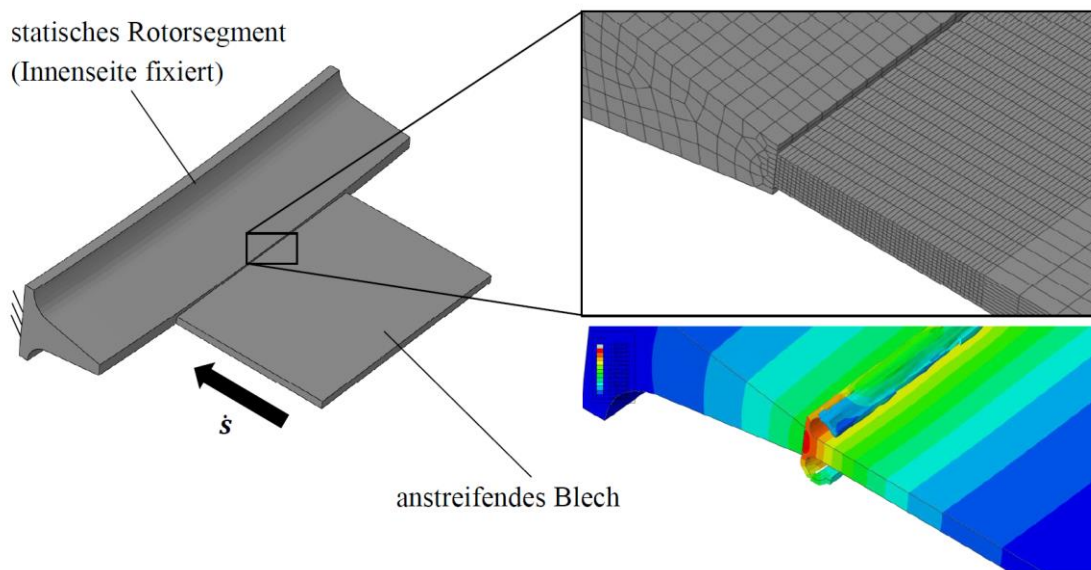


Abb. 4: Geometrie des FE-Modells vor dem Anstreifen und plastische Verformung sowie Temperaturentwicklung während eines Anstreichvorgangs.

Die Kenntnis und Modellierung der zugrundeliegenden Verschleißmechanismen und die sehr genaue Bestimmung der Werkstoffkennwerte ist für zuverlässige Aussagen über die Temperaturen im Rotor und Stator sowie die Ausprägung des Verschleißverhaltens während des Anstreichvorgangs essentiell.

Ausblick

Durch die einfachen Kontaktgeometrien des entwickelten Prüfstands wurde gezielt das grundlegende physikalische Verständnis von Anstreifvorgängen in Turbomaschinen verbessert. Um das Verhalten anderer Materialpaarungen zu verstehen werden weiterhin Anstreifversuche mit Blechen aus Nickelbasislegierungen durchgeführt. Darauf aufbauend wird in Zukunft die Halterung des Prüfstands so modifiziert, dass auch Segmente von Honigwabeneinlaufbelägen getestet werden können. Somit kann das stark vereinfachte Ersatzmodell der anstreifenden Metallbleche zu einem Modellierungsansatz ganzer Honigwabeneinlaufbeläge erweitert werden. Die Validierung mit experimentellen Ergebnissen des Anstreifprüfstands ermöglicht eine kostengünstige Entwicklung neuer Geometrien und Materialpaarungen. Der Auslegungsprozess von Labyrinthdichtungen kann hiermit erheblich verbessert und der Gesamtwirkungsgrad von Triebwerken weiter gesteigert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] „Europe’s vision for aviation. Maintaining global leadership and serving society's needs”, Luxembourg: EUR-OP, 2011.
- [2] Denecke, J.: „Rotierende Labyrinthdichtungen mit Honigwabenanstreifbelägen – Untersuchung der Wechselwirkung von Durchflussverhalten, Drallverlauf und Totaltemperaturänderung”, Dissertation Universität Karlsruhe, ISBN 978-3-8325-1850-9, 2007.
- [3] Chupp, R. E., Hendricks, R., Lattime, S., Steinetz, B.: „Sealing in Turbomachinery“, Journal of Propulsion and Power Vol.22 No. 2, March-April, 2006.
- [4] Pychynski, T., Höfler, C., Bauer, H.-J.: „Experimental Study on the Friction Contact Between a Labyrinth Seal Fin and a Honeycomb Stator“, J. Eng. Gas Turbines Power. 2015, GTP-15-1382, 2015.
- [5] Herrmann, N., Dullenkopf, K., Bauer, H.-J.: “Flexible Seal Strip Design for Advanced Labyrinth Seals in Turbines”, Proceedings of ASME Turbo Expo 2013, GT2013-95424, 2013.