

Anwendung konfokaler Abstandssensoren zur Spaltemessung in einem aktiven Spalthaltemechanismus in einem elektrischen Fantriebwerk

Niels Herter¹, Andreas Hupfer¹

¹ Institut für Aeronautical Engineering, Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg

Zusammenfassung

Die präzise Erfassung des Schaufelspitzenspalt stellt eine wesentliche Voraussetzung für die Bewertung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Fantriebwerken dar. Insbesondere elektrisch angetriebene Antriebssysteme mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten und geringen Spaltweiten erfordern Messverfahren, die eine hochaufgelöste und berührungslose Abstandserfassung auch unter beengten Einbaubedingungen ermöglichen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Bewertung konfokal-chromatischer Abstandssensoren zur schaufelindividuellen Erfassung des Schaufelspitzenspalt unter realitätsnahen Betriebsbedingungen.

Hierzu wurden Untersuchungen an elektrisch angetriebenen Fantriebwerken mit Rotoren aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) sowie integralen Aluminiumblisks durchgeführt. Neben der Messstabilität wurden insbesondere die Einflüsse hoher Drehzahlen, unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften und begrenzter Einbauräume auf die Signalqualität untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine reproduzierbare und schaufelindividuelle Abstandsmessung auch bei Drehzahlen bis $24\,000\text{ min}^{-1}$ möglich ist. Gleichzeitig wird deutlich, dass die optischen Eigenschaften der Messoberfläche einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Messsignale besitzen.

Die Untersuchungen bestätigen die grundsätzliche Eignung konfokal-chromatischer Abstandssensoren für die hochaufgelöste Schaufelspaltemessung in elektrisch angetriebenen Fantriebwerken. Die erzielten Ergebnisse bilden zugleich die messtechnische Grundlage für die Integration der Sensorik in ein aktives Spalthaltemechanismus auf Basis auxetischer Strukturen.

Keywords: konfokal-chromatische Abstandssensorik, Schaufelspitzenspalt, aktive Spaltemessung, elektrisches Fantriebwerk, auxetische Strukturen.

1 Einleitung und Motivation

Der Schaufelspitzenspalt zwischen Rotor und Gehäuse zählt zu den wesentlichen Einflussgrößen für den Wirkungsgrad axialer Turbomaschinen. Bereits geringe Änderungen der Spaltweite führen zu erhöhten Leckageströmungen und damit zu aerodynamischen Verlusten. Besonders betroffen sind Fan-, Verdichter- und Turbinenstufen moderner Flugtriebwerke, bei denen hohe Umfangsgeschwindigkeiten und geringe Spaltweiten unmittelbar die Leistungsfähigkeit beeinflussen [1], [2].

Die im Betrieb auftretenden Spaltänderungen werden durch zahlreiche Einflüsse verursacht. Hierzu zählen unter anderem Fertigungs- und Montageabweichungen, thermische Dehnungen, Fliehkräfte, aerodynamische Belastungen sowie dynamische Rotorbewegungen. Abhängig von den jeweiligen Betriebsbedingungen entstehen unterschiedliche Formen der Spaltänderung, wie sie

beispielhaft in Abb. 1 dargestellt sind. Die Auslegung eines möglichst kleinen Montagepalt stellt daher eine anspruchsvolle Optimierungsaufgabe dar, bei der sowohl Fertigungstoleranzen als auch betriebsbedingte Verformungen berücksichtigt werden müssen [3].

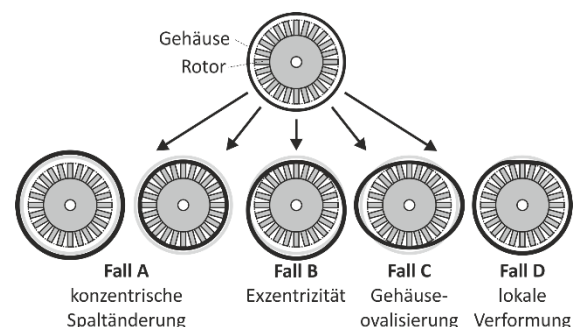


Abb. 1: Ausprägungen von Spaltänderungen [3]

Mit der Entwicklung elektrisch angetriebener Fantriebwerke gewinnen minimale Schaufel-spitzenspalte zusätzlich an Bedeutung. Die kompakte Bauweise elektrischer Antriebssysteme sowie hohe Drehzahlen und dynamische Lastwechsel führen zu erhöhten Anforderungen an die Rotor-Gehäuse-Interaktion. Zur Ausschöpfung des aerodynamischen Potenzials werden daher zunehmend aktive Spalthaltungskonzepte untersucht, die eine kontinuierliche Anpassung des Gehäusedurchmessers an den jeweiligen Betriebszustand ermöglichen.

Neue konstruktive Möglichkeiten ergeben sich hierbei durch additive Fertigungsverfahren, mit denen sich unter anderem auxetische Strukturen herstellen lassen. Aufgrund ihrer negativen Querkontraktionszahl können diese Strukturen gezielt zur Durchmesseränderung ringförmiger Bauteile eingesetzt werden und eignen sich damit für innovative Konzepte einer aktiven Spalthaltung. Ein entsprechender Ansatz für elektrisch angetriebene Fantriebwerke wurde bereits patentiert [4], siehe Abb. 2.

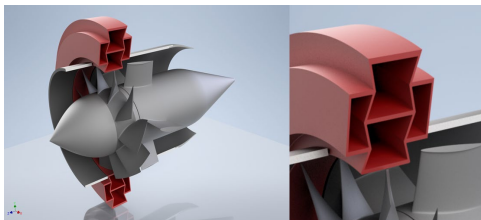


Abb. 2: Patentiertes Konzept einer aktiven Spalthaltung für elektrisch angetriebene Fantriebwerke [4]

Für die Realisierung einer aktiven Spalthaltung ist neben der Verstellmechanik insbesondere die kontinuierliche Erfassung des aktuellen Schaufelspitzenspalts erforderlich. Hierfür wird ein Messverfahren benötigt, das auch unter hohen Drehzahlen, beengten Einbaubedingungen und im elektromagnetischen Umfeld elektrischer Antriebssysteme zuverlässig arbeitet. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die experimentelle Untersuchung konfokal-chromatischer Abstandssensoren zur schaufel-individuellen Schaufelspaltmessung in elektrisch angetriebenen Fantriebwerken sowie die Bewertung ihrer Eignung als Grundlage zukünftiger aktiver Spalthaltungssysteme.

2. Konfokal-chromatisches Messprinzip

Aus den beschriebenen Anforderungen ergibt sich die Notwendigkeit eines Messverfahrens, das kleine Schaufelspitzenspalte berührungslos, hochaufgelöst und unter beengten Einbaubedingungen erfassen kann. Bildgebende Verfahren ermöglichen zwar eine qualitative

Beurteilung des Spaltverhaltens, stoßen jedoch bei einer präzisen Quantifizierung unter hochdynamischen Betriebsbedingungen an Grenzen. Ursächlich hierfür sind unter anderem eingeschränkte Sichtbedingungen im Strömungskanal, optische Verzerrungen, hohe Anforderungen an die Fokussierung sowie der vergleichsweise hohe Auswerteaufwand. Darüber hinaus ist die Integration kamera-basierter Systeme häufig nur mit erheblichem konstruktivem Aufwand möglich und kann die Strömungsführung beeinflussen.

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden außerdem kapazitive Messverfahren betrachtet. Für den Einsatz in elektrisch angetriebenen Fantriebwerken erwiesen sich diese aufgrund elektromagnetischer Einflüsse des Antriebssystems und der Leistungselektronik jedoch als nur eingeschränkt geeignet. Vor diesem Hintergrund wurde die konfokal-chromatische Abstandssensorik als Messverfahren ausgewählt.

Das Messprinzip basiert auf polychromatischem Licht, das durch ein optisches System mit definierter chromatischer Aberration entlang der Messachse fokussiert wird. Jeder Wellenlänge ist dabei eine eindeutige Fokusslage zugeordnet. Liegt die Oberfläche des Messobjekts in einer dieser Fokusslagen, wird die entsprechende Wellenlänge bevorzugt reflektiert und spektral ausgewertet. Aus der Lage des reflektierten Spektrums wird der Abstand zwischen Sensor und Messoberfläche bestimmt.

Konfokal-chromatische Abstandssensoren zeichnen sich durch eine hohe Ortsauflösung, eine kompakte Bauform sowie eine hohe Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störfeldern aus und eignen sich daher besonders für den Einsatz in elektrisch angetriebenen Fantriebwerken. Die Qualität der Messsignale hängt jedoch wesentlich von den optischen Eigenschaften der Messoberfläche ab. Insbesondere Reflektivität, Oberflächenrauheit und lokale Inhomogenitäten beeinflussen die Intensität und Stabilität des detektierten Signals [5]. Diese Randbedingungen sind bei der Sensorintegration und der Auslegung des Messaufbaus zu berücksichtigen.

3. Messaufgabe und Versuchsaufbau

Zur experimentellen Bewertung konfokal-chromatischer Abstandssensoren wurden Untersuchungen an mehreren elektrisch angetriebenen Fantriebwerken im Rahmen des Forschungsprojekts ELAPSED (Electrified Aircraft Propulsion – safe, efficient, digitally linked) am Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr

(dtec.bw) durchgeführt. Ziel der Messungen ist die schaufelindividuelle Bestimmung des Schaufelspitzenspalt beziehungsweise der radialen Längenänderung der Rotorschaukeln in Abhängigkeit von der Drehzahl. Die Ergebnisse dienen sowohl der Validierung der zugrunde liegenden Auslegungs- und Entwurfsmethodik [6] als auch der Bewertung der Eignung konfokal-chromatischer Abstandssensoren für den Einsatz in elektrisch angetriebenen Fantriebwerken.

Die Untersuchungen wurden an drei unterschiedlichen Versuchsträgern durchgeführt, um sowohl verschiedene Werkstoffe als auch unterschiedliche geometrische und betriebliche Randbedingungen abzudecken.

Der erste Versuchsaufbau besteht aus einer konventionellen Rotor-Stator-Stufe mit Rotorschaukeln aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK). Aufgrund des anisotropen Werkstoffverhaltens und des gewählten Laminataufbaus weisen diese Schaufeln eine drehzahlabhängige radiale Längenänderung auf [7]. Die experimentelle Bestimmung dieser Verformungen ist von besonderer Bedeutung, da sie den Schaufelspitzenspalt und damit die aerodynamische Leistungsfähigkeit unmittelbar beeinflussen.

Im weiteren Projektverlauf wurde der CFK-Rotor durch einen Rotor in integraler Aluminiumbliskbauweise ersetzt. Die wesentlichen Betriebsparameter der Rotor-Stator-Stufe blieben unverändert, sodass ein direkter Vergleich beider Rotorvarianten unter weitgehend identischen Randbedingungen möglich war. Neben den unterschiedlichen strukturellen Eigenschaften unterscheiden sich beide Rotoren insbesondere hinsichtlich ihrer Oberflächencharakteristik, wodurch sich gleichzeitig der Einfluss der Messoberfläche auf die konfokale Abstandsmessung untersuchen lässt.

Als dritte Versuchskonfiguration wurde ein gegenläufig rotierendes elektrisch angetriebenes Fantriebwerk aufgebaut. Dieses System besitzt zwei integrale Aluminiumblisks mit 11 beziehungsweise 13 Schaufeln und erreicht maximale Drehzahlen von bis zu $24\,000\text{ min}^{-1}$. Dadurch ergeben sich gegenüber den vorhergehenden Versuchsaufbauten deutlich höhere Anforderungen an die zeitliche Auflösung und die Stabilität der Abstandsmessung.

Für sämtliche Untersuchungen wurde der konfokal-chromatische Abstandssensor confocalDT IFS 2403-1,5 der Firma Micro-Epsilon verwendet. Die wesentlichen technischen Kenndaten des Sensors sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Technische Daten des verwendeten Abstandssensors [5]

Messbereich	1,5 mm
Messbereichsanfang	8 mm
Lichtpunktdurchmesser	15 μm
statische Auflösung	<30 nm
dynamische Auflösung	<186 nm
Außendurchmesser	8 mm

Die Integration des Sensors erfolgte jeweils im Fangehäuse, sodass der radiale Abstand zwischen Schaufelspitze und Gehäuseinnenwand direkt erfasst werden kann (Abb. 3 und Abb. 4).

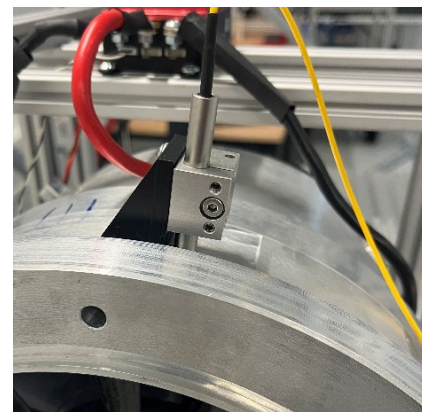


Abb. 3: Fangehäuse mit integriertem Abstandssensor IFS 2403-1,5



Abb. 4: Innenseite Fangehäuse

Aufgrund des begrenzten Bauraums im Strömungskanal war eine kompakte Sensorbauform erforderlich. Gleichzeitig mussten Einbauposition und Messrichtung so gewählt werden, dass eine zuverlässige Erfassung sämtlicher Schaufelpassagen während des Betriebs gewährleistet ist.

Die wesentlichen Anforderungen an das Messsystem ergeben sich aus den hohen Rotordrehzahlen, der schaufelindividuellen Erfassung der Messsignale sowie den begrenzten Einbaumöglichkeiten im Triebwerk. Im Gegensatz zu thermisch hochbelasteten Gasturbinen spielt eine temperaturbedingte Beanspruchung des Sensors im vorliegenden

Anwendungsfall eine untergeordnete Rolle. Entscheidend sind vielmehr die erreichbare zeitliche Auflösung und eine stabile Signaldetektion während des laufenden Betriebs.

Der verwendete Controller ermöglicht Messfrequenzen von bis zu 30 kHz. Neben der Messfrequenz stellt insbesondere die Belichtungszeit einen wesentlichen Parameter dar, da sie die Intensität und Qualität des detektierten Lichtsignals bestimmt. Aufgrund einer festen internen Signalverarbeitungszeit von $3,5\text{ }\mu\text{s}$ verkürzt sich mit steigender Messfrequenz die maximal verfügbare Belichtungszeit. Für alle Messungen wurden Messfrequenz und Belichtungszeit so gewählt, dass eine möglichst hohe Signalqualität bei gleichzeitig ausreichender zeitlicher Auflösung erreicht wird.

Eine weitere wesentliche Einflussgröße stellt die Oberflächenbeschaffenheit der Schaufelspitzen dar. Da die konfokale Abstandsmessung auf der Reflexion des Lichtsignals basiert, wurden die Oberkanten der CFK-Schaufeln mit einer reflektierenden Beschichtung versehen (Abb. 5).



Abb. 5: beschichtete CFK-Schaufeloberkanten

Hierdurch konnte die Signalintensität deutlich erhöht und die Stabilität der Messungen verbessert werden. Die metallischen Oberflächen der Aluminiumblisks bieten demgegenüber bereits günstige Voraussetzungen für eine zuverlässige Abstandsmessung.

Die Messdatenerfassung erfolgte schaufelaufgelöst über mehrere Sekunden Messdauer. Dadurch können sowohl die drehzahlabhängige radiale Längenänderung als auch schaufelindividuelle Unterschiede im Verformungsverhalten der Rotoren bestimmt werden. Gleichzeitig ermöglicht der Versuchsaufbau die Bewertung des Messverfahrens unter unterschiedlichen werkstofftechnischen, geometrischen und betrieblichen Randbedingungen.

4 Experimentelle Ergebnisse

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist die Bewertung der Eignung konfokal-chromatischer Abstandssensoren zur schaufelindividuellen Erfassung des Schaufelspitzenspalts unter unterschiedlichen werkstofftechnischen und betrieblichen Randbedingungen. Im Mittelpunkt stehen dabei die Reproduzierbarkeit der Messungen, die erreichbare zeitliche Auflösung sowie der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Signalqualität.

Aluminiumblisk

Zur Beurteilung der Messstabilität wurden zunächst Referenzmessungen an einer einzelnen Schaufel einer Aluminiumblisk bei einer Drehzahl von etwa 30 min^{-1} durchgeführt. Untersucht wurden insbesondere die Einflüsse von Messfrequenz und Belichtungszeit auf die Reproduzierbarkeit der Messwerte.

Die ermittelten Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert liegen bei etwa $5\text{ }\mu\text{m}$ und belegen eine stabile und reproduzierbare Abstandserfassung unter stationären Bedingungen. Gleichzeitig zeigen die Untersuchungen, dass sich durch eine geeignete Wahl von Messfrequenz und Belichtungszeit eine hohe Signalqualität erreichen lässt.

Aufbauend auf den Referenzmessungen wurden alle elf Schaufeln der Aluminiumblisk über zehn Umdrehungen vermessen. Die gemittelten Ergebnisse sind in Abb. 6 dargestellt.

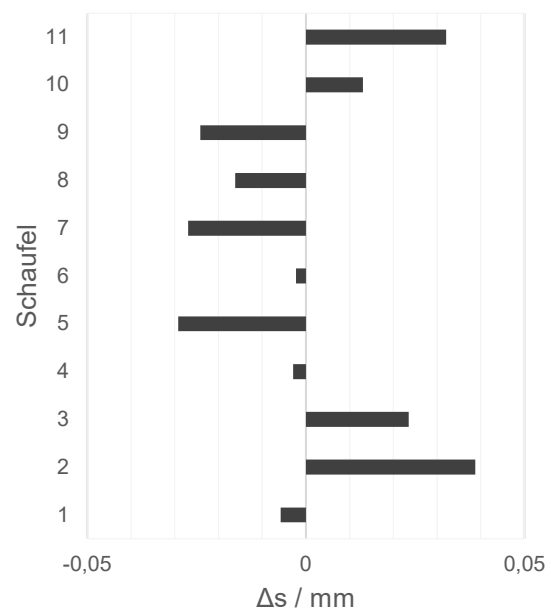


Abb. 6: Schaufellängenabweichung im Vergleich zum Mittelwert

Mit zunehmender Drehzahl nimmt die radiale Längenänderung aller Schaufeln kontinuierlich zu. Dieses Verhalten entspricht der erwarteten strukturellen Reaktion auf die zunehmende Zentrifugalbelastung. Die gemessenen maximalen radialen Längenänderungen liegen bei etwa 0,08 mm.

Im oberen Drehzahlbereich ist eine zunehmende Streuung zwischen den einzelnen Schaufeln erkennbar. Als Ursache kommen geometrische Unterschiede, fertigungsbedingte Toleranzen oder schwingungsbedingte Einflüsse in Betracht. Abb. 7 zeigt die Längenabweichung der einzelnen Schaufeln vom Mittelwert bei 80 % der maximalen Rotordrehzahl.

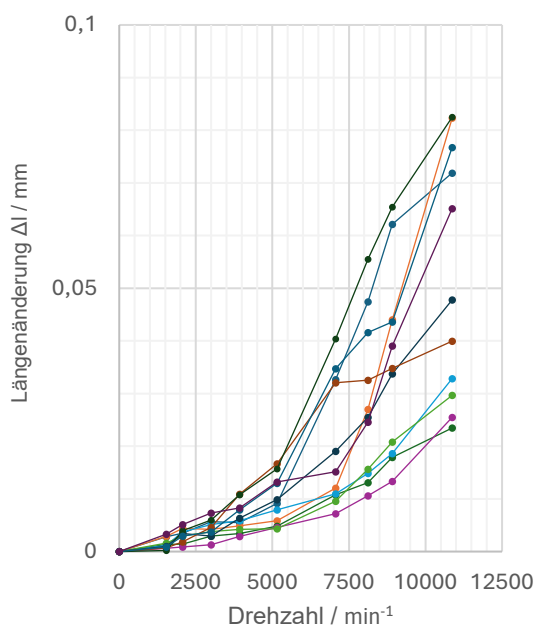


Abb. 7: Radiale Längenänderung der 11 Aluminiumschaufeln in Abhängigkeit der Drehzahl

Insgesamt zeigt die Aluminiumblisk jedoch ein weitgehend homogenes Verformungsverhalten mit vergleichbaren Dehnungsverläufen aller Schaufeln.

CFK-Rotor

Für die CFK-Schaufeln besitzt die experimentelle Bestimmung der radialen Längenänderung besondere Bedeutung, da deren anisotroper Laminataufbau ein deutlich komplexeres Verformungsverhalten erwarten lässt. Erste Untersuchungen erfolgten mithilfe einer High-Speed-Kamera, siehe Abb. 8. Aufgrund optischer Verzerrungen und der eingeschränkten Quantifizierbarkeit wurde dieses Verfahren anschließend durch die konfokal-chromatische Abstandsmessung ersetzt.

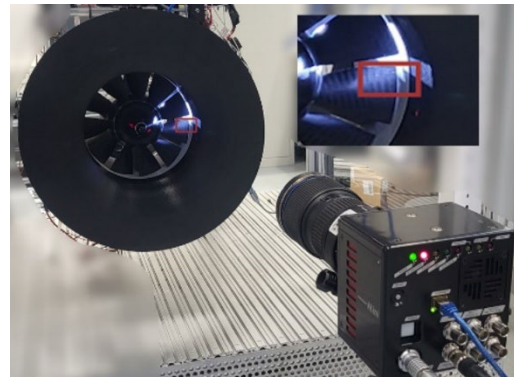


Abb. 8: Experimenteller Aufbau zur Spaltmessung mittels High-Speed Kamera

Zur Verbesserung der Signalqualität wurden die Schaufeloberkanten mit einer reflektierenden Beschichtung versehen. Dadurch konnten Messungen bis zu etwa 85 % der maximalen Drehzahl von $14\,500\text{ min}^{-1}$ durchgeführt werden. Abb. 9 zeigt die Ergebnisse beider Messverfahren.

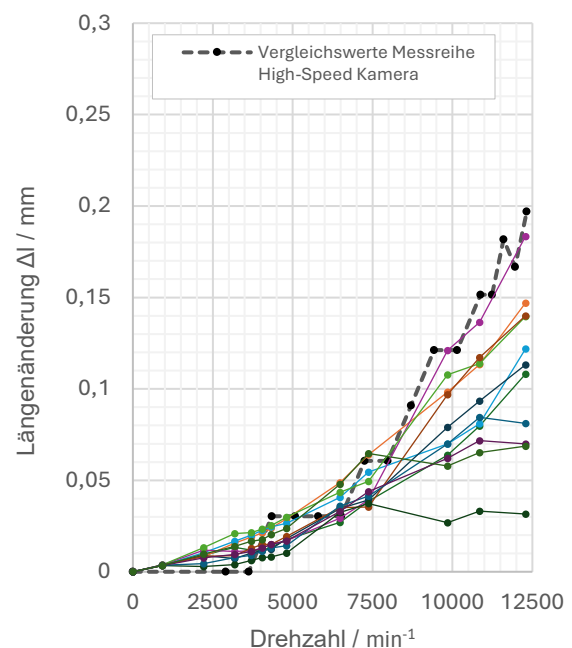


Abb. 9: Radiale Längenänderung der 11 CFK-Schaufeln in Abhängigkeit der Drehzahl

Im Gegensatz zur Aluminiumblisk weisen die CFK-Schaufeln deutlich größere Unterschiede in der radialen Längenänderung auf. Dieses Verhalten stimmt mit den in [7] beschriebenen Untersuchungen überein und ist auf fertigungsbedingte Streuungen infolge des manuellen Laminierprozesses sowie Unterschiede im Laminataufbau und in der Faserorientierung zurückzuführen.

Die Ergebnisse zeigen gleichzeitig, dass auch bei CFK-Schaufeln eine schaufelindividuelle Erfassung der radialen Längenänderung möglich ist. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine ausreichend reflektierende Messoberfläche.

Gegenläufiges Fantriebwerk

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit unter erweiterten Betriebsbedingungen wurde das Sensorsystem anschließend an einem gegenläufig rotierenden Fantriebwerk mit zwei Aluminiumblisks eingesetzt, siehe Abb. 12. Im Vergleich zu den vorherigen Untersuchungen weist dieses System kleinere Schaufelhöhen sowie Drehzahlen bis $24\,000\text{ min}^{-1}$ auf.

Die Messergebnisse für beide Rotoren sind in Abb. 10 und Abb. 11 dargestellt. Mit zunehmender Drehzahl steigt die radiale Längenänderung aller Schaufeln kontinuierlich an. Die gemessenen maximalen Werte liegen bei etwa $0,1\text{ mm}$.

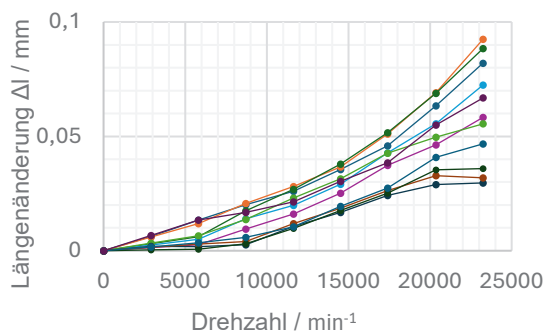


Abb. 10: Radiale Längenänderung der 11 Aluminiumschaufeln in Abhängigkeit der Drehzahl

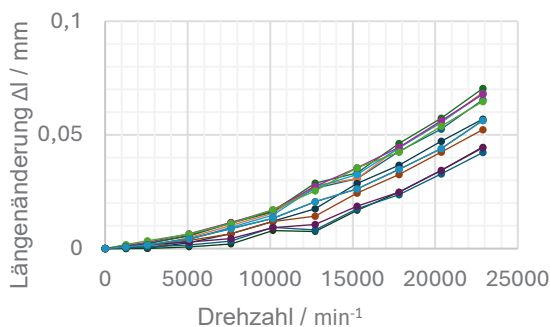


Abb. 11: Radiale Längenänderung der 13 Aluminiumschaufeln in Abhängigkeit der Drehzahl

Während der vordere Rotor eine erkennbare Streuung zwischen den einzelnen Schaufeln aufweist, zeigt der hintere Rotor ein homogeneres Verformungsverhalten. Eine mögliche Ursache hierfür ist die kompaktere

Schaufelgeometrie, die eine gleichmäßigere Lastverteilung begünstigt.

Trotz der erhöhten Drehzahlen und der größeren Anzahl zu erfassender Schaufeln konnten sämtliche Schaufelpassagen eindeutig detektiert und die gemessenen Spaltweiten den jeweiligen Schaufeln zuverlässig zugeordnet werden.

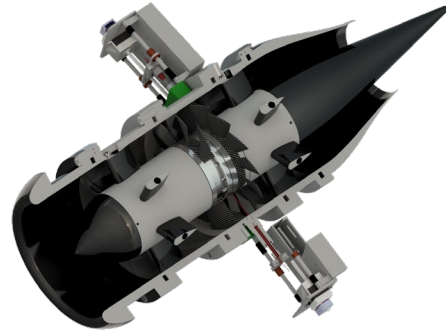


Abb. 12: gegenläufiges Fantriebwerk

Bewertung des Messverfahrens

Die experimentellen Untersuchungen bestätigen die grundsätzliche Eignung konfokal-chromatischer Abstandssensoren für die hochaufgelöste Schaufelspaltmessung in elektrisch angetriebenen Fantriebwerken.

Für Aluminiumrotoren konnte eine reproduzierbare Abstandserfassung mit homogener Signalqualität nachgewiesen werden. Die Untersuchungen an CFK-Schaufeln zeigen darüber hinaus, dass auch Faserverbundwerkstoffe zuverlässig vermessen werden können, sofern die optischen Eigenschaften der Messoberfläche berücksichtigt werden.

Besonders hervorzuheben ist die zuverlässige schaufelindividuelle Erfassung der Messsignale auch bei Drehzahlen bis $24\,000\text{ min}^{-1}$. Dadurch lassen sich nicht nur globale Änderungen des Schaufelspitzenspalts, sondern auch Unterschiede im Verformungsverhalten einzelner Schaufeln analysieren. Die Ergebnisse belegen somit, dass konfokal-chromatische Abstandssensoren die messtechnischen Anforderungen zukünftiger elektrisch angetriebener Fantriebwerke erfüllen und eine geeignete Grundlage für aktive Spalthaltungssysteme darstellen.

5 Integration der Abstandssensorik in ein aktives Spalthaltungskonzept

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass konfokal-chromatische Abstandssensoren eine schaufelindividuelle und reproduzierbare Erfassung des Schaufelspitzenspalts auch unter den Betriebsbedingungen elektrisch angetriebener Fantriebwerke ermöglichen. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für

die Realisierung aktiver Spalthaltungssysteme geschaffen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts ELAPSED wird hierzu ein Spalthaltungskonzept auf Basis auxetischer Strukturen verfolgt. Das zugrunde liegende Prinzip ist in Abb. 13 dargestellt.

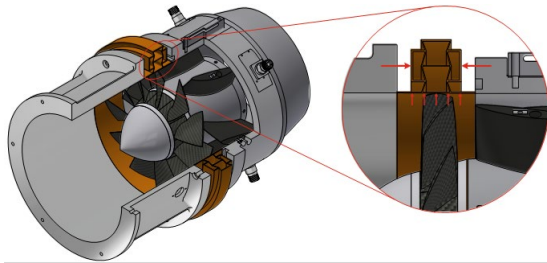


Abb. 13: Patentiertes Konzept einer aktiven Spalthaltung auf Basis auxetischer Strukturen [4]

Die Besonderheit des bereits patentierten Konzepts besteht darin, dass durch eine axiale Belastung einer auxetischen Ringstruktur eine gezielte radiale Durchmesseränderung des Gehäuses erzeugt werden kann [4]. Hierdurch lässt sich der Schaufelspitzenpalt aktiv an unterschiedliche Betriebszustände anpassen. Für die praktische Umsetzung eines solchen Systems ist neben der Verstellmechanik insbesondere die kontinuierliche Erfassung des aktuellen Schaufelspitzenpalts erforderlich. Aus diesem Grund ist vorgesehen, den konfokal-chromatischen Abstandssensor direkt in die verstellbare Gehäusestruktur zu integrieren.

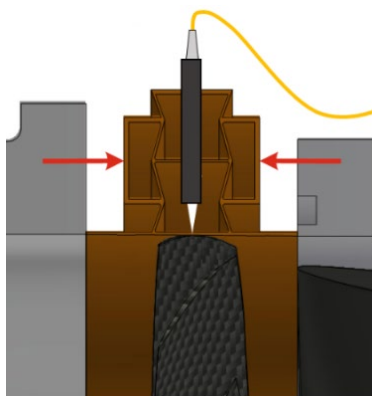


Abb. 14: Prinzipielle Integration des Abstandssensors in die auxetische Struktur

Die prinzipielle Sensorintegration ist in Abb. 14 dargestellt. Durch die direkte Einbindung des Sensors in die bewegte Struktur bleibt dessen relative Position zur Gehäuseinnenwand während der Verstellung erhalten. Dadurch

können zusätzliche Messfehler infolge der Strukturbewegung minimiert werden und gleichzeitig die Voraussetzungen für eine kontinuierliche Erfassung des Schaufelspitzenpalts geschaffen werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesene schaufelindividuelle Abstandserfassung bildet damit die messtechnische Grundlage für die Entwicklung eines geschlossenen Regelkreises zur aktiven Spalthaltung.

6 Schlussfolgerungen

Ziel der vorliegenden Arbeit war die experimentelle Bewertung konfokal-chromatischer Abstandssensoren zur schaufelindividuellen Erfassung des Schaufelspitzenpalts in elektrisch angetriebenen Fantriebwerken.

Hierzu wurden Untersuchungen an Rotoren aus kohlefaserverstärktem Kunststoff, an integralen Aluminiumblisks sowie an einem gegenläufigen elektrisch angetriebenen Fantriebwerk durchgeführt. Die Messungen erfolgten unter unterschiedlichen werkstofftechnischen und betrieblichen Randbedingungen bis zu maximalen Drehzahlen von $24\,000\text{ min}^{-1}$.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine reproduzierbare und hochaufgelöste Abstandsmessung auch unter diesen Betriebsbedingungen möglich ist. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass eine schaufelindividuelle Erfassung sämtlicher Rotorschaukeln selbst bei hohen Drehzahlen zuverlässig möglich ist. Für Aluminiumblisks wurde ein weitgehend homogenes Verformungsverhalten beobachtet, während CFK-Schaukeln aufgrund ihres Laminataufbaus größere schaufelindividuelle Unterschiede aufweisen. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass die Signalqualität wesentlich von den optischen Eigenschaften der Messoberfläche beeinflusst wird.

Insgesamt bestätigen die Untersuchungen die grundsätzliche Eignung konfokal-chromatischer Abstandssensoren für die hochaufgelöste Schaufelspaltmessung in elektrisch angetriebenen Fantriebwerken. Die Sensorik ermöglicht sowohl die Analyse globaler Änderungen des Schaufelspitzenpalts als auch die Untersuchung schaufelindividueller Verformungen und stellt damit eine geeignete Grundlage für zukünftige aktive Spalthaltungssysteme dar. Zukünftige Arbeiten konzentrieren sich auf die experimentelle Integration der Sensorik in auxetische Gehäusestrukturen sowie auf die Entwicklung eines geschlossenen Regelkreises zur aktiven Anpassung des Schaufelspitzenpalts an unterschiedliche Betriebszustände.

Literaturnachweis

- [1] J. W. Bisset, D.C. Howe, *Energy Efficient Engine Flight Propulsion System Preliminary Analysis and Design Report*, Final Update Report, NASA-CR-174701, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1983.
- [2] S. B. Lattime, , B. M. Steinetz, *Turbine Engine Clearance Control Systems: Current Practices and Future Directions*, AIAA-2002-3790, NASA/TM-2002-211794, 38th Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 7–10, 2002.
- [3] A. Hupfer, *Spalte in Fluggasturbinen – Ursachen, Folgen und Optimierungsstrategien am Beispiel des Turboverdichters*, Habilitationsschrift, Verlag Dr. Hut, München, 2019.
- [4] A. Hupfer, N. Herter, *Element und Verfahren zum Ausgleichen von Toleranzen und/oder Spaltweiten einer Vorrichtung und Triebwerk, Montageverfahren für eine Welle-Nabe-Verbindung*, DE 10 2021 126 424.3.
- [5] Micro-Epsilon, *confocalDT Produktkatalog*, verfügbar unter: <https://www.micro-epsilon.de/fileadmin/download/products/cat--confocalDT--de.pdf>, zuletzt aufgerufen am 16.05.2026.
- [6] S. Hawner, A. Hupfer, *Entwicklung eines CFD-Auslegungstools für ein gegenläufiges, elektrisches Fantriebwerk und Anwendung für eine Parameterstudie im Designpunkt*, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Dresden, 2022
- [7] S. Hawner, L. Rduch, H. Baumhöfener, A. Hupfer, *Development of Carbon Composite Blades within the Context of the Experimental Validation of a CFD-Based Design Tool for Contra-Rotating, Electric Fan Engines*, Aerospace 11, 527 (2024); doi: 10.3390/aerospace11070527.