

# BAUWEISEN UND FERTIGUNGSKONZEPTE FÜR HYBRIDE LAMINARHALTUNG

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

## Zusammenfassung

Ressourceneffizientes Fliegen – ein zentrales Ziel aktueller und zukünftiger Entwicklungen in der Luftfahrt. Einer der vielversprechendsten Wege dahin ist die Laminartechnologie. Mit ihr ist eine erhebliche Verringerung des Strömungswiderstands und damit eine Einsparung wertvoller Ressourcen möglich. Ein Teil der Laminarhaltung wird dabei durch die aktive Strömungsbeeinflussung mittels Grenzschichtabsaugung realisiert, der sogenannten Hybriden Laminarhaltung (Hybrid Laminar Flow Control, HLFC).

In den folgenden Betrachtungen werden neue Bauweisen vorgestellt, mit denen die speziellen Anforderungen der Hybriden Laminarhaltung erfüllt werden können. Die Untersuchungen beziehen sich auf die Vorderkante eines Seitenleitwerkes, sind jedoch auf alle anderen relevanten Einsatzbereiche von HLFC, wie zum Beispiel Tragflächen, übertragbar. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Fertigbarkeit und Integration in bestehende Flugzeugstrukturen gelegt, unter Berücksichtigung des relevanten Auslegungslastfalls Vogelschlag. Ziel der Untersuchungen ist es, die strukturellen und fertigungstechnischen Anforderungen mit den aerodynamischen Restriktionen zu vereinen. Gezeigt werden Bauweisen, welche durch Kombination von Faserverbundwerkstoffen und Metallen die Technologie der Grenzschichtabsaugung mit Aspekten des funktionsintegrierten Leichtbaus verbinden.

## 1. EINLEITUNG

Die grundsätzliche Funktion eines HLFC-Systems konnte bereits vor einigen Jahren mit Flugversuchen nachgewiesen werden. Unter anderem wurden im Jahr 2002 erfolgreiche Flugversuche mit dem DLR-Forschungsflugzeug Dornier Do 228 durchgeführt [1]. Aktuelle Bestrebungen, Flugzeuge ressourcen-sparender einzusetzen, lenken die Aufmerksamkeit wieder verstärkt auf die Laminarhaltung. Neben der Natürlichen Laminarhaltung (Natural Laminar Flow, NLF), welche besonders für Tragflächen im Mittelpunkt des Interesses steht, wird auch die Weiterentwicklung der Hybriden Laminarhaltung verstärkt vorangetrieben. Im Gegensatz zur NLF-Technologie, welche lediglich die Wirkung spezieller Laminarprofile nutzt, wird bei der HLFC-Technologie zusätzlich die Grenzschicht beeinflusst. Diese Beeinflussung geschieht dabei über die Absaugung einer definierten Menge der Grenzschicht mittels einer mikro-perforierten Außenhaut. Mögliche Anwendungsgebiete von HLFC sind dabei typischerweise die Vorderkanten der Seiten- und Höhenleitwerke sowie auch der Tragflächen für Mittel- und Langstrecken-Passagierjets. Aufgrund der vergleichsweise einfachen Integration in ein Seitenleitwerk und der Möglichkeit der isolierten Betrachtung ist dieser Anwendungsfall die übliche Beispielanwendung für grundlegende Entwicklungen. Deshalb beziehen sich die folgenden Betrachtungen und Untersuchungen ebenfalls auf eine Seitenleitwerks-Vorderkante, sind aber auch für andere in Frage kommende HLFC-Bereiche anwendbar.

Neben den aerodynamisch getriebenen Fragestellungen stehen vor allem folgende Aspekte im Mittelpunkt der Betrachtungen:

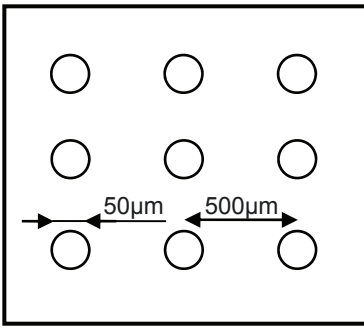
- Mikro-Perforation der Außenhaut
- Strukturkonzept und Vogelschlagschutz
- Realisierung der Absaugverteilung
- Verschmutzung, Vereisung, Erosion, Korrosion

Im vorliegenden Beitrag wird dabei im Wesentlichen auf die ersten drei der genannten Punkte eingegangen.

## 2. ANFORDERUNGEN UND RANDBEDINGUNGEN

### 2.1. Mikro-Perforation

Für eine gezielte Beeinflussung der Grenzschicht ist eine poröse Außenhaut erforderlich, welche einen Teil des Grenzschichtmaterials absaugt. Frühere Arbeiten zeigten, dass es besonders vorteilhaft ist, wenn diese Porosität mit einer gleichmäßigen Mikro-Perforation erzeugt wird. Die Lochdurchmesser sollten dabei so klein wie möglich gewählt werden. Ein Wert, der sich aus fertigungstechnischer Sicht als gerade noch sinnvoll realisierbar, und aus strömungstechnischer Sicht als wirkungsvoll heraus stellte, ist ein Lochdurchmesser von 50µm [2]. Daraus ergibt sich nach MacManus [3] ein Lochabstand von 500µm, was zu einer in BILD 1 skizzierten Mikro-Perforation führt.

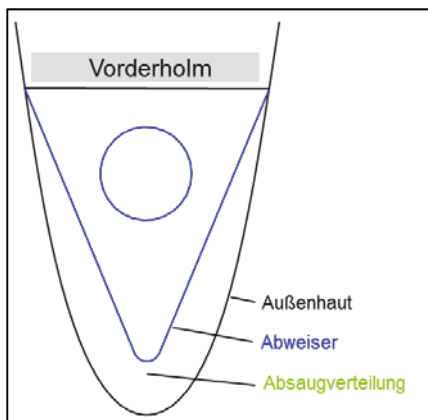


**BILD 1. Erforderliche Mikro-Perforation**

**2.2. Strukturkonzept**

Wie bereits beschrieben, befinden sich die für die HLFC-Technologie relevanten Bereiche im Bereich der Vorderkanten von Leitwerken und Tragflächen. Daher liegen sie stets im Gebiet von einschlag-gefährdeten Zonen. Besonderes Augenmerk ist dabei auf den Vogelschlag sowie wirksame Schutzmechanismen zu legen. Für Seitenleitwerke zum Beispiel ist gefordert, dass der Vorderholm keinesfalls durch auftreffende Impaktoren beeinträchtigt werden darf. Bei bisher üblichen, konventionellen Konstruktionen übernimmt die Außenhaut als Verkleidung diese Schutzrolle. Bei der Anwendung von HLFC muss diese Funktion jedoch in die Absaugnase integriert werden. Dies ist nicht nur durch die verringerte Festigkeit der mikro-perforierten Außenhaut problematisch, sondern besonders durch den Umstand, dass die Mikro-Perforation nicht in beliebig dickwandige Strukturen eingebracht werden kann.

Deshalb wird hier der Ansatz verfolgt, dass die Außenhaut lediglich für aerodynamische Funktionen verantwortlich ist, also zur Verkleidung und zur Absaugung. Der dahinterliegende Teil der Absaugnase, welcher nicht perforiert ist, erfüllt die strukturellen Aufgaben und wird hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Impacttoleranz ausgelegt. Durch diese Aufteilung der Funktionen können die gegensätzlichen Anforderungen erfüllt werden. Das verfolgte Strukturkonzept ist in BILD 2 schematisch im Querschnitt dargestellt.



**BILD 2. Strukturkonzept, Querschnitt**

Wie beschrieben, übernimmt die schwarz dargestellte Außenhaut die Funktion der aerodynamischen Verkleidung, während der blau dargestellte Abweiser strukturelle Aufgaben übernimmt. Dies beinhaltet das

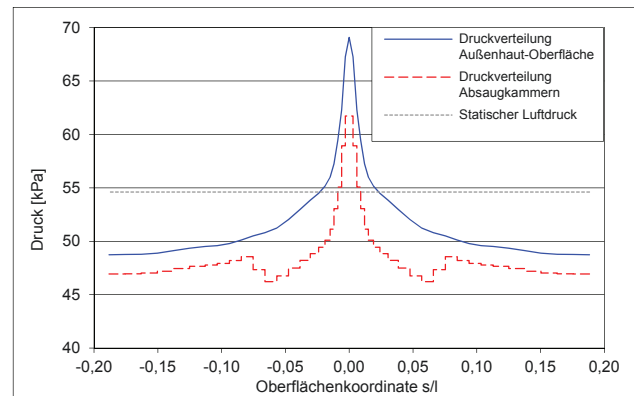
Einhalten der maximal tolerierbaren Verformungen während Flugmanövern, bei denen die Laminarhaltung funktionieren soll. Ebenso müssen jedoch auch alle anderen relevanten Lastfälle ertragen werden, allerdings ohne dass die HLFC-Technologie funktionieren muss. Eine weitere wichtige Aufgabe des Abweisers ist die Schutzfunktion für den dahinter liegenden Seitenleitwerks-Holm. Dieser darf keinesfalls durch zum Beispiel auftreffende Vögel in Mitleidenschaft gezogen werden. Der Abweiser soll die bei diesen Szenarien auftretende Energie ablenken oder großflächig in die übrige Struktur einleiten [4].

Zwischen der Außenhaut und dem Abweiser ist ein Teil des Absaugsystems positioniert, welches die im Folgenden näher dargestellte Absaugverteilung generiert.

Im Weiteren wird dieses Bauweisenkonzept verkürzt als BK-Konzept bezeichnet.

**2.3. Absaugverteilung**

Für die optimale Nutzung der Grenzschichtabsaugung ist eine spezielle Verteilung der Absaugmengen erforderlich, die im Wesentlichen von der Druckverteilung auf der Außenhaut abhängt. Weil die Mikro-Perforation gleichmäßig verteilt ist, wird die jeweilig benötigte Absaugmenge über die Druckdifferenz eingestellt. Es ist also erforderlich, dass auf der Rückseite der Außenhaut verschiedene, genau definierte Druckbereiche zur Verfügung gestellt werden.



**BILD 3. Druckverteilung Absaugnase**

In BILD 3 ist die errechnete Druckverteilung auf einem generischen Seitenleitwerk bei einer Geschwindigkeit von  $Ma = 0,78$  und einer Flughöhe von 16000ft sowie die notwendige Druckverteilung in den Absaugkammern, also auf der Rückseite der Außenhaut, dargestellt. Verantwortlich für die Absaugung ist die dazwischen liegende Druckdifferenz. Erzeugt wird die Druckverteilung durch einen unter allen Kammerdrücken liegenden globalen Druck, welcher zum Beispiel durch eine Pumpe erzeugt wird und mittels Drosseln auf den jeweiligen Kammerdruck nivelliert wird.

### 3. BAUWEISEN FÜR GRENZSCHICHTABSAUGUNG

#### 3.1. Bauweise mit Absaugkammerung

Eine Möglichkeit, die in Kapitel 2 genannten Anforderungen und Ansätze umzusetzen, ist das in BILD 4 schematisch dargestellte Bauweisenkonzept BK-MiOS (BK-Konzept, Monolithic Outer Skin).

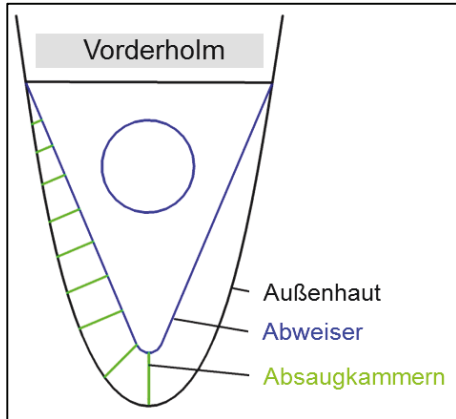


BILD 4. Bauweisenkonzept BK-MiOS

Die Außenhaut ist bei diesem Konzept mit stringer-ähnlichen Stegen mit dem Abweiser verbunden. Die Stege stellen dabei einerseits die strukturelle Verbindung zwischen Außenhaut und Stringer dar, bilden jedoch zugleich die Unterteilung für das Absaugkammersystem. Der innerhalb des Abweisers herrschende globale Unterdruck wird mittels Drosselöffnungen zwischen Abweiser und Absaugkammer zur Außenhaut weitergeleitet. Dabei sind die Drosselöffnungen so gewählt, dass in jeder Absaugkammer der in BILD 3 dargestellte Druck herrscht. Diese Variante der Absaugkammerung wurde bereits erfolgreich in Windkanal- und Flugversuchen getestet.

#### 3.2. Bauweise mit Tailoring-Außenhaut

Eine weitere mögliche Bauweisenkonzeption ist in BILD 5 zu erkennen. Ähnlich der in Kapitel 3.1 vorgestellten Bauweise, befindet sich im Inneren ein Abweiser, welcher die strukturellen Lasten aufnimmt. Als Außenhaut kommt ein Mehrlagen-Verbund zum Einsatz. Der Lagenaufbau des Verbundes ist dabei so gewählt, dass der Durchströmungswiderstand der erforderlichen Druckdifferenz in dem entsprechenden Bereich entspricht. Auf der Oberseite befindet sich eine, wie in BILD 1 dargestellte, mikro-perforierte Außenhaut. Durch die Kombination des Gewebeverbundes mit einer dünnwandigen, perforierten Außenhaut entsteht eine hybride Außenhaut. Mit einer derart maßgeschneiderten Außenhaut kann auf eine Absaugkammerung verzichtet werden. Lediglich der globale Absaugdruck, welche hinter der Außenhaut anliegt, ist erforderlich. Die sogenannte BK-THiOS Bauweise (BK-Konzept, Tailored Hybrid Outer Skin) bietet zudem den Vorteil, dass die Absaugverteilung nicht nur in Profiltiefenrichtung, sondern auch spannweitig frei konfigurierbar ist. Weiterhin sind auf Grund des hybriden Außenhautaufbaus kleinere Lochdurchmesser technisch herstellbar.

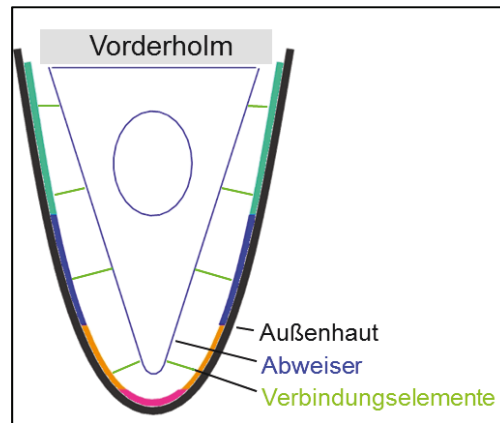


BILD 5. Bauweisenkonzept BK-THiOS

### 4. FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN FÜR HLFC-ABSAUGNASEN

#### 4.1. Technologien für Mikroperforation

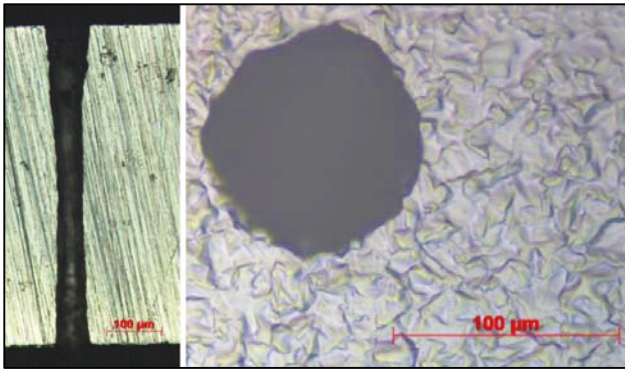
Folgende Fertigungstechnologien sind für die großflächige Erzeugung von Mikro-Perforationen besonders geeignet [5]:

- Laserstrahlbohren
- Elektronenstrahlbohren
- (Fein-)Ätzen

Während mit den Strahlverfahren hohe Aspektverhältnisse von bis zu 20:1 (das Aspektverhältnis gibt den Quotient aus Materialwandstärke zu erreichbarem Lochdurchmesser an) möglich sind, ist bei dem Feinätzen maximal der Wert 1 erreichbar. Die mikro-perforierte Folie hat also bei einem Lochdurchmesser von 50µm eine maximale Wandstärke von 50µm. Deshalb ist dieses Verfahren auf den hybriden Außenhautaufbau beschränkt.

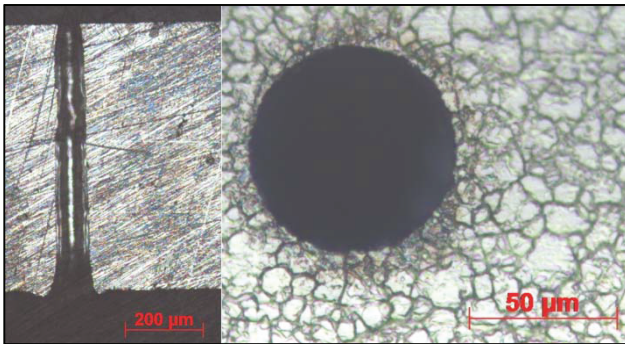
Neben dem Aspektverhältnis ist die Repetitionsrate ein wichtiger Parameter zum Beurteilen der Technologie. Mit den Strahlverfahren sind dabei Werte von bis zu 100Hz möglich, jedoch in Abhängigkeit von Wandstärke (große Wandstärke, geringe Repetitionsrate), Material (Titan langsamer als Stahl) und Qualität (hohe Qualitätsanforderung, geringe Repetitionsrate). Das Ätzen bietet den Vorteil, dass zeitgleich eine große Anzahl an Bohrungen ausgebildet wird.

In BILD 6 ist ein laser-gebohrtes Loch in Edelstahl mit einer Wandstärke von 0,6mm zu erkennen. Typisch für dieses Verfahren ist die Einschnürung im mittleren Bereich, welche aber unkritisch für die Grenzschichtabsaugung ist.



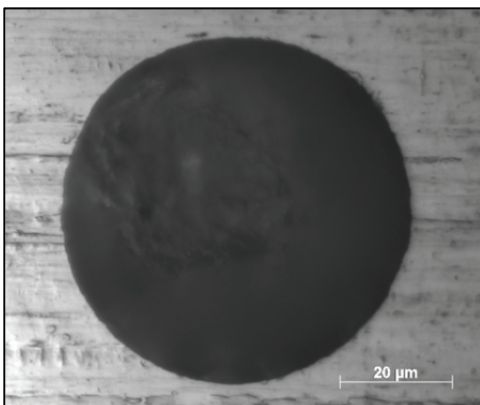
**BILD 6. Laser-Bohrung (li. Schliff, re. Draufsicht)**

In BILD 7 ist eine mittels Elektronenstrahl erzeugte Bohrung zu erkennen, ebenfalls in 0,6mm starkem Edelstahl. Im Gegensatz zum Laserbohren verläuft der Querschnitt gleichmäßig konisch und verjüngt sich kurz vor dem Strahlaustritt relativ stark. Die in der Abbildung gezeigte Form ist tolerierbar, jedoch sollte die Einschnürung nicht stärker ausfallen.



**BILD 7. Elektronenstrahl-Bohrung (li. Schliff, re. Draufsicht)**

In BILD 8 hingegen ist eine durch Ätzen hergestellte Mikroperforation zu erkennen. Charakteristisch sind die hohe Qualität der Bohrungen sowie die gratfreie Ausbildung.



**BILD 8. Feingeätzte Perforation in Edelstahlfolie**

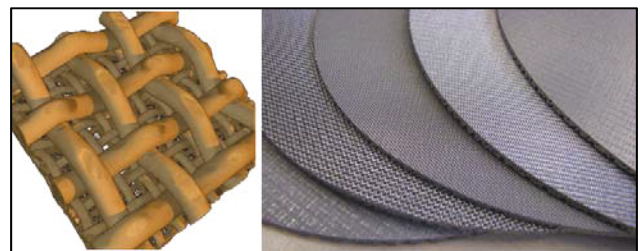
Alle gezeigten Verfahren sind somit für einen Einsatz an einer HLFC-Absaugnase geeignet. Jedoch ist zu beachten, dass keine Bearbeitungsmaschinen zur Perforation großformatiger Bleche, wie sie für die Ausrüstung eines Seitenleitwerks benötigt werden, unmittelbar zur Verfügung stehen. Neben der

maschinentechnischen Umsetzung sind weitere Untersuchungen zum fertigungsbedingten Wärmeeintrag und dem damit einhergehenden Verzug besonders bei den gezeigten Strahlverfahren notwendig.

#### 4.2. Technologien für hybride Außenhaut

Um das in BILD 5 gezeigte Bauweisen-Konzept umsetzen zu können, bedarf es einer hybriden, mehrlagig aufgebauten Außenhaut. Eine mögliche Materialkombination ist dabei ein mehrlagiges Metallgewebe und eine perforierte Metallfolie.

Das Metallgewebe kann dabei aus verschiedenen fein- und grobmaschigen Geweben bestehen, welche zusätzlich nachbearbeitet werden können (Kalandrieren, Walzen). Dadurch lassen sich die geforderten Durchströmungseigenschaften generieren. In BILD 9 sind exemplarisch einige generische Gewebeverbunde sowie eine räumlich dargestellte CT-Aufnahme zu erkennen.



**BILD 9. Gewebe-Verbund (li. CT-Aufnahme, re. Materialmuster)**

Ein mögliches Verbindungsverfahren der Gewebelagen untereinander und mit der Außenhaut ist das Diffusionsschweißen. In BILD 10 ist der Querschnitt einer solchen hybriden Außenhaut in einem Schliffbild zu erkennen. Die oberste Lage ist dabei eine mikroperforierte Folie, darunter befindet sich ein 3-lagiger Gewebe-Verbund. Ebenfalls gut zu erkennen ist die stoffschlüssige Verbindung der einzelnen Lagen, welche jedoch keinen Einfluss auf die Mikro-Perforation hat und somit ein gleichmäßiges Absaugen garantiert.



**BILD 10. Schliffbild hybride Außenhaut**

Zu beachten ist, dass der Lagenaufbau so gewählt wird, dass sich die Gewebestruktur nicht durch die dünnwandige Außenhaut abdrückt, da für die Laminarhaltung hohe Anforderungen an die Oberflächenebenheit gelten. Eine optische Vermessung einer solchen hybriden Außenhaut zeigte gute Ergebnisse, wie in BILD 11 zu sehen. Die Oberfläche weist dabei Welligkeiten von <math><20\mu\text{m}</math> auf.

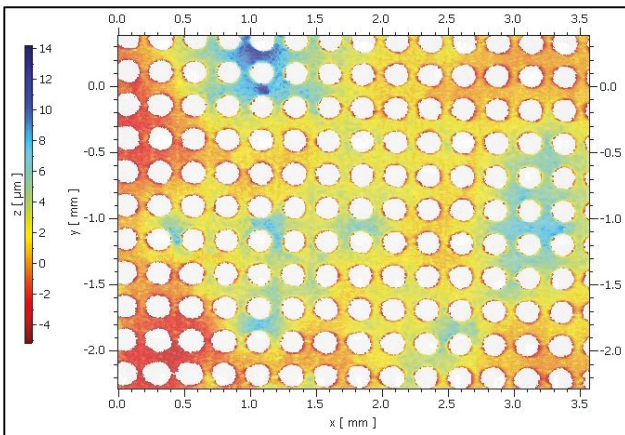


BILD 11. Oberflächenanalyse hybride Außenhaut

### 4.3. Technologien für Abweiser-Konzept

Die Fertigung der vorgestellten Bauweisen-Konzepte lässt sich in zwei wesentliche Abschnitte unterteilen. Zum einen in die Perforation der metallischen Außenhaut mit anschließendem Lagenaufbau und Umformung in die Vorderkanten-Kontur. Zum anderen in die Fertigung der Abweiser-Struktur mit dazugehöriger Verbindung zur Außenhaut. Um die zu Beginn erwähnten guten Impact-Eigenschaften zu erreichen, wurde endlosfaserverstärkter Thermoplast als Material für den Abweiser ausgewählt. Kohlefaserverstärktes PEEK scheint für dieses Bauteil besonders geeignet zu sein [4]. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Fertigung eines Demonstrators in BK-MiOS-Bauweise.

Der Abweiser als annähernd V-förmiges Bauteil soll dabei im Heißpress-Verfahren hergestellt werden (BILD 12). Die ebenfalls aus faserverstärktem Thermoplast bestehende Absaugkammer-Struktur hingegen mit Vakuumkonsolidierung. Der schematische Aufbau für die Vakuumkonsolidierung ist in BILD 13 zu erkennen. Das thermoplastische Prepreg wird dabei unter Vakuum erhitzt und konsolidiert somit bei Abkühlung zu einem fest verpressten Laminat.

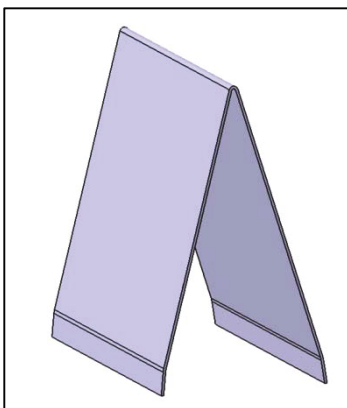


BILD 12. Abweiser CAD-Modell

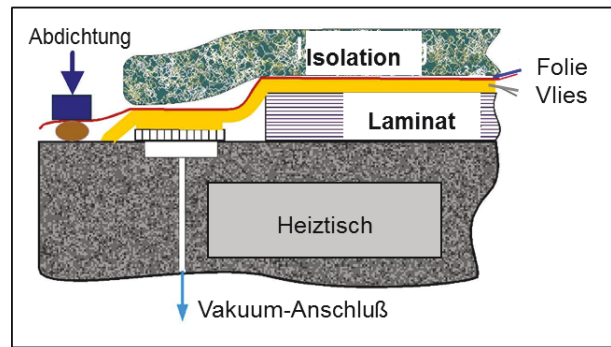


BILD 13. Vakuum-Konsolidierung

Zur Herstellung der Absaugkammerung werden U-förmige Preformen hergestellt und mit Hilfe von Einlege-Kernen zur halbseitigen Absaugkammerung konsolidiert, wie in BILD 14 schematisch dargestellt.

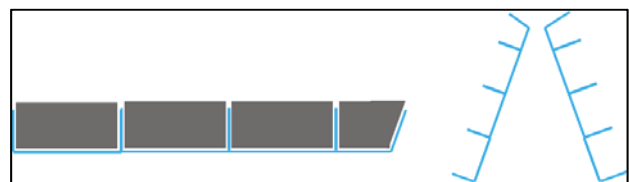


BILD 14. Fertigungskonzept Absaugkammerung

Die konsolidierten bzw. gepressten Einzelteile, also Abweiser und Absaugkammerung werden anschließend in einem weiteren Konsolidierungsprozess miteinander gefügt (BILD 15).

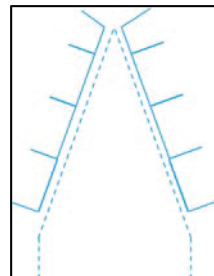
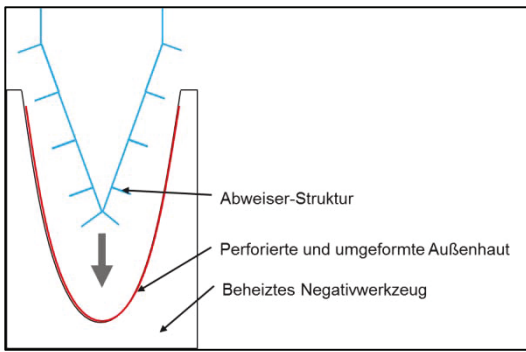


BILD 15. Fügung Abweiser-Kammerung

Im letzten Arbeitsschritt wird die vorgefertigte, thermoplastische Abweiser-Struktur mit der umgeformten metallischen Außenhaut im Direktfügen miteinander verbunden, wie in BILD 16 schematisch dargestellt. Dabei befindet sich die Außenhaut in einem beheizten Negativwerkzeug, in das die Abweiser-Struktur eingetaucht wird. An den Berührungspunkten schmilzt die thermoplastische Matrix auf und verbindet sich während des Abkühlens fest mit der Außenhaut.



**BILD 16. Fügung Abweiser-Struktur/Außenhaut**

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Die HLFC-Technologie stellt vielfältige aerodynamische, strukturelle sowie technologische Anforderungen, die miteinander kombiniert werden müssen. Gerade in dieser Kombination ist der Grund, weshalb sich die Hybride Laminarhaltung noch nicht durchsetzen konnte, zu suchen. Mit Hilfe moderner Verfahren ist es jedoch möglich, die notwendige großflächige Mikro-Perforation in Metallbleche einzubringen. Besonders geeignet dafür sind das Laser- und das Elektronenstrahlbohren sowie das Feinätzen.

Mit den gezeigten Bauweisen-Konzepten können wesentliche Verbesserungen zu bisher bekannten Bauweisen erreicht werden. Besonders hervorzuheben ist dabei die Integration eines Vogelschlag-Schutzes für den Leitwerks-Holm und die neuartige hybride Außenhaut. Damit ergeben sich neue Möglichkeiten bei der Umsetzung der Absaugverteilung.

In Fertigungsversuchen konnten die grundlegende Machbarkeit aller Fertigungsschritte nachgewiesen werden.

Weitere Schritte sind die Fertigung eines kompletten Absaugnasen-Demonstrators einschließlich dessen Vermessung. Weiterhin sind Simulationen und reale Versuche zum Verhalten bei Impact-Belastungen, wie zum Beispiel Vogelschlag, geplant. Außerdem muss die hybride Außenhaut hinsichtlich Erosion, Kontamination und Vereisung untersucht werden.

- [1] Horstmann, K.H.: Flight Testing of Anti-Icing and Anti-Contamination Systems on the DLR Do228 Test Vehicle, CEAS 2003 Conference, London (UK), 2003
- [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] 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
- [5] M. Horn: Neue Aussenhautbauweisen zur Grenzschichtabsaugung bei Hybrider Laminarhaltung, DGLR-Kongress, Bremen, 2011