

NEUE AUSSENHAUT BAUWEISEN ZUR GRENZSCHICHTABSAUGUNG BEI HYBRIDER LAMINARHALTUNG

M. Horn, R. Keck, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung, Pfaffenwaldring 38-40 70569 Stuttgart, Deutschland

Zusammenfassung

Hybride Laminarhaltung mit aktiver Grenzschichtabsaugung ist eine vielversprechende Möglichkeit zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs bei Passagierflugzeugen. Aufgrund des großen Einsparpotentials und des überschaubaren technischen Aufwandes wurde das Seitenleitwerk als Anwendungsbeispiel für diese Technologie ausgewählt. Darüber hinaus sind jedoch weitere Anwendungsbereiche, wie zum Beispiel die Tragflügel, denkbar. Um das volle Potential der Technologie ausschöpfen zu können, bedarf es einer konsequenten Umsetzung, was spezielle Bauweisen erfordert. Hierzu werden einige neue Ansätze mit dazugehörigen Fertigungskonzepten vorgestellt und bewertet.

1. EINFÜHRUNG

Flugzeuge der Zukunft sollen sparsamer im Treibstoffverbrauch sein. Diese Forderung resultiert nicht nur aus dem Wunsch von Passagieren, möglichst umweltverträglich zu reisen, sondern ebenso aus immer strenger werdenden Emissionsvorschriften und dem Verlangen nach niedrigeren Betriebskosten für die Betreiber.

Typischer Ansatzpunkt für Treibstoffeinsparungen sind zu allererst die Triebwerke, welche große Fortschritte auf diesem Gebiet vorweisen können. Ein weiterer viel diskutierter Ansatzpunkt ist die Verringerung der Flugzeugmasse, was ebenfalls direkte Auswirkungen auf den Treibstoffverbrauch hat. Auch hier wurden bereits große Fortschritte erzielt, was zum Beispiel durch den steigenden Einsatz von Faserverbundwerkstoffen erreicht wurde. Eine weitere Möglichkeit ist die Verbesserung der Aerodynamik, wobei hier die Laminarhaltung eine besonders vielversprechende Lösung darstellt. Ziel ist dabei, den Umschlag der flugzeugumströmenden Luft von laminarer zu turbulenter Strömung zu vermeiden oder die laminare Lauflänge möglichst groß zu halten. Erreicht werden kann dieses Ziel bei geeigneten Randbedingungen durch natürliche Laminarhaltung, also allein durch Formgebung des Flugzeuges. Eine weitere Möglichkeit mit breiterem Einsatzspektrum stellt die hybride Laminarhaltung dar (Hybrid Laminar Flow Control, HLFC), wo neben einer speziellen äußeren Flugzeugform die Luftströmung aktiv beeinflusst wird. Diese Beeinflussung geschieht dabei über ein Absaugen der unmittelbar an der Flugzeugaußenhaut anliegenden Grenzschicht.

Das Absaugen der Grenzschicht erfolgt über eine mikro-perforierte Außenhaut. Für eine Umsetzung der hybriden Laminarhaltung sind also spezielle Bauweisen notwendig. Einerseits müssen die Anforderungen zur Grenzschichtabsaugung erfüllt werden, andererseits muss die perforierte Außenhaut die üblichen Belastungen ertragen. Neben strukturellen Lasten durch den Luftwiderstand, Seitenwind oder Flugmanöver sind auch Umwelteinflüsse wie Erosion, Hagel oder Vereisung zu

beachten. Ebenso zu nennen ist die Forderung nach einem möglichst geringen Zusatzgewicht des gesamten Absaugsystems, weil die erreichte Treibstoffersparnis durch zusätzliche Masse teilweise wieder kompensiert werden kann.

Zur Demonstration der Realisierbarkeit und Leistungsfähigkeit der Grenzschichtabsaugung sind verschiedene Bereiche der Flugzeugaußenhaut denkbar. Aus Gründen der Umsetzbarkeit wurde als Anwendungsbeispiel das Seitenleitwerk eines Kurz- und Mittelstreckenstrecken-Passagierflugzeuges ausgewählt. Dadurch ist es möglich, einen so großen Bereich mit HLFC-Systemen auszustatten, dass ein signifikantes Einsparpotenzial erreicht werden kann. Gleichzeitig ist die Integration in die bestehende Flugzeugstruktur vergleichsweise einfach, weil das Seitenleitwerk über keine bewegliche Vorderkante verfügt und genügend Bauraum zur vollständigen Integration des Absaugsystems zur Verfügung stellt. Ein weiterer großer Vorteil, der für das Seitenleitwerk als Technologiedemonstrator spricht, ist die Möglichkeit, bereits im Betrieb befindliche Flugzeuge mit einer Nachrüstlösung auszustatten. In [1] werden die möglichen Einsparpotentiale durch HLFC näher beschrieben.

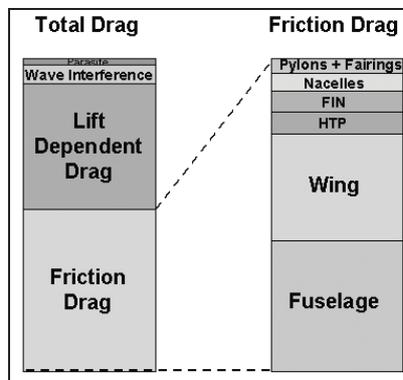


BILD 1. Luftwiderstand durch Reibung [1]

Hieraus sowie aus Bild 1 ergibt sich ein maximales Einsparpotential am Seitenleitwerk von 3% des

Gesamtluftwiderstandes eines Flugzeuges.

2. ANFORDERUNGEN AN AUSSENHAUTBAUWEISE

Aufgrund der geforderten Perforation der Außenhaut muss sich eine Bauweise für Grenzschichtabsaugung deutlich von einer konventionellen Bauweise unterscheiden. Die Mikro-Perforation stellt dabei die größten Anforderungen an die Fertigungstechnik. Nach [2] soll der Durchmesser der Absauglöcher nicht mehr als 50µm betragen. In [3] wird beschrieben, dass der Lochabstand jeweils das 10fache des Lochdurchmessers betragen sollte. Aus diesen Werten ergibt sich ein in BILD 2 dargestelltes Lochmuster mit einer definierten Porosität.

$$(1) P = \frac{A_L}{A_{ges}} = 0,8\%$$

P - Porosität

A_L – offene Fläche

A_{ges} – Gesamtfläche

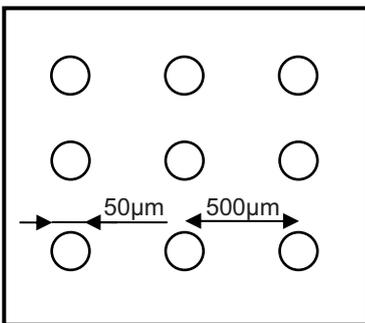


BILD 2. Lochmuster der Mikroperforation

Neben den speziellen Anforderungen zur Absaugung muss die Bauweise auch die üblichen strukturellen Anforderungen einer Leitwerksvorderkante, also Festigkeit und Steifigkeit, erfüllen.

3. BEKANNTE BAUWEISEN VON LEITWERKSVORDERKANTEN

Vorderkanten von Tragflächen oder Leitwerken werden in der Regel als monolithische Schalen oder als Sandwich ausgeführt. Als Material finden Metalle aber auch Faserkunststoffverbunde (FKV) Anwendung. FKV-Vorderkanten sind teilweise mit metallischen Schutzschichten versehen um die Erosionsbeständigkeit zu erhöhen.

In früheren Forschungsarbeiten wurden bereits verschiedene Varianten von Absaugnasen konstruiert und teilweise auch gefertigt [4].

Faserverstärkte Kunststoffe können bei der Betrachtung für mögliche Außenhaut-Werkstoffe nicht beachtet werden. Durch die große Anzahl an eng beieinander liegenden Bohrungen und damit Unterbrechungen der Faserstruktur verringert sich deren Festigkeit sehr stark, weil der Effekt der Faserverstärkung nahezu vollständig verschwindet. Zusätzlich würde der im Bohrungsbereich ungeschützte FKV aufgrund von Erosion weitere

Beschädigungen erfahren. Diese Aussagen werden unter anderem in [1] belegt.

Frühere Forschungsarbeiten [1] zeigten außerdem, dass aus Gründen der Erosionsbeständigkeit nur Stähle oder Titanlegierungen als perforierte Außenhaut für Leitwerksvorderkanten in Frage kommen. Mit Aluminium konnte in Versuchen keine ausreichende Erosionsbeständigkeit erreicht werden.

4. FERTIGUNGSVERFAHREN MIKROPERFORATION

4.1. Mechanische Verfahren

Eine der einfachsten Möglichkeiten zum Herstellen einer Perforation ist das mechanische Bohren. Mit Hilfe moderner Sinterverfahren lassen sich nach dem Stand der Technik Spiralbohrer mit Bohrdurchmessern von bis zu 60µm herstellen. Diese Bohrer eignen sich jedoch eher für die Bearbeitung relativ weicher Werkstoffe wie Kunststoff oder Aluminium. Das größtmögliche Aspektverhältnis der Bohrungen, also der Quotient aus Bohrtiefe und Bohrdurchmesser, beträgt bei Bohren dieser Größenordnung maximal 10. Dieser Wert ist jedoch nur mit weichen Materialien zu erreichen.



BILD 3. Mikro-Hartmetallbohrer, Durchmesser 60µm

Mit dem genannten Bohrverfahren lassen sich Löcher in der geforderten Größenordnung grundsätzlich herstellen. Die Qualität der herstellbaren Perforation ist dabei hoch, was zum Beispiel an der Rundheit in BILD 4 zu erkennen ist. Jedoch ist die Repetitionsrate für das Perforieren größerer Flächen ungeeignet, weshalb das Verfahren zunächst nicht weiter betrachtet wurde.

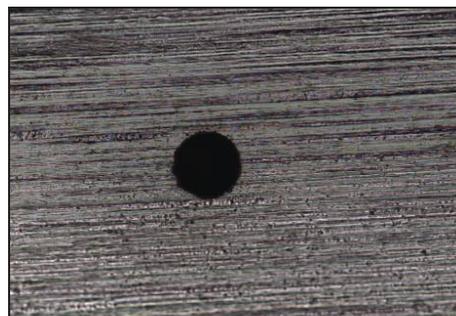


BILD 4. 100µm-Bohrung in 0,15mm Edelstahlblech

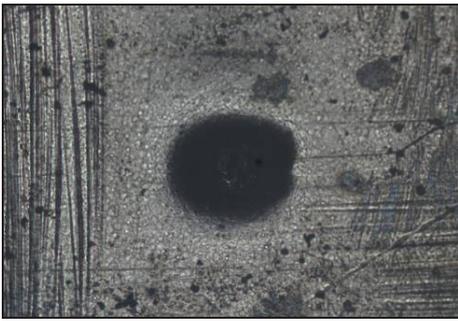


BILD 5. 75µm-Bohrung in 0,4mm CF-PEEK

4.2. Strahlverfahren

Für das Perforieren größerer Flächen scheinen Strahlverfahren besser geeignet zu sein. Speziell zu nennen sind dabei das Elektronenstrahlbohren sowie das Laserbohren in verschiedenen Varianten.

Das Elektronenstrahlbohren nutzt die Energie eines Elektronenstrahls, welcher das zu bohrende Material in einem sehr kleinen Bereich verflüssigt bzw. sublimiert.

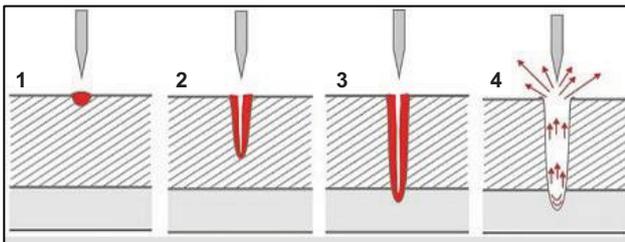


BILD 6. Schema Elektronenstrahlbohren [Quelle: pro-beam AG]

In BILD 6 ist der Verfahrensablauf schematisch dargestellt. Im ersten Schritt trifft der Strahl auf dem Werkstück auf und dringt sofort darin ein. Dabei entsteht ein sehr kleiner offener Bereich, in dem das Material sublimiert. Rot dargestellt ist der durch Wärmeeintrag verflüssigte Bereich des Grundmaterials. Sobald der Strahl das Werkstück vollständig durchdrungen hat (Schritt 3-4), trifft er auf ein sich explosionsartig ausbreitendes Backing-Material, was den verflüssigten Werkstoff aus dem Bohrloch schleudert. Mit diesem Verfahren lassen sich sehr hohe Repetitionsraten erreichen. Der Stand der Technik erlaubt jedoch nur Lochdurchmesser von $\geq 70\mu\text{m}$.

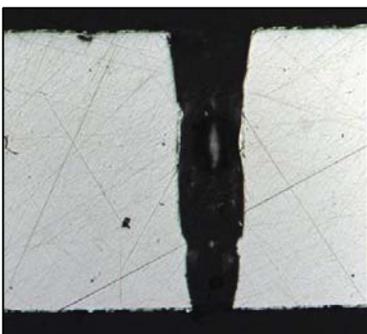


BILD 7. Schlibbild Elektronenstrahl-Bohrung, Edelstahlblech 0,8mm

Weiterhin ist zu erwähnen, dass die nicht nachbearbeiteten Bohrlöcher einen Grat an der Strahleintrittseite sowie Abweichungen von der Zylinderform aufweisen, wie in BILD 7 zu erkennen ist.

Ebenfalls sehr große Repetitionsraten sind mit Laser-Verfahren möglich. Im Gegensatz zum Elektronenstrahlbohren erfolgt der Materialabtrag beim Laser-Bohren durch Erwärmung, Schmelzen, Verdampfen und Ionisieren. Das Laser-Bohren lässt sich in vier Bohrverfahren einteilen, welche sich hinsichtlich erreichbarer Präzision und dem Abtragsvolumen unterscheiden. Wie in BILD 8 zu erkennen ist, verhalten sich die Kennzahlen Präzision und Repetition (direkt abhängig vom Abtragsvolumen) dabei jeweils gegenläufig. Ebenfalls zu beachten ist, dass mit steigender Präzision im Allgemeinen ein größeres Aspektverhältnis der Bohrungen möglich ist.

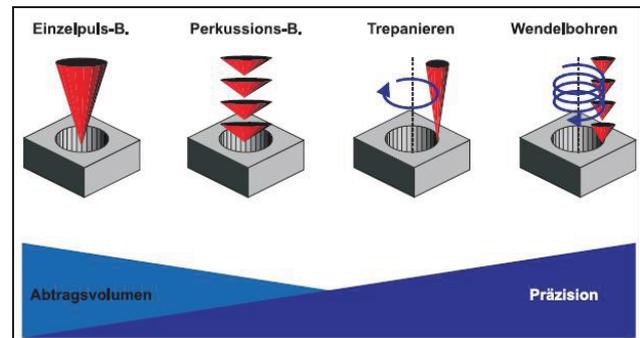


BILD 8. Laserbohr-Verfahren [5]

Mit gepulsten Bohr-Verfahren sind Aspektverhältnisse von bis zu 10 möglich. Noch größere Aspektverhältnisse sind zwar theoretisch machbar, verlängern die Bohrdauer jedoch extrem. Dieser Effekt beruht auf geometrischen Effekten sowie auf der Abschwächung des Laserstrahls durch das Plasma des abgetragenen Materials [5].

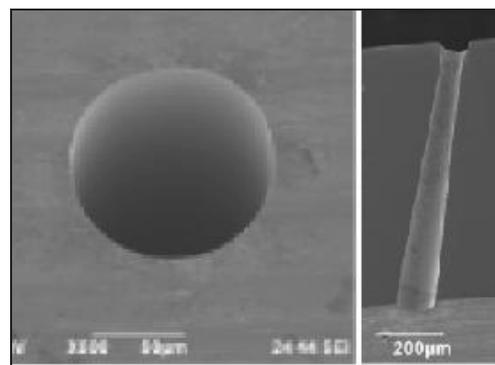


BILD 9. Laserbohrung in Edelstahl (Quelle: IFSW Stuttgart)

Die Repetitionsraten gehen von mehreren hundert Bohrungen pro Sekunde bei Einzelpuls-Verfahren bis hin zu mehreren Sekunden pro Bohrung beim Drepanier- oder Wendelbohren, stark abhängig von Material, Aspektverhältnis, Abtragsvolumen, Qualitätsanforderungen und der Laserquelle an sich. Die erreichbare Bohrqualität mit einem gepulsten Laser im Trepanierverfahren ist in BILD 9 zu erkennen.

4.3. Chemische Verfahren

Ein weiteres verfahren zur Herstellung einer Mikro-Perforation ist das Ätzen. Der prinzipielle Ablauf dieses Verfahrens ist in BILD 10 zu sehen. Der größte Vorteil des Ätzens gegenüber Strahlverfahren liegt in der Möglichkeit, eine sehr große Anzahl an Bohrungen zeitgleich herzustellen, was die Fertigungsdauer eines großen mikro-perforierten Bleches stark verkürzt. Außerdem sind Bohrungen im geforderten Durchmesser mit einer sehr hohen Lochqualität herstellbar, wie in BILD 11 erkannt werden kann.

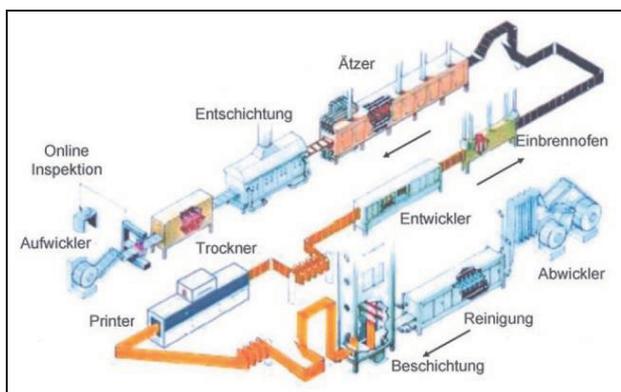


BILD 10. Verfahrensablauf Ätzen (Quelle: micrometall GmbH)

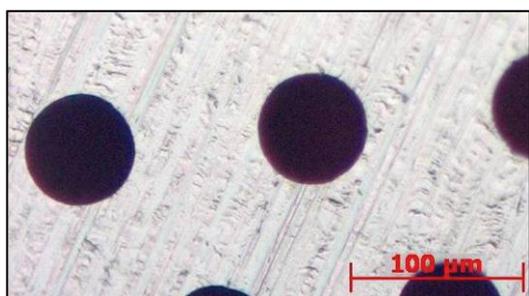


BILD 11. Geätztes Edelstahlblech

Als Nachteil ist bei diesem Verfahren das begrenzte Aspektverhältnis von 0,8 zu nennen. Weiterhin ist die Eignung für das Ätzen von Titanblechen zu klären.

5. NEUE BAUWEISSEN ZUR GRENZSCHICHTABSAUGUNG

5.1. Grundlagen Bauweisen

Die Fertigungstechnologien, insbesondere der Mikro-Perforation, haben einen entscheidenden Einfluss auf die Bauweise. So ist zum Beispiel zu beachten, dass der größere Durchmesser der Bohrungen stets auf der Innenseite der Außenhaut liegen soll, um ein Verstopfen der Bohrungen durch Schmutz zu vermeiden [4]. Weil bei allen Strahlverfahren die Strahleintrittseite den größeren Durchmesser aufweist, muss die Perforation also immer von Innen und somit vor dem Umformen und Fügen der Außenhaut erfolgen. Eine nachträgliche Perforation von außen ist damit technisch nicht möglich. Gleichzeitig ist das fertigungstechnisch maximal mögliche

Aspektverhältnis entscheidend. Bei vorgegebenem Bohrungsdurchmesser bedeutet dies: Je größer das mögliche Aspektverhältnis, umso dickwandiger kann die Außenhaut ausgeführt werden. Aus Steifigkeitsgründen hat dies somit eine direkte Auswirkung auf die Außenhautkonstruktion bzw. die Materialwahl.

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Punkt ist das Verdecken der Perforation durch Fügeflächen der Außenhaut. Um eine möglichst gleichmäßige Absaugung der Grenzschicht zu erreichen, sollten diese Fügeflächen so klein wie möglich gestaltet werden bzw. überhaupt nicht vorhanden sein. Weiterhin sollten bereits im frühen Entwicklungsstadium Möglichkeiten der Wartung, zu Enteisungssystemen und zur Reparierbarkeit bedacht werden.

Um ein optimales Absaugen der Grenzschicht zu gewährleisten, ist eine Profiltiefen-abhängige Absaugverteilung notwendig. In BILD 12 ist die Verteilung des Absaugdruckes über der dimensionslosen Profiltiefe zu erkennen. Aus dieser Verteilung ergibt sich die Forderung nach einer Kammerung des Absaugsystems, um den notwendigen Absaugdruck im jeweiligen Bereich zur Verfügung zu stellen.

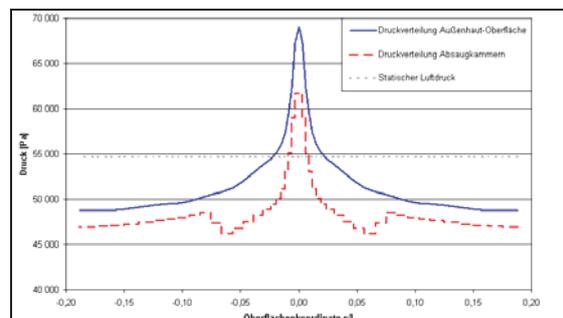


BILD 12. Druckverteilung

In BILD 13 ist eine bereits realisierte Absaugnase zu erkennen. Diese Bauweise aus einem früheren Forschungsvorhaben besteht aus einer inneren und äußeren Schale aus Titanblechen, welche durch Stege verbunden sind. Die Stege bilden dabei die Kammerung des Absaugsystems. Die Wandstärke der Außenhaut und der inneren Haut beträgt 0,8mm. In BILD 14 sind zwei Fertigungsschritte dieser Bauweise zu sehen. Links die perforierte Außenhaut mit Kammeraufteilung, rechts mit gefügter innerer Schale.

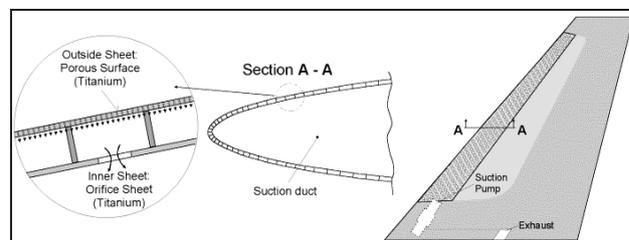


BILD 13. Bekannte Bauweise [1]

Die Funktion dieser Bauweise konnte in Windkanal- sowie Freiflugversuchen nachgewiesen werden [6] und dient deshalb als Referenz für die weiteren Betrachtungen.

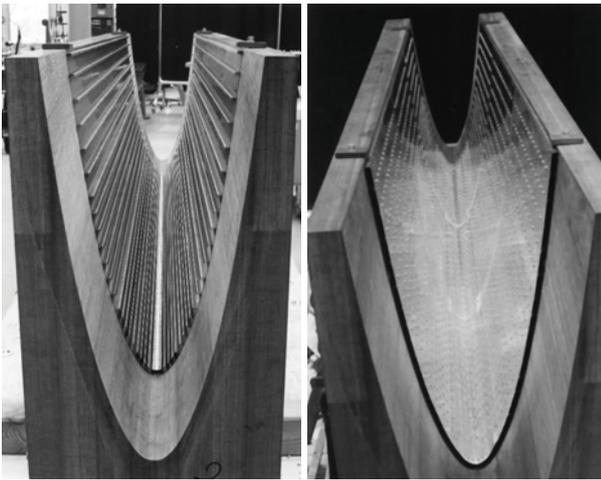


BILD 14. Bauweise aus dem ALTTA Programm [1]

5.2. Bauweisen

Neue Bauweisen für Leitwerksvorderkanten sollten sich von Beginn an aktuellen und auch zukünftigen Anforderungen, wie zum Beispiel die für Neukonstruktionen vorgeschriebene, deutlich erhöhte Impaktormasse im Falle von Vogelschlag, orientieren. Deshalb werden neben der Absaug-Außenhaut auch Varianten betrachtet, welche die Energie solcher Aufschläge aufnehmen oder von der Struktur ableiten.

In BILD 15 ist der dafür vorgesehene Aufbau schematisch dargestellt. Der spitz zulaufende Splitter soll dabei die auftreffenden Impaktoren von den dahinter liegenden Holmen ableiten und so die tragende Struktur schützen. Beschädigungen des Absaugsystems werden toleriert, da sie nicht Sicherheitsrelevant sind. In [7] sind Untersuchungen zu einer solchen Bauweise für eine Tragflächenvorderkante gemacht wurden. Die Ergebnisse daraus können aufgrund der hohen Ähnlichkeit auf diesen Anwendungsfall übertragen werden.

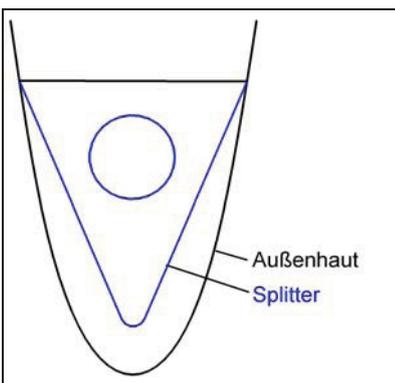


BILD 15. Bauweisenkonzept für Leitwerkvorderkanten

Eine mögliche Bauweise, diesen Splitter mit einem Absaugsystem zu kombinieren, ist in BILD 16 zu sehen.

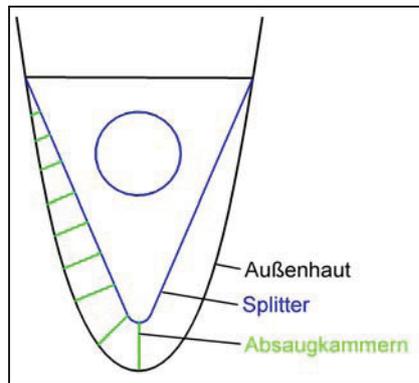


BILD 16. Bauweise Seitenleitwerk

Die Absaugung erfolgt dabei über zwischen Außenhaut und Splitter angeordneten Absaugkammern, ähnlich zu der bereits vorgestellten älteren Bauweise. Die Außenhaut besteht dabei aus Metall oder einem FKV-Metall-Verbund, wie in BILD 17 dargestellt. Aufgrund der monolithischen Außenhaut muss diese dickwandig ausgeführt werden. Daraus ergeben sich Nachteile für die Fertigung der Mikro-Perforation, weil große Aspektverhältnisse bewältigt werden müssen. Außerdem ist mit einer großen strukturellen Masse zu rechnen.

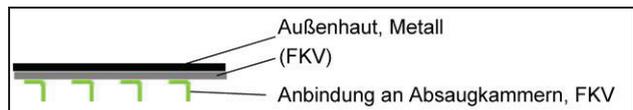


BILD 17. Monolithische Außenhaut-Bauweise

Eine weitere Möglichkeit der Verbindung von Absaugung und Splitter-Konzept ist in BILD 18 zu erkennen. Dabei besteht die Außenhaut aus einem mehrschichtigen Aufbau: einer sehr dünnen äußeren Lage, welche die geforderte Perforation aufweist, sowie einer dahinter liegenden Stützschiicht, welche ebenfalls porös ist. Aus einer solchen Bauweise ergeben sich viele Vorteile. Die Mikro-Perforation muss lediglich in die dünne Außenlage eingebracht werden, was die Fertigung erheblich vereinfacht. Der zweite große Vorteil ist, dass die Anbindung an die Struktur keinen Einfluss auf die Absaugung hat, da keine Absaugbohrungen verdeckt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, mit speziellen Stützlagen das Gewicht der Bauweise zu reduzieren, da diese nicht zwingend aus Metall bestehen muss.

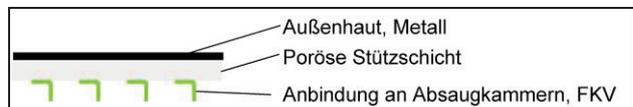


BILD 18. Außenhaut mit Stützschiicht

Anders als in den bereits vorgestellten Möglichkeiten, ist in BILD 19 eine weitere Bauweise dargestellt, welche aber ohne eine Kammerung im Inneren der Absaugnase auskommt. Auch hier besteht die Außenhaut aus einer dünnen äußeren Lage und einer dahinter liegenden Stützschiicht. Diese Stützschiicht besitzt dabei einen angepassten Aufbau, welcher an jeder Position die für die Absaugung erforderliche Druckdifferenz erzeugt. Durch diese Kombination lassen sich erhebliche Vereinfachungen, wie dem Wegfall der Kammern, realisieren.

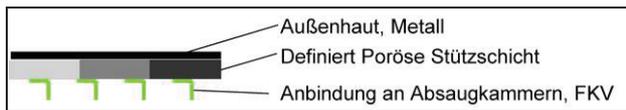


BILD 19. Außenhaut mit definiert poröser Stützschrift

In BILD 20 ist ein Schliffbild eines Fertigungsversuches für solch eine Bauweise zu sehen. Für den Versuch wurde ein mikro-perforiertes Edelstahlblech mit einer Wandstärke von 0,05mm, was die Außenhaut darstellen soll, mit einem Edelstahl-Gewebeverbund gefügt. Der Gewebeverbund besteht wiederum aus mehreren Einzellagen Edelstahlgewebe mit Drahtstärken von 0,1 und 0,6mm. Die Fügeverbindung wurde in einem Festkörpersinterprozess hergestellt.



BILD 20. Schliffbild Metall-Außenhaut mit Stützschrift

Zu erkennen ist noch eine ausgeprägte Oberflächen-Welligkeit der Außenhaut, welche für die Anwendung bei HLFC in dieser Form nicht akzeptabel ist. Zum Erreichen einer annehmbaren Welligkeit sind weitere Versuche mit geeigneten Materialkombinationen sowie gegebenenfalls einer Variation der Verfahrensparameter notwendig. Die generelle Eignung der Bauweise als Absaugaußenhaut konnte jedoch nachgewiesen werden. Es wurde eine Stützstruktur sowie eine Fügung mit der Stützstruktur gefunden, welche keinen Einfluss auf die Grenzschichtabsaugung ausübt. Die Ansicht der Probenoberseite, in BILD 21 zu sehen, zeigt deutlich, dass die Perforation durch die Stützstruktur nicht beeinflusst wird.

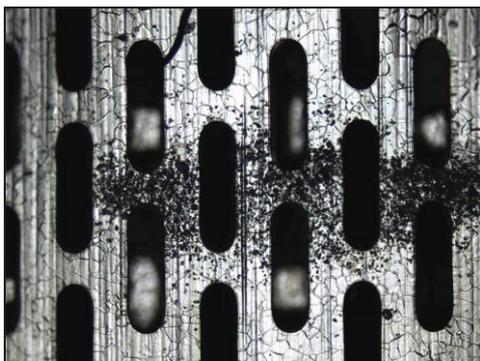


BILD 21. Perforierte Außenhaut mit darunter liegender Stützschrift

6. ERGEBNISSE

Die gezeigten Bauweisen-Varianten sowie die ersten Fertigungsversuche für diese Bauweisen lassen auf weiteres Optimierungspotenzial schließen. Somit können mit weiteren Verbesserungen zusammen mit den Nachweisen früherer Forschungsarbeiten, welche die

Funktion und Wirkung von HLFC gezeigt haben, neue Ansätze geschaffen werden, welche die Umsetzung von HLFC vereinfachen.

Mit der vorgestellten Außenhaut-Bauweise ist es möglich die Grenzschicht abzusaugen, ohne negative Einflüsse der dahinter befindlichen Struktur zu erhalten. Außerdem ist es durch einen mehrschichtigen Aufbau möglich, das limitierende Aspektverhältnis bei Bohrverfahren zu umgehen.

Durch einen bedarfsgerechten Aufbau der Außenhaut ist es denkbar, den Druckverlust der Außenhaut an die Anforderungen der Absaugverteilung anzupassen. Damit kann auf eine Kammerung verzichtet werden, woraus sich neue Freiräume für die Bauweise und die Konstruktion ergeben, zusätzlich zur Reduktion der Strukturmasse.

Für die Umsetzung nehmen die Fertigungstechnologien zur Herstellung der Mikroperforation sowie die Fügeverfahren für die perforierte Außenhaut eine wichtige Rolle ein. Folgende Herausforderungen müssen dafür bewältigt werden:

- Mikro-Perforation von großen Flächen mit hoher Präzision
- Wirtschaftliche Umsetzung der Mikro-Perforation
- Entwicklung von Fügeverfahren zur Realisierung der Bauweisen
- Machbarkeitsnachweis der Bauweisen
- Rechnerischer und praktischer Nachweis der Absaug-Funktion

- [1] G. Schrauf: Status and perspectives of laminar flow, The Aeronautical Journal, Seite 639-641, December 2005
- [2] D.G. MacManus: Predictions and Observations of the Flow Field Induced by Laminar Flow Control Microperforations, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 13, Seite 395-407, 1996
- [3] D.G. MacManus: An aerodynamic prediction technique for laminar flow control suction surfaces, Univ. Galway, Ireland 1997
- [4] T.M. Young: Investigation of hybrid laminar flow control surfaces, Aircraft Design 4, Seite 127-147, 2001
- [5] F. Dausinger: Präzisionsbohren mit kurzen und ultrakurzen Laserpulsen, Laser Technik Journal, Volume 1, Issue 1, Seite 40-44, April 2004
- [6] G. Schrauf: Future Needs and Laminar Flow Technology, Air & Space Europe, Volume3, Seite 98-100, 2001
- [7] R. Keck: Design, analysis, and manufacturing of a carbon-fibre-reinforced polyetheretherketone slat, Proc. IMechE Part G: J. Aerospace Engineering, Vol. 223, Seite 1115-1123, 2009