

ANWENDUNG EINER INNOVATIVEN SPALTHALTUNGSMASSNAHME AN EINEM ELEKTRISCHEN FANTRIEBWERK

N. Herter, A. Hupfer,

Institut Aeronautical Engineering, Fakultät Maschinenbau
Universität der Bundeswehr München (UniBw M), Deutschland

Zusammenfassung

Ein Forschungsschwerpunkt am Institut für Aeronautical Engineering an der UniBw M liegt in der Untersuchung der Spaltwirkung sowie Spalthaltung in Flugtriebwerken. Vor allem für aerodynamisch hochbelastete Komponenten sind kleinstmögliche Spalte zwischen rotierenden und feststehenden Bauteilen zwingend notwendig, um die geforderte Effizienz, Sicherheit, Zuverlässigkeit und Betriebsdynamik zu erreichen. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Relevanz elektrisch angetriebener Fantriebwerke ist diese Problemstellung hauptsächlich zwischen den Schaufelspitzen und dem Gehäuse zu finden. Eine besondere Herausforderung ist dabei eine aktive Spalthaltung bzw. -kontrolle. Durch die Integration innovativer und funktionaler Bauweisen ist es möglich mittels axial aufgebrachtener Kräfte den Gehäusedurchmesser und damit den Spalt statisch und dynamisch zu vergrößern oder zu verkleinern. Die Implementierung und Anwendung der hierfür zum Einsatz kommenden auxetischer Strukturen wurde bereits in Platten vielfach untersucht. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird im ersten Schritt das Verhalten einer kreisförmig angeordneten zellulären auxetischen Struktur mittels FEM analysiert. Die Orientierung erfolgt derart, dass durch eine axial wirkende Kraft auf die Struktur der Durchmesser verändert werden kann. Durch die Identifikation und Variation der relevanten Parameter gelingt es eine Vorhersage des Verhaltens zu treffen. Im Anschließendenden wird mit diesen Ergebnissen die Möglichkeit der aktiven Spalthaltung an einem elektrischen Fantriebwerk vorgestellt.

1. EINLEITUNG

Ein technisches Problem ist die Veränderung der Spaltweiten in berührungslosen Dichtungen zwischen den sich relativ zueinander bewegenden Spaltufern. Im Besonderen gilt dies aufgrund der hohen Umfangsgeschwindigkeit und der Effizienzauswirkung für Turbomaschinen. In Flugtriebwerken betrifft es speziell die Fan-, Verdichter- und Turbinenstufen [1].

Die im Betrieb auftretenden Spaltänderungen hängen dabei nicht nur von der Komponente, sondern auch von der jeweiligen Ursache ab. Der Spalt zwischen Gehäuse und Rotor wird dabei durch eine Vielzahl verschiedener Parameter beeinflusst. Im Betrieb können sich unterschiedliche Spaltänderungsformen zeigen. In BILD 1 sind mehrere mögliche Ausprägungen von Spaltänderungen am Beispiel des Schaufelspitzenpaltess gegenüber dem Ausgangszustand dargestellt.

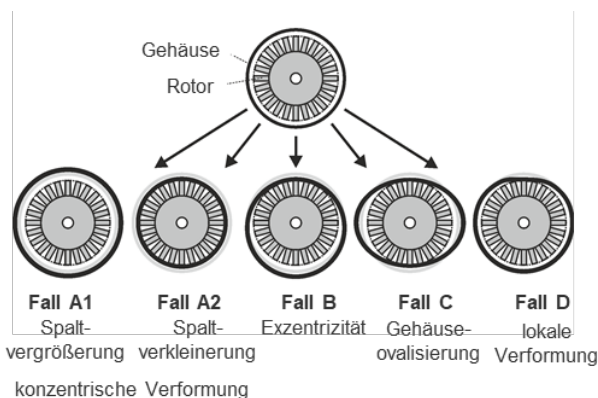


BILD 1. Ausprägungen von Spaltänderungen [2]

Die Auslegung eines Mindestspalts für die Montage gestaltet sich daher als sehr komplex. Im ersten Schritt ist es möglich die Geometrieabweichungen bereits im Einbauszustand zu minimieren. Schwierigkeiten bereiten bei Flugtriebwerken jedoch die betriebsbedingten Spaltänderungen. Durch diese besondere Herausforderung wurden bereits zahlreiche unterschiedliche aktive und passive Möglichkeiten zur Spalteinstellung entwickelt. Auch im Hinblick auf neue elektrische Flugantriebskonzepte mit Propulsoren für hohe subsonische Flugmachzahlen sind hohe Stufendruckverhältnisse und minimale Spaltweiten von großer Bedeutung. Der Schaufelspitzenpalt und dadurch entstehende Spalteffekte sind entscheidend für den effizienten Betrieb bei hohem spezifischen Schub und den damit möglichen hohen Fluggeschwindigkeiten.

Eine weitere besondere Herausforderung hinsichtlich Spalthaltung besteht für elektrische Antriebe, welche in kompakten Bauweisen mit schnellen Lastwechseln sowie bei hoher Flugdynamik eingesetzt werden können. Flugmanöver mit hohen Querbeschleunigungen oder die auftretenden dynamischen Kräfte im Betrieb führen zu einer Rotor-Gehäuse-Interaktion. Mit dem Ziel minimaler Spaltweiten wird der Einsatz von aktiv gesteuerten, hoch dynamischen Spalthaltungskonzepten in Zukunft notwendig.

Neue Möglichkeiten in Hinblick auf eine komplexere Geometrie und funktionalere Gestaltung der spaltbestimmenden Bauteile bieten hierzu moderne additive Fertigungsverfahren. Es ist damit unter anderem möglich, Strukturen mit einem auxetischen Verhalten, d.h. einer negativen Querkontraktionszahl ν zu fertigen. Diese können dabei in verschiedensten Anwendungen zum Einsatz kommen (z.B. auch in Schuhsohlen [3] oder PKW-Sitzen [4]). In den meisten Fällen erfolgt die Integration

jedoch in Form von 2d-ausgelgten Plattenelementen. Vor dem Hintergrund einer aktiven Spalthaltung bietet jedoch der Einsatz in einem geschlossenen Kreisring, z.B. in einem doppelwandigen Gehäuse oder als Dichtung zusätzliche Vorteile. Im Folgenden sollen die mechanischen Eigenschaften einer auxetischen Struktur mit Hilfe von FEM-Simulationen untersucht werden und anschließend die Chancen sowie die Herausforderungen eines daraus abgeleiteten aktiven Spalthaltungskonzepts einer Fanstufe für ein elektrisches Fantriebwerk aufgezeigt werden.

2. SPALTHALTUNGSKONZEPTE

2.1. Anforderungen an Spalthaltungskonzepte

Aufgrund der Vielzahl an Faktoren, die den Spalt beeinflussen, ist die Auslegung eines Mindestspaltes sehr schwierig. Neben der Vermeidung kritischer Zustände gilt es dabei die negativen Auswirkungen der Spalte in den Betriebspunkten mit hoher Anforderung an Effizienz und Leistungsvermögen minimal zu halten.

Eine Beeinflussung des Spaltes im Betrieb kann mit aktiven Maßnahmen, d.h. eine gezielt initiierte oder geregelte Spaltänderung, oder passiv durch konstruktive Gestaltung des Dehnungs- und Positionierungsverhalten der spaltbeeinflussenden Bauteile erreicht werden. Im Folgenden werden insbesondere Ansätze zur aktiven Spaltregelung vorgestellt. Dabei handelt es sich zunächst um Lösungen oder Konzepte aus dem Bereich der Verdichter- und Turbinenstufen von Fluggasturbinen.

Die Anforderungen an Spalthaltungsmaßnahmen sind dabei sehr vielfältig. Generell darf ein Ausfall des Systems nicht zu einem Anstreifen führen. Zusätzlich müssen diese nicht nur leicht sein, sondern gleichzeitig auch einen robusten Aufbau und wenig Platzbedarf aufweisen. Mit einer geringen Komplexität kann der konstruktive und fertigungstechnische Aufwand zwar minimiert werden, jedoch stellen unter den Temperatur- und Druckbedingungen die je nach Umsetzung notwendigen Dichtungen eine weitere Herausforderung dar. Zur Anstreifenvermeidung ist eine hohe Dynamik der Anpassung erforderlich.

2.2. Spalthaltungskonzepte in Turbomaschinen

2.2.1. Mechanisch induzierte Gehäuseverformung

Eine grundlegende Möglichkeit, den Schaufelspitzenpalt aktiv zu beeinflussen, ist die Verformung der Gehäusewand durch Aufbringen äußerer Kräfte. Dabei handelt es sich häufig um hydraulische, pneumatische oder elektro-mechanische Systeme. Die Spaltanpassung ist dabei innerhalb kurzer Zeit möglich und daher sowohl für stationäre und instationäre Anpassungen geeignet.

Am Beispiel des Verformungsverhaltens eines geschlossenen Gehäuse rings unter gleichmäßig verteilter radialer Kräfteinbringung soll dieser Ansatz veranschaulicht werden. BILD 2 zeigt die FEM-Ergebnisse für einen Ausschnitt aus einem druckbeaufschlagten Ring aus Ti-6Al-4V mit 2 mm Wandstärke und einem Innendurchmesser von 222 mm unter Raumtemperatur bei 293 K.

Aufgrund des Verformungsverhaltens eignet sich die gleichmäßige Kräfteinbringung besonders für eine konzentrische Spalthaltung (Fall A1 und A2 in BILD 1), zum Beispiel in einem Hochdruckverdichter mit

doppelwandigem Gehäuse. Um den Spalt zu verringern muss von außen ein um Δp größerer Druck aufgebracht werden. Solange der Ring unter abbaubaren Druckspannung steht, kann der Spalt durch Verringerung von Δp auch wieder vergrößert werden.

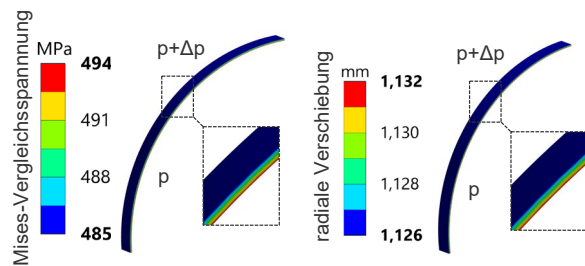


BILD 2. FEM-Ergebnisse eines geschlossenen Titangehäuserings mit einem $\Delta p = 50$ bar

In BILD 3 ist das Verhältnis von radialer Verschiebung zu dafür notwendigen Druckdifferenz für einen Titangehäusering mit 0,75 mm und 2 mm Wandstärke dargestellt.

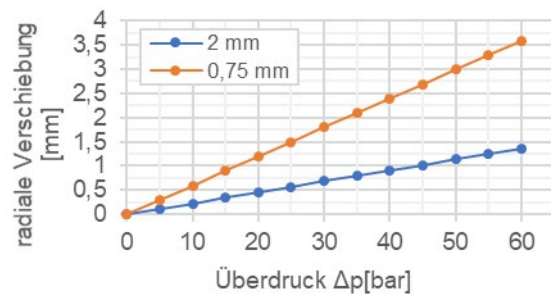


BILD 3. FEM-Ergebnisse für die Verformung eines geschlossenen druckbeaufschlagten Titangehäuserings mit 0,75 mm und 2 mm Wandstärke

Wie im BILD 3 zu erkennen, nehmen mit kleiner werdender Wandstärke die notwendigen Druckkräfte zwar ab, dennoch sind bereits für eine kleine Radiusänderung hohe Druckkräfte notwendig.

2.2.2. Radiale Verschiebung einzelner Ringsegmente

Zur Reduzierung der notwendigen Druckspannungen ist es möglich, das Ringgehäuse in einzelne Segmente zu teilen und über diese zu verstellen. Die im Vergleich zu einem geschlossenen Ring auftretenden Tangentialspannungen werden dadurch reduziert. Aufgrund der dafür notwendigen Befestigung der Segmente in axialer sowie radialer Richtung ist jedoch eine aufwendigere Konstruktion erforderlich. Auch bei doppelwandiger Bauweise mit einem äußeren Gehäuse ring zur Abdichtung ist durch den Spalt zwischen den Segmenten eine weitere Abdichtung vorzusehen. Durch die Ansteuerung einzelner Segmente besteht jedoch die Möglichkeit einer asymmetrischen Spaltanpassung, z.B. für eine Korrektur einer Exzentrizität nach Fall B nach BILD 1. Die dabei entstehenden geometrischen Absätze können dann durch eine flexible Überlappung größtenteils ausgeglichen werden. Dieses Prinzip einer aktiven Spalthaltungsmaßnahme wurde für das NEWAC-Technologieprogramm (New Aero Engine Core Concept) vorgeschlagen, siehe BILD 4. In diesem

Konzept wird über einen hydraulisch betätigten Aktor ein Drehmoment auf einen Umformer übertragen. Die Spalteinstellung erfolgt durch die Verschiebung eines Gehäusesegments in radiale Richtung. Bisher sind jedoch noch keine Ergebnisse über die Wirksamkeit in einem realen Verdichter veröffentlicht. Aufgrund der Anforderungen an Dichtheit, der Ausfallsicherheit, dem konstruktiven Aufwand und den Nachteilen aus den geometrischen Absätzen ist eine Umsetzung in einem Triebwerk vorerst nicht zu erwarten.

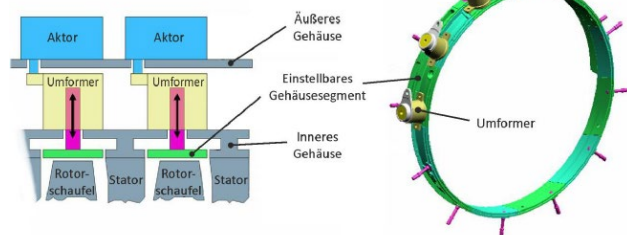


BILD 4. NEWAC Technologieprogramm nach [5]

Weitere Konzepte mit einem Hebelmechanismus zur Übertragung der Kräfte oder Momente wurden in einem Patent von Pratt & Whitney [11] veröffentlicht.

Alternativ kann die Verstellung eines segmentierten Gehäuse rings auch durch wechselnde Druckgradienten erfolgen. Bei dem in BILD 5 vorgestellten Konzept der Firma Rolls Royce können die Ringsegmente in Abhängigkeit vom Kammerdruck an unterschiedlichen Radien positioniert werden.

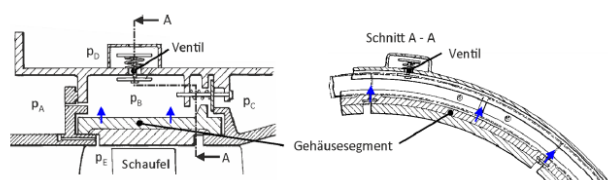


BILD 5. Rolls Royce Patent nach [6]

Bei der dargestellten Ausführung können die Segmente zwar nur zwei Positionen ansteuern, jedoch können diese bei einem eventuellen Anstreifen nach außen nachgeben und dadurch das Risiko einer mechanischen Beschädigung verringern. Ohne weiteren konstruktiven Aufwand für separate Druckluft entspricht der maximal zur Verfügung stehende Druck dabei dem Kanaldruck des Hochdruckverdichters. Dadurch ist eine direkte Umsetzung dieser Ausführung in den hinteren Stufen des Hochdruckverdichters mangels größeren Überdrucks nicht möglich.

In einem weiteren Patent von Pratt & Whitney [7] aus dem Jahr 2015 werden die Gehäusesegmente über einen druckbeaufschlagten Aktuator verschoben, siehe auch BILD 6. Die Druckkammer ist dabei zum Strömungskanal vollständig abgedichtet und ermöglicht, im Gegensatz zu [6], die Verwendung eines geringeren Steuerdrucks als den vorhandenen Kanaldruck. In Verbindung mit einem niedrigen Kammervolumen sind so schnelle Anpassungen des Schaufelspitzen spalts erreichbar. Weiterhin erlaubt

dieses Konzept die Ansteuerung einzelner Aktuatoren und damit eine Kompensation über den Umfang ungleichmäßiger Spaltweiten. Der konstruktive und fertigungstechnische Aufwand für Dichtungen ist bei diesem Konzept, wie auch bei den vorherigen, sehr nachteilig. Hinzu kommen im Fall von Kontaktdichtungen an gleitenden Flächen bei wechselnden Temperatur- und Druckbedingungen Probleme durch Verschleiß- und Ermüdungserscheinungen

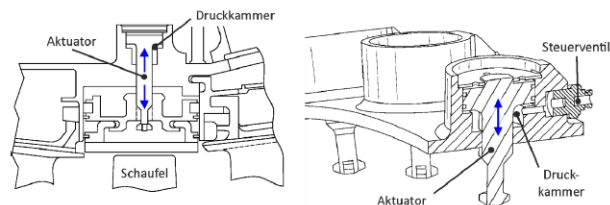


BILD 6. Patent von Pratt & Whitney nach [7]

2.2.3. Axiale Verschiebung keilförmiger Ringsegmente

Keilförmige Ringsegmente bieten eine weitere technische Möglichkeit zur Spaltanpassungen. Dabei kommt es durch eine axiale Verschiebung der Segmente zu einer Umfangsveränderung Δu und damit zu einer radialen Verschiebung der Gehäusewand, siehe BILD 7. Der Keilwinkel α bestimmt das Verhältnis von axialer zu radialer Verschiebung. Entsprechend gilt für die Änderung des Gehäuseumfangs Δu und der damit einhergehenden radialen Änderung Δr

$$(1) \Delta u = 2 \pi \Delta r = 2 \alpha \tan \alpha$$

Ein Vorteil dieser Lösung gegenüber den rein radialen Verstellmechanismen ist der in Umfangsrichtung geschlossen bleibende Ring, d.h. trotz Umfangsverstellung entstehen keine Spalte oder geometrischen Absätze an der Innenseite. Aufgrund der Verschiebung entsteht zwar ein Axialspalt a , jedoch muss sich dieser nicht zwingend über der Rotorschaufel befinden. Ein weiterer Nachteil ist hingegen die fehlende Anpassungsmöglichkeit der Krümmung und dadurch die nicht perfekt kreisförmige Innenwand.

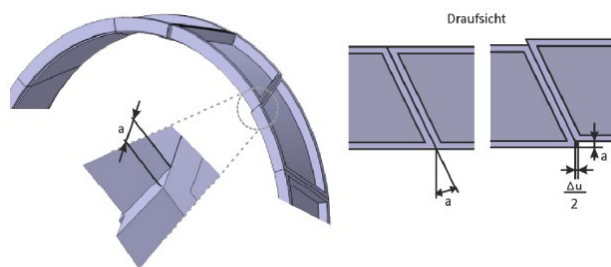


BILD 7. Darstellung keilförmiger Ringsegmente [2]

2.2.4. Verschiebung eines konischen Gehäuserings

Ein weiterer Ansatz zur Spaltverstellung wurde 1966 in einem Patent [8] der Firma GE veröffentlicht. Dabei erfolgt eine mechanisch axiale Verschiebung eines konischen Gehäuserings, siehe BILD 8.

Bei einem Strömungskanal mit abnehmenden Außenradius kann so ein guter Ausgleich von Axialverschiebungen sowie konzentrischen Spaltänderungen aus dem Betrieb erfolgen. Nachteilig ist dagegen die dafür erforderliche axiale Baulänge. Gerade moderne Triebwerke besitzen einen kleinen Wandöffnungswinkel φ und erfordern daher große Baulängen.

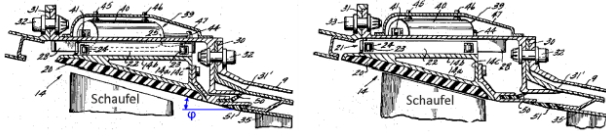


BILD 8. Verschiebung eines konischen Gehäuserings nach einem Patent GE nach [8]

Rolls Royce [9] umgeht in einem Patent von 1982 diesen Nachteil mit dem in BILD 9 dargestellten Mechanismus. Die axiale Verschiebung erfolgt dabei über mehrere Hebel mit einem exzentrischen Bolzen.

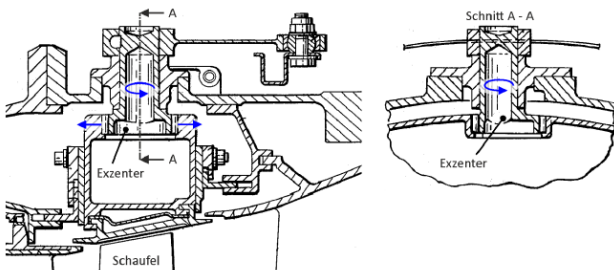


BILD 9. Verschiebung eines konischen Gehäuserings nach einem Patent Rolls Royce nach [9]

Ein weiteres Konzept wurde von Pratt & Whitney [10] 2011 vorgestellt. Mit Hilfe eines Aktuators ist es möglich die axiale Position des Festlagers zu verändern und so den gesamten Rotor zu verschieben. Aufgrund des konischen Gehäuses kommt es zur Spaltänderung (Detail A im BILD 10).

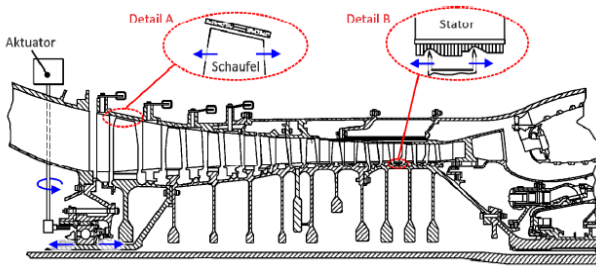


BILD 10. Verschiebung eines konischen Gehäuserings nach einem Pratt & Whitney nach [10]

Durch die axiale Verschiebung der Rotorwelle werden jedoch auch weitere Dichtungen bzw. die Dichtspalte verändert. Im Detail B in BILD 10 sind rotorseitige Dichtspitzen mit einem Einlaufbelag unterhalb eines Statordeckbands dargestellt. Dabei verändert sich der Dichtsspalt je nach Art und Form der Dichtung.

Mit einem entsprechend dynamischen Ansprechverhalten des Aktuators z.B. bei kritischen Manövern die notwendigen Spaltanpassungen vorgenommen werden, ohne einen Reservespalt dafür vorzusehen. Bei hohen Amplituden der Axialverschiebung kann es jedoch zu vermehrtem Materialabtrag und dauerhaft geringerer Dichtwirkung mit daraus resultierenden Wirkungsgradverlusten kommen. Ebenso ist die Lagerverstellung ein sehr gravierender Eingriff in eine sicherheitskritische Komponente. Durch die Verschiebung aller Dichtungen gestaltet sich eine Abschätzung der gesamtheitlichen Auswirkungen auf das Triebwerksverhalten als sehr komplex.

Diese Methode hat jedoch bei modernen Großgasturbinen im stationären Bereich schon Einzug gehalten. So wird zum Beispiel beim Hydraulic Clearance Optimization System (HCO) der Firma Siemens der Turbinenläufer hydraulisch im konischen Gehäuse axial verschoben. Das Ziel ist dabei den Spalt über den Turbinenschaufeln nach dem Durchwärmen und bei Vollastbetrieb zu reduzieren. Ein weiteres vergleichbares Konzept für einen Verdichter wurde ebenfalls von Siemens zum Patent angemeldet [12].

2.3. Thermisch induzierte Gehäuseverformung

Bei aktiven (ACC, Active Clearance Control) und passiven (PCC, Passive Clearance Control) Systemen werden vor allem durch pneumatische oder thermische Effekte eine Gehäuseverformung induziert und die axialen sowie radialen Spalte gezielt eingestellt. Diese Konzepte sind ein Bestandteil des Sekundärluftsystems des Triebwerks.

Beim Wechsel des Betriebszustandes erfahren die Spaltufer aufgrund von mechanischen und thermischen Änderungen unterschiedliche Verschiebungen. Auslegungsziel ist dabei minimale Spalte in einem oder mehreren Betriebspunkten zu erhalten. Mit der weiteren Anforderung eines anstreiffreien Betriebs über alle Flugzustände ergibt sich eine große Anzahl an möglichen Varianten. Aus dem Betriebspunkt mit dem geringsten Spaltabstand wird der erforderliche Mindestspalt definiert. Bei Bedingungen wie dem Reiseflug, unter denen das Triebwerk sehr lange betrieben wird, stellt sich dann jedoch ein größerer Spalt als notwendig ein. Gehäuse lassen sich zwar relativ einfach kühlen, jedoch hängt die Wirkung vom Kühleffekt ab und steigt mit der Temperaturdifferenz zwischen gekühlter und ungekühlter Gehäusestruktur. Ein Einsatz ist daher eher in Bereichen mit höherer Gastemperatur sinnvoll, zum Beispiel im Hochdruckverdichter oder -turbine. Denkbare wäre auch ein Aufheizen von kalten Strukturen. Die daraus resultierende Spaltvergrößerung wäre jedoch nur sinnvoll, um ein Anstreifen zu verhindern. Aufgrund der Trägheit von Wärmeübertragung und thermischer Dehnung erscheint dieser Ansatz für die Anstreifvermeidung jedoch ungeeignet. In einem elektrischen Triebwerk und im Anwendungsbereich der Fanstufe entstehen jedoch kaum Temperaturunterschiede, so dass sich dieses Konzept hier nicht anwenden lässt.

Ebenfalls würde ein Ausfall des Systems zu einem Anstreifen führen und sicherheitstechnisch nicht zulässig sein.

3. INNOVATIVE GEHÄUSEBAUWEISE MIT AKTIVER SPALTHALTUNG

Betriebsbedingte Spaltänderungen entstehen häufig aus einer Kombination mechanischer und thermischer Lastwechsel. Daraus resultieren zeitversetzte und

unterschiedlich große Dehnungen und Verschiebungen. Die Kopplung zwischen Längs- und Querdehnung wird dabei über Materialgesetze beschrieben und von der Querkontraktionszahl ν bestimmt.

Im einachsigen Spannungszustand würde sich bei der Annahme eines konstanten Volumens theoretisch ein Wert von $\nu = 0,5$ ergeben. Bei metallischen Werkstoffen kann jedoch ein Wert von $\nu \approx 0,33$ angenommen werden. Das bedeutet für eine Streckung eine minimale Volumenzunahme. Die Materialien folgen diesem physikalischen Gesetz und werden schmaler, wenn man sie streckt und wieder breiter, wenn sie zusammengedrückt werden.

3.1. Auxetische Struktur

Die Querkontraktionszahl kann aber auch genutzt werden um das Verhalten von Strukturen zu beschreiben. Ein auxetisches Verhalten zeigen Strukturen, die eine negative Querkontraktionszahl ν besitzen. In BILD 11 ist auxetisches und konventionelles Verhalten am Beispiel einer Platte und einem Kreisring dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Beziehung von Belastung und Querschnittsveränderung umkehrt. Die Übertragung dieses Verhaltens auf ringförmige Strukturen lässt ebenfalls schon Möglichkeiten der Spaltbeeinflussung erkennen. Bei einem Gehäusering unter Zugbeanspruchung in Umfangsrichtung nimmt bei einer konventionellen Struktur der Umfang zu und die Wandstärke entsprechend ab.

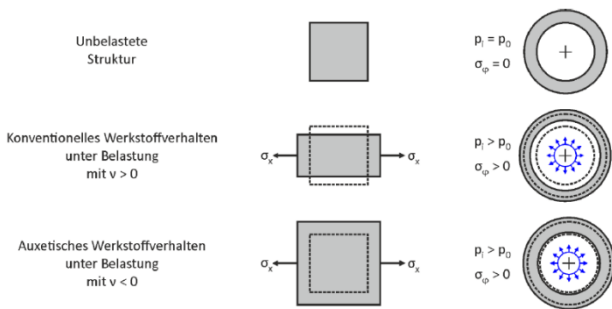


BILD 11. Vergleich auxetisches und konventionelles Verhalten [2]

Bei einem auxetischen Verhalten würde die Wandstärke hingegen zunehmen und zu einem kleineren Radius in Verbindung mit einem kleineren Spalt führen.

In BILD 11 steht der Gehäusering unter Überdruck und könnte zum Beispiel in einem Turboverdichter zur (passiven) Spalthaltung genutzt werden. Die Ausprägung des auxetischen Verhaltens wird durch die Art und die jeweilige Ausgestaltung der auxetischen Struktur bestimmt. Als nächstes bieten sich verschiedene Möglichkeiten der Orientierung in einen Gehäusering an. Je nach Gehäusebauweise und Integration der auxetischen Strukturen sind auch Konzepte zur aktiven Spalthaltung umsetzbar und bereits Bestandteil der aktuellen Forschungsarbeit am Institut für Aeronautical Engineering der Universität der Bundeswehr München.

3.1.1. Arten von auxetischen Strukturen

Lakes [13] veröffentlichte bereits 1987 einen Artikel über auxetische Schäume. In den letzten Jahrzehnten wurden jedoch weitere Variationen auxetischer Strukturen gefunden und untersucht. Einen umfassenden Überblick

sind den Veröffentlichungen [14] und [15] zu entnehmen. Grundlegend lassen sich auxetische Strukturen nach Ihrer Geometrie und Wirkungsweise kategorisieren. Zu den wichtigsten gehören dabei zelluläre, chirale sowie rotierende Strukturen. In BILD 12 sind typische Vertreter der jeweiligen Kategorie dargestellt.

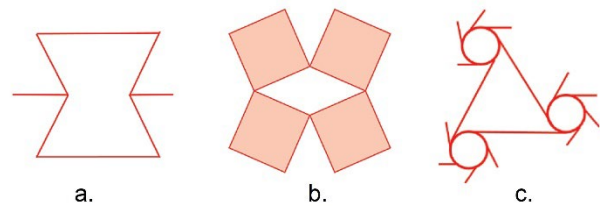


BILD 12. Beispiele für typische auxetische Strukturen: a. zellulär b. chiral c. rotierende [15]

Insbesondere durch die Fortschritte bei der Entwicklung additiver Fertigungsverfahren sind auxetische Strukturen in den Fokus aktueller Forschungsarbeiten gelangt. Bisher war eine Anwendung durch die Grenzen konventioneller Fertigungsverfahren auf theoretische Überlegungen beschränkt. Heutzutage ist die Herstellung von auxetischen 3D-Strukturen mit unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren, zum Beispiel mittels Selective Electron Beam Melting (SEBM), bereits möglich und Bestandteil von umfangreichen Untersuchungen, siehe BILD 13. Neben den Materialparametern entscheiden dabei die geometrischen Parameter über das jeweilige auxetische Verhalten. Fertigungstechnisch sind dabei weniger Beschränkungen einzuhalten, so dass für jeden Anwendungsfall die strukturmechanisch am besten passende Struktur entworfen werden kann.

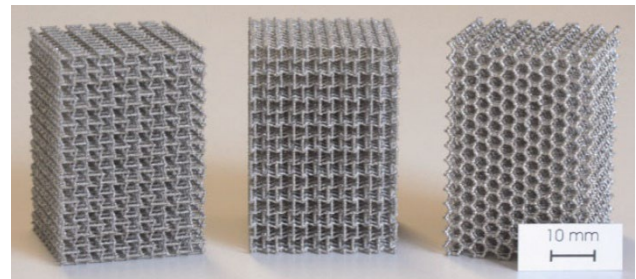


BILD 13. Mittels SEBM hergestellte auxetische Strukturen [16]

3.2. Anwendungsmöglichkeit als aktive Spalthaltungsmassnahme

Bei den bisherigen Spalthaltungskonzepten sind die Komplexität sowie der hohe konstruktive und fertigungstechnische Aufwand besonders nachteilig. Die auxetischen Strukturen zeichnen sich hingegen durch einen einfachen Aufbau aus.

Aufgrund ihrer Eigenschaften [17] bieten sich vor allem zelluläre Strukturen zur Integration in ein doppelwandiges Gehäuse an. Je nach Orientierung kann das auxetische Verhalten unterschiedlich genutzt werden. Bei den Untersuchungen von [18], [18] wurde eine Orientierung entsprechend BILD 14 gewählt. Im Vergleich zu einem doppelwandigen Gehäuse lässt sich der Schaufelspalt durch auxetische Effekte ähnlich BILD 11 zwar reduzieren, jedoch handelt es sich hierbei um ein passives Konzept. Durch das gezielte Einstellen der Parameter der

auxetischen Struktur kann das radiale Verformungsverhalten auf einen bestimmten Rotor und die in der Flugmission zu erwartenden Temperatur- und Druckbedingungen eingestellt werden. Jedoch besteht im Betrieb keine Möglichkeit darauf Einfluss zu nehmen. In die Untersuchungen und Auslegung des Schaufelspitzenspalts wurden zwar die thermischen Einflüsse einbezogen, eine gezielte thermisch induzierte Verformung, wie in einem aktiven Spalthaltungssystem, ist damit jedoch nicht möglich. Ebenfalls ungünstig in dieser Orientierung ist die wellenförmige und nicht umfangsymmetrische Verformung der Innenseite, siehe Detailfenster in BILD 14.

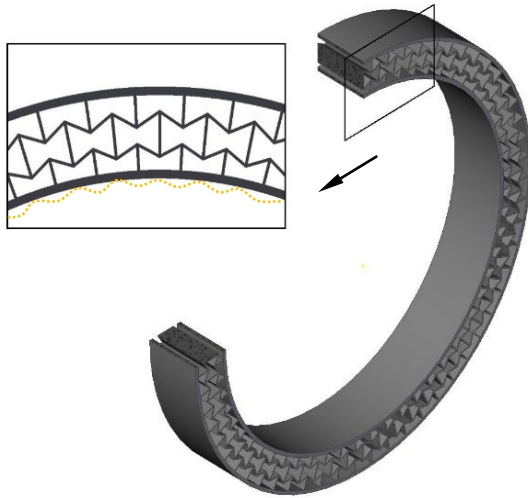


BILD 14. Orientierungsmöglichkeit einer zellulären Struktur in einem doppelwandigen Gehäuse

Nachteilig sind die daraus resultierenden Effizienzverluste sowie eine mögliche Schwingungsanregung der Rotorschaukeln.

Um ein aktives Spalthaltungskonzept zu realisieren wird die Orientierung gemäß BILD 15 gewählt. Diese bietet gegenüber BILD 14 verschiedene Vorteile.

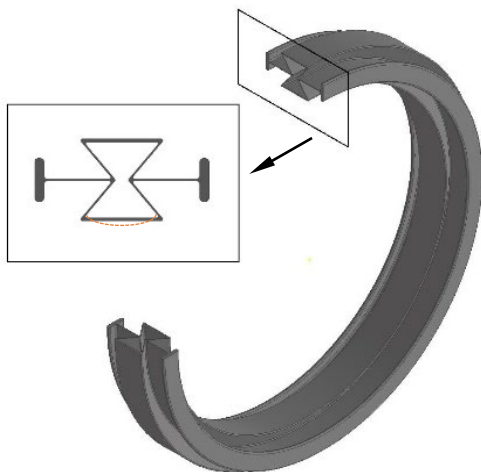


BILD 15. untersuchte Orientierung

Die axiale Krafteinwirkung bewirkt eine Verformung der Innenseite und durch auxetische Effekte möglicherweise auch eine Vergrößerung des Radius. Neben der radialen Verschiebung kommt es ebenfalls zu einer Aufwölbung, siehe Detailfenster in BILD 15. Diese ist jedoch Umfangssymmetrisch und verursacht keine Beeinträchtigungen im Strömungsverhalten oder mögliche Schwingungsanregungen. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die beschriebene Aufwölbung insbesondere ein Problem an der inneren Zelle darstellt. Ein Ziel aktueller Untersuchungen ist es daher, den Einfluss der Anzahl der Zellen auf die Verschiebung sowie das Verhältnis zur Aufwölbung an der Innenseite zu untersuchen.

In Bezug auf die Umsetzung als aktives Spalthaltungskonzeptes ist bei dieser Variante die Einleitung einer axialen Druckkraft ebenfalls sehr günstig. Aufgrund der einzubringenden Kräfte stellt insbesondere die Verbindung eines Aktuators mit dem Gehäuse oder einzelnen Segmenten eine Herausforderung dar. Druckkräfte können im Vergleich zu Zugkräften relativ einfach pneumatisch oder mechanisch aufgebracht werden.

Die Aufweitung des Gehäuses, was bei aktiven und passiven Systemen zur Vermeidung einer Kollision von Schaufelspitze mit Gehäuseinnenseite notwendig ist, wird bei bisherigen Anwendungen erreicht durch:

- (1) thermische Ausdehnung oder
- (2) Abbau von Druckspannungen.

Aufgrund der thermischen Trägheit und der notwendigen Temperaturdifferenz ist Variante (1) hinsichtlich Dynamik und Anwendungsbereich in einem Triebwerk begrenzt geeignet. Variante (2) ist bei passiven Systemen nur möglich, wenn die Gehäusestruktur noch ausreichend Vorspannung besitzt und bei Entlastung sich aufweiten kann. Bei längerem Betrieb ist jedoch mit plastische Strukturverformung aus Kriechen oder mechanischer Überlast zu rechnen, was zu einem abnehmenden Aufweitungspotenzial der Gehäusestruktur führt.

Bei dem hier vorgestellten Konzept führt das Aufbringen einer Axialkraft immer zu einer Spaltvergrößerung. Dies ermöglicht belastungs- und betriebszeitunabhängig den Spalt aktiv zu vergrößern und dadurch einen Betrieb ohne Kollision zwischen rotierenden und feststehenden Spaltufer sicherzustellen, unabhängig von vorangegangenen plastischen Verformungen.

4. PARAMETERVARIATION DER GEOMETRIE

4.1. Referenzgeometrie

Für die Referenzgeometrie wurde gemäß 3.2 eine zelluläre auxetische Struktur ausgewählt. Für die Voruntersuchungen wurden folgende weitere Kriterien herangezogen:

- Rotationssymmetrischer 3D-Aufbau
- Fertigbarkeit im 3D – Druckverfahren, ggf. mittels EBM oder SLM/SLS mit Ti-6Al-4V oder Inconel 718

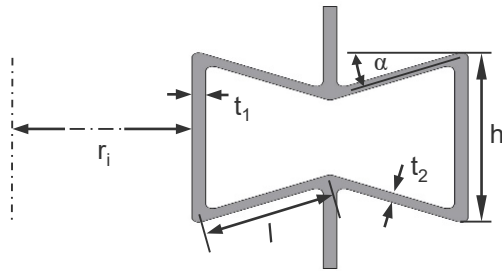


BILD 16. Referenzgeometrie

Durch die Anzahl der Konstruktionsparameter ergibt sich eine Menge an Kombinationsmöglichkeiten. Zunächst wird der Einfluss einzelner Parameter auf das Verformungsverhalten an der Innenseite analysiert. Dafür werden ausgehend von der Referenzgeometrie einzelne Parameter variiert und die Ergebnisse dargestellt. Abschließend wird ebenfalls die Variation der Anzahl zellulären Strukturen in radialer Richtung untersucht und ausgewertet.

Varierte Parameter incl. Ausgangswerte			min	max
Steglänge	l	30 mm	25 mm	35 mm
Zellhöhe	h	46 mm	40 mm	56 mm
Zellwinkel	α	38°	10°	45°
vertikale Stegbreite	t ₁	1,8 mm	0,5 mm	2,1 mm
horizontale Stegbreite	t ₂	1 mm	0,5 mm	4,0 mm
Anzahl der zellulären Strukturen	n	1	1	6
Feste Parameter				
Innenradius	r _i	222 mm		-

TAB 1. Parameterübersicht sowie die Ausgangswerte der verwendeten Referenzgeometrie mit deren Minimal- und Maximalwert

5. NUMERISCHE SIMULATION DES VERFORMUNGSVERHALTENS

5.1. Randbedingungen und Vernetzung

Für die Simulation wird die zelluläre auxetische Struktur entsprechend BILD 16 mit Hilfe einer Finite Elemente Software (Ansys Workbench 19.1) hinsichtlich Ihres Verformungsverhaltens untersucht. Für die Simulation des strukturmechanischen Verhaltens werden die Materialdaten von Inconel 718 verwendet. Die Verwendung anderer Metalle wie Titanlegierungen und Kunststoffen wäre ebenfalls möglich und insbesondere für die Anwendung in einem elektrischen Fantriebwerk ausreichend geeignet.

Für die Parametervariation ist es möglich, die FEM-Berechnung mit einer CAD-Software (Autodesk Inventor) zu koppeln. Dabei wird das CAD Modell zunächst in die FEM-Umgebung geladen und die Simulation am Referenzmodell definiert. Für jede weitere Variation wird dann ein entsprechend modifiziertes CAD-Modell erstellt, automatisiert in das FEM-Programm übertragen und die Berechnung gestartet.

Aufgrund der Rotationssymmetrie des Modells ist es möglich, die Berechnungen auf ein Kreissegment zu begrenzen. Auf Basis von Ergebnissen aus Voruntersuchungen wurde für die Berechnungen ein 1°-Kreissegment gewählt. Das erfordert ein Festhalten der Schnittflächen und eine Beschränkung der Verschiebung in ausschließlich radialer Richtung. Eine radiale Verschiebung der Außenseite wird verhindert, dies entspricht einer sehr steifen äußeren Struktur. Voruntersuchungen haben ergeben, dass bei der zellulären Struktur an der Innenseite ein Aufbeulen stattfindet. Durch das Festhalten der Außenseite wird die Verschiebung an der Innenseite verstärkt und die Realität mit einer Befestigung an einer steifen Außenseite besser abgebildet. Die Einleitung einer konstanten Kraft erfolgt dabei über die vertikalen Stege. Die Randbedingungen sind entsprechend BILD 17 gewählt.

- A** Symmetrierandbedingung
- B** Kraft
- C** Kraft 2
- D** Zylindrische Lagerung

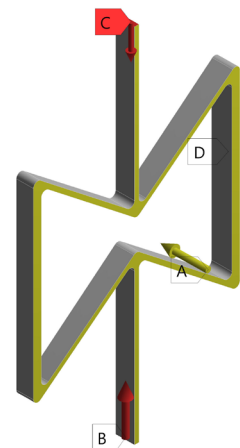


BILD 17. Randbedingungen der FE-Simulation

Zur Vernetzung werden Volumenelemente mit 20 Knoten (SOLID186) verwendet. Die Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Netzauflösung wurde durch eine Konvergenzanalyse an der Referenzgeometrie untersucht. Die Auswertung zeigt, dass sich die maximale Spannung ab einer Elementgröße von $5 \cdot 10^{-4}$ m kaum noch Änderungen erfährt.

Zur Auswertung der Spannungen wäre es ebenso möglich, nur die Bereiche mit den Maximalwerten feiner zu vernetzen. Die numerischen Berechnungen konnten jedoch mit annehmbarem Zeitaufwand bei ausreichend guter Qualität der Ergebnisse durchgeführt werden.

5.2. Analyse der Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die mit Hilfe der FEM simulierten Ergebnisse ausgewertet. Hierbei soll der Einfluss der Konstruktionsparameter auf die minimale und maximale Verschiebung an der Innenseite analysiert werden. Aufgrund der auftretenden Wölbung tritt die minimale Verschiebung in der Mitte zwischen den Stegen auf, siehe Darstellung in BILD 18. Die jeweils variierten Längen werden auf die Referenzgeometrie bezogen normiert und aufgetragen. Die Variationen bewegen sich dabei in den in TAB 1 gezeigten Grenzen. Zu extreme Wertabweichungen würden die Ergebnisse verzerren bzw. ein auxetisches Verhalten verhindern.

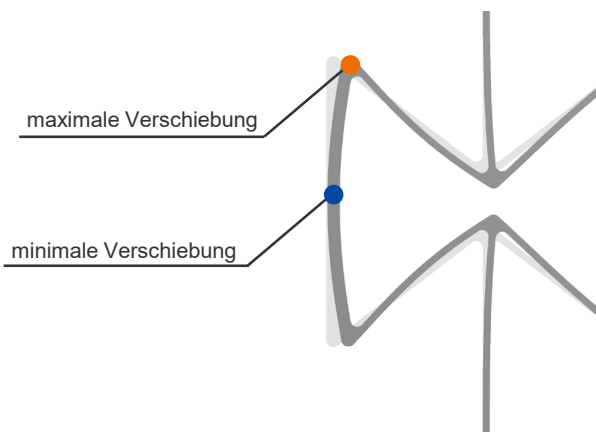


BILD 18. Zu erwartende Verformung der Innenseite und Orte der minimalen und maximalen Verschiebung

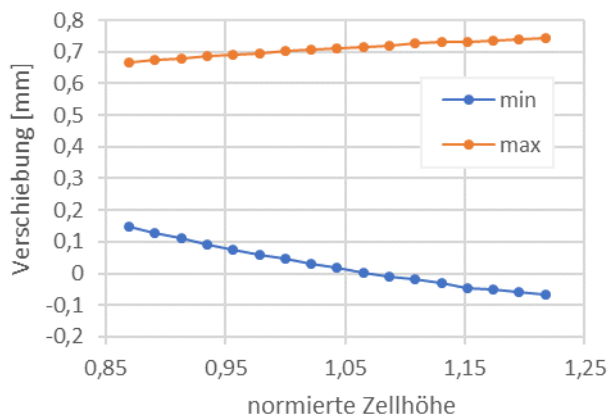


BILD 20. Minimale und maximale Verschiebung bei Variation der Zellhöhe

5.2.1. Variation der vertikalen Steglänge

Zur Bewertung des Einflusses der vertikalen Steglänge l ist die Verschiebung über verschiedene Längen in BILD 19 dargestellt. Es lässt sich feststellen, dass die Steglänge ausgehend von der Referenzgeometrie kaum einen Einfluss auf die minimale oder maximale Verschiebung an der Innenseite hat. Außerdem ist in der Differenz zwischen den Werten eine Aufwölbung der Innenseite deutlich zu erkennen.

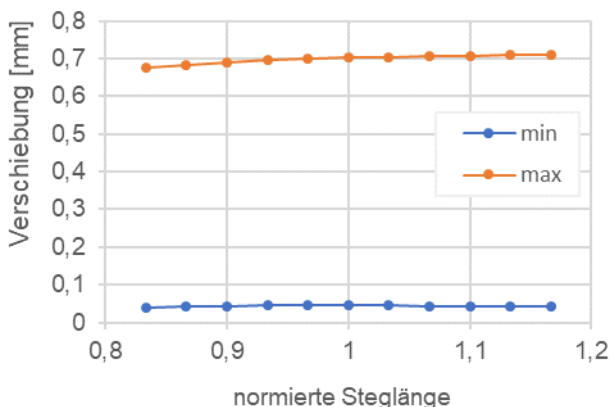


BILD 19. Minimale und maximale Verschiebung bei Variation der Steglänge

5.2.2. Variation Zellhöhe

Die Aufwölbung verstärkt sich durch die Zunahme der Zellhöhe, siehe BILD 20. Die minimale Verschiebung nimmt so weit ab, dass sich die Mitte der Innenseite nicht mehr nach außen verschiebt. Der minimale Innenradius nimmt in diesem Fall ab, d.h. die Gehäusewand verschiebt sich nach innen.

Durch einen längeren Steg werden zwar die Oberkanten weiter nach außen gezogen, jedoch ist die Veränderung nicht so stark wie in Mittelebene. Bei der Auslegung ist daher auf eine geeignete Zellhöhe zu achten.

5.2.3. Variation Zellwinkels

Der Verlauf der Variation des Zellwinkels zeigt einen wesentlichen Einfluss auf die Verschiebungen. Bei einem niedrigen Zellwinkel bzw. wenig Neigung des Stegs gegenüber der Horizontalen wird die Innenseite wieder so stark gewölbt, dass der Innenradius wieder abnimmt. Bei diesen Verschiebungen nimmt ebenfalls die maximale Vergleichsspannung so stark zu, dass es zu plastischen Verformungen oder einem Versagen der Struktur kommen kann.

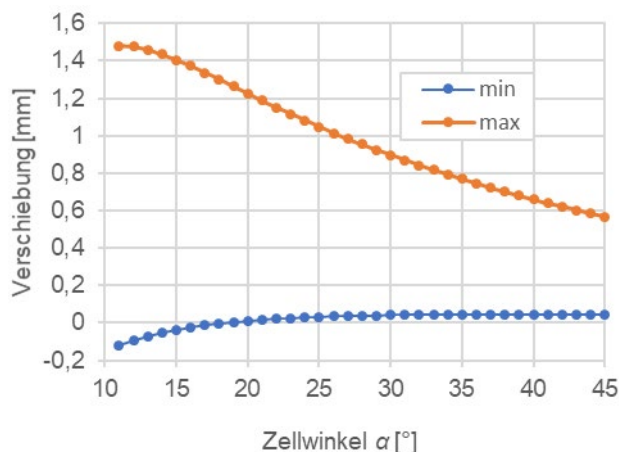


BILD 21. Minimale und maximale Verschiebung der Innenseite bei Variation des Zellwinkels

5.2.4. Variation Stegbreite t_1

Die Variation der vertikalen Stegbreite t_1 zeigt ein ähnliches Verhalten wie aus der vorhergehenden Variation des Zellwinkels. Eine zu niedrig gewählte Stegbreite ermöglicht der Innenseite ein starkes Aufwölben mit der damit verbundenen hohen Vergleichsspannung. Zu erwarten war hierbei, dass sich beide Verschiebungen mit steigender Breite annähern. Zum einen steigt durch den breiteren Steg das Biegeverstandsmoment. Die daraus resultierende Verformung wird kleiner. Zum anderen steigt bei gleicher Kraft die Querschnittsfläche der Struktur des Kreisrings. Die Spannungen und Dehnungen in Umfangsrichtung nehmen ab.

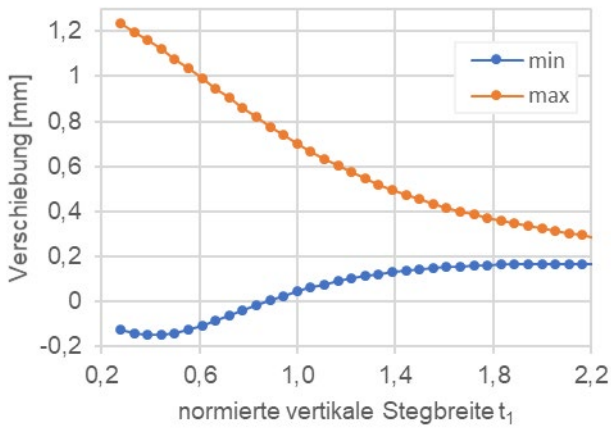


BILD 22. Minimale und maximale Verschiebung der Innenseite bei Variation der vertikalen Stegdicke t_1

5.2.5. Variation Stegdicke t_2

Wird ausgehend von der Referenzgeometrie die Stegdicke t_2 variiert, ist vor allem ein Einfluss auf die maximale Verschiebung festzustellen. Die minimale Verschiebung und damit der Innenradius werden von diesem Parameter kaum beeinflusst. Mit einem breiteren horizontalen Steg nimmt vor allem wieder die Verformung und damit auch die Aufwölbung in Verbindung mit der auftretenden Vergleichsspannung zu. Die Dimensionierung der Stegdicken wird vor allem durch die Kräfte und Spannungen bestimmt.

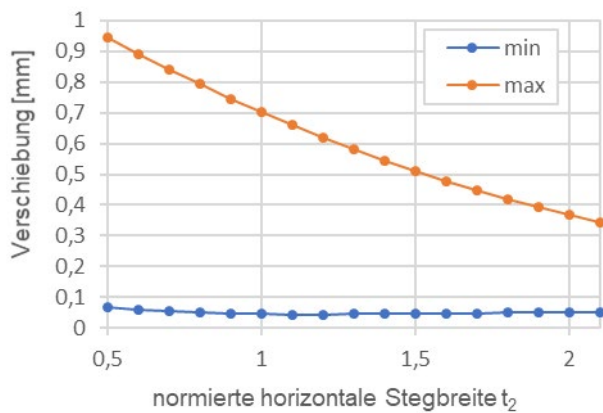


BILD 23. Minimale und maximale Verschiebung der Innenseite bei Variation der horizontalen Stegdicke t_2

5.2.6. Variation Anzahl zellulären auxetischen Strukturen in radialer Richtung

Die Variation der Anzahl der zellulären auxetischen Strukturen in radialer Richtung zeigt das Potential der gewählten auxetischen Struktur. Es ist zu beobachten, dass die Verschiebungen mit der Anzahl der Strukturen linear ansteigen. Die Verschiebungen jeder Struktur addieren sich jeweils während an der Innenseite die Aufwölbung auf dem Niveau einer einzelnen Struktur bleibt.

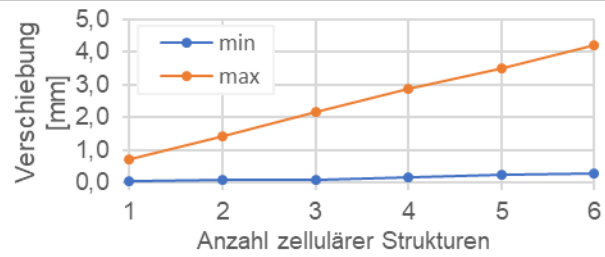


BILD 24. Minimale und maximale Verschiebung der Innenseite bei Erhöhung der Anzahl der Zellen

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das mechanische Verhalten einer zellulären auxetischen Struktur wurde hinsichtlich der Anwendung als Spaltheilungskonzept analysiert. Das strukturelle Verhalten wird dabei von geometrischen Parametern unterschiedlich bestimmt. Der jeweilige Einfluss auf das radiale Verformungsverhalten an der Innenseite der Gehäusewand wurde mit Hilfe von FE-Simulationen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Parameter einen unterschiedlichen Einfluss hinsichtlich radialem Verschiebungspotenzial und auftretender Konturwölbung besitzen. Grundlegend gelingt es durch die axiale Kräfteinleitung den Gehäusedurchmesser und damit den Spalt zu vergrößern. Es hat sich auch gezeigt, dass durch einzelne Parameter das radiale Verformungsverhalten der auxetischen Struktur verändert werden kann. Besonderen Einfluss zeigen dabei die Stegdicken sowie die Anzahl der Zellen in radialer Richtung. Prinzipiell ist es notwendig die Geometrieparameter hinsichtlich der Rahmenbedingungen auszulegen. Dabei gilt es die Stegdicken entsprechend der Belastung und der dadurch im Bauteil auftretenden Beanspruchung ausreichend zu dimensionieren. Um die auftretende Aufwölbung ohne weitere Maßnahmen zu minimieren, kann die vertikale Stegdicke mit Blick auf die notwendige Verschiebung weiter erhöht werden.

Das größte Potenzial hinsichtlich Verschiebungseffekt besitzt jedoch die Anzahl der radial angeordneten auxetischen Zellen. Im Unterschied zu der Anwendung in 2d-Plattenelementen entsteht in dem Kreisring durch die Umfangsvergrößerung an der inneren Gehäusewand an den Stegen eine radiale Druck- und an der Innenwand eine tangentielle Zugspannung. Daraus resultiert eine größere Aufwölbung der Innenwand. Neben der Anpassung der Geometrieparameter mit direktem Einfluss auf diese Größe sind weitere Maßnahmen zur Optimierung des Verformungsverhaltens denkbar.

Mit dem Ziel einer möglichst geringen Aufwölbung könnte zur Erhöhung der Biegesteifigkeit eine weitere innere Verrippung hinzugefügt werden. In [20] wurde eine zusätzliche Möglichkeit zu Gestaltung der Innenseite mit strömungsoptimierenden Konstruktionsdetails (Cavitäten und Casing Treatments) vorgestellt. Denkbar wäre es auch im hier vorgestellten Konzept, diese Elemente zusätzlich zur Verringerung der Aufwölbung und der notwendigen Zugkräfte zur Umfangsveränderung zu nutzen.

Eine weitere erfolgsversprechende Modifikation ist die Segmentierung der auxetischen Strukturen, d.h. an einem geschlossenen inneren Gehäusering eine zusätzliche segmentierte Schicht der auxetischen Strukturen nach innen hin angebracht werden. Es hat sich in ersten Simulationen gezeigt, dass sich die Verschiebung der

Innenseite mit immer kleiner werdenden Kreissegmenten den Verschiebungen einer Platte mit ähnlichen Dimensionen annähert. Bei einem am Institut angefertigten Demonstrator wurde dieses Prinzip mit Ringsegmenten aus thermoplastischem Kunststoff im 3D-Druck umgesetzt und das oben beschriebene Verhalten demonstriert, siehe BILD 25.

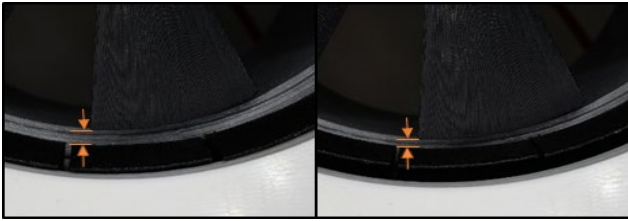


BILD 25. Demonstrator mit aktiver Spalthaltung

Fertigungsbedingt ist der Innenring hierbei jedoch noch nicht geschlossen. Bei einem Fandurchmesser von 110 mm konnte eine Spaltvergrößerung von ca. 2 mm erreicht werden.

Für experimentelle Untersuchungen an einem instituts-eigenen Prüfstand erfolgt im nächsten Schritt die Integration der auxetischen Gehäusestrukturen in ein elektrisch angetriebenes Fantriebwerk entsprechend dem Konzept in BILD 26.

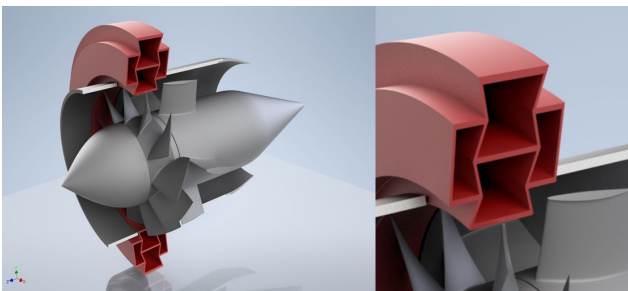


BILD 26. Integrationskonzept in ein elektrisch angetriebenes Fantriebwerk

7. DANKSAGUNG

Diese Veröffentlichung wird durch das Projekt Electric Aircraft Propulsion - safe, efficient, digitally linked (ELAPSED) innerhalb von dtec.bw - Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert.

Literaturverzeichnis

- [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] A. Hupfer: Spalte in Fluggasturbinen – Ursachen, Folgen und Optimierungsstrategien am Beispiel des Turboverdichters, Habilitationsschrift, Verlag Dr. Hut, München, 2019.
- [3] T. M. Cross, K. W. Hoffer, D. P. Jones, P. B. Kirschner, E. Langvin, J. C. Meschter: Auxetic structures and footwear with soles having auxetic structures, EP 3 010 362 A1
- [4] A. Höpfner: Geometrieversteller auxetisch, DE 10 2017 122 183 A1
- [5] S. Bock, W. Horn, J. Sieber: Active Core – A key technology for more environmentally friendly aero engines being investigated under the NEWAC program. ICAS 2008 26th International Congress of the Aeronautical Sciences, Anchorage, AK, 2008
- [6] R. W. P. Halsey: Tip Clearance Control, Patent, EP 0 808 991 B1, 2001.
- [7] K. F. Blaney, R.K. Hayford, C. M. Jarochoym: Accessible Rapid Response Clearance Control System, Patent WO 2015/102949 A2 2015
- [8] H. West: Variable clearance seal, Patent, US 3227418 A, 1966.
- [9] R. H. Colley: Rotor tip clearance control apparatus for a gas turbine engine, Patent US4330234 A, 1982.
- [10] F. M. Schwarz, J.W. Smith: Gas Turbine Engine Blade Tip Clearance Apparatus And Methods, Patent, US 8 011 833 B2, 2011.
- [11] M. G. McCaffery: Adjustable Blade Outer Air Seal Apparatus, Patent WO 2013/123172 A1, 2013.
- [12] D. A. Little, Z. Pu: Compressor Airfoil Tip Clearance Optimization System, Patent WO 2013/126126 A2, 2013.
- [13] R. Lakes: Foam structures with a negative Poisson's ratio, Science, vol. 235 p. 1038, 1987.
- [14] H. Hu, Y. Liu: A review on auxetic structures and polymeric materials, Scientific Research and Essays, vol. 5, no. 10, pp. 1052-1063, 2010
- [15] K. K. Saxena, R. Das, E. P. Calius: Three Decades of Auxetics Research – Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review. Adv. Eng. Mater., vol. 18: pp. 1847-1870, 2016.
- [16] J. Schwerdtferger, F. Schury, M. Stingl, F. Wein, R. Singer, C. Körner: Mechanical characterisation of a periodic auxetic structure produced by SEBM, Physica Status Solidi, vol. 247, pp. 1347-1352, 2012.
- [17] J.C. Álvarez Elipe, A. Díaz Lantada: Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering. Smart Mater. Struct, vol 21, 105004, 2012.
- [18] D. Rockel, S. Weihard, A. Hachmann, A. Hupfer, H.-P. Kau: Numerical Investigation of an Additively Manufactured Compressor Casing: The Effect of Auxetic Structures on the Tip Clearances, GT2013-95736, ASME Turbo Expo 2013, San Antonio, Texas, USA, June 3rd-7th, 2013.
- [19] T. Schmidt, S. Eisenmann, V. Velikov, V. Gümmer, A. Hupfer: Analysis of an Auxetic Casing Structure for Tip Clearance Control under Various Temperature and Pressure Conditions, ISABE-2017-22629, 23rd ISABE Conference, Manchester, UK, 2017.
- [20] T. Schmidt, J. Lorenz, V. Gümmer, A. Hupfer: Structural Analysis of an Auxetic Casing Structure Incorporating Tip Blowing Casing Treatment Modification." Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 7A: Structures and Dynamics. Phoenix, Arizona, USA, 2019.