

ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG NEUARTIGER ABSAUGOBERFLÄCHEN ZUR LAMINARHALTUNG DER GRENZSCHICHT

R. v. Soldenhoff*, H. Lüdeke*

* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Lilienthalplatz 7,
38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Für die vorliegenden Studien werden hochauflösende numerische Berechnungen verschiedener Geometrien von Absaugoberflächen durchgeführt. Unter anderem wird das Wachstum von Tollmien-Schlichting-Wellen über porösen Absaugoberflächen mit darunterliegender Kammer mit zweidimensionalen direkten numerischen Simulationen untersucht. Dabei zeigt sich, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Wachstumsrate und der akustischen Impedanz der Oberfläche besteht. Weiterhin werden dreidimensionale, stationäre Simulationen des Strömungsfelds um einzelne Absaugöffnungen betrachtet, um deren Einfluss auf die laminare Grenzschicht zu untersuchen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird der Entwurf von zwei Geometrien geschlitzter Absaugoberflächen abgeleitet. Diese werden neben anderen Absaugoberflächen experimentell im Windkanal untersucht.

Keywords

HLFC; TSSD; geschlitzte Absaugoberflächen; Absaugung, DNS

NOMENKLATUR

Formelzeichen

		x, y, z		Koordinaten in Strömungsrichtung, wandnormaler und spannweitisger Richtung	m
		Z		akustische Impedanz	$\text{kg/m}^2\text{s}$
A	Amplitude der TS-Wellen	-	ω	Winkelgeschwindigkeit	Hz
a	Schallgeschwindigkeit	m/s	Indizes		
b	Poren- bzw. Schlitzabstand	m	e	Grenzschichtrand	
c_Q	Volumenstrombeiwert	-	exit	Auslass der Absaugöffnung	
D	Porendurchmesser bzw. Schlitzbreite	m	GS	Grenzschicht	
δ_1	Verdrängungsdicke	m	∞	ungestörte Anströmung	
f	Frequenz	Hz	W	Wand	
H_{12}	Formfaktor	-	Abkürzungen		
K	Kammertiefe	m	DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	
L	Porentiefe bzw. Blechdicke	m	DNS	Direkte Numerische Simulation	
λ	Wellenlänge	m	DNW-NWB	Niedergeschwindigkeits-Windkanal Braunschweig der Deutsch-Niederländischen Windkanäle	
Ma	Machzahl	-	HLFC	Hybrid Laminar Flow Control	
ν	kinematische Viskosität	m^2/s	LST	Lineare Stabilitätstheorie	
p	Druck	Pa	RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes	
Re	Reynoldszahl	-	TSSD	Tailored Skin Single Duct	
σ	Porosität	-	TS	Tollmien-Schlichting	
u, v, w	Geschwindigkeiten in x -, y - und z -Richtung	m/s			

1. EINLEITUNG

Im Zuge der Bestrebungen zur Widerstandsreduktion bei Verkehrsflugzeugen werden geeignete Oberflächen zur Grenzschichtabsaugung für die hybride laminare Strömungskontrolle (HLFC) entwickelt. Diese erfordern günstige Eigenschaften in Bezug auf Absaugcharakteristik, Fertigung, Betrieb und Wartung [1]. Am DLR werden verschiedene Absaugoberflächen experimentell sowie numerisch untersucht. Im Gegensatz zu dem verbreiteten Ansatz, zylindrische Poren für die Perforation zu nutzen, werden in neueren Entwicklungen auch geschlitzte Absaugoberflächen betrachtet. Bereits 1961 haben erfolgreiche Flugversuche mit geschlitzten Oberflächen stattgefunden, bei denen die Grenzschicht bis zur Hinterkante laminar gehalten werden konnte [2]. Das dort verwendete Fertigungsprinzip erwies sich jedoch als unpraktikabel für eine Serienfertigung. Es folgten verschiedene Flugexperimente mit mikroperforierten, lasergebohrten Oberflächen mit einem System von darunterliegenden Kammern [1].

Eine neue Entwicklung des DLR sind die sogenannten TSSD-Oberflächen (Tailored Skin Single Duct). Diese bestehen aus einer geätzten perforierten Folie mit einer Dicke von $50\ \mu\text{m}$, darunter liegt ein mehrlagiges Drahtgewebe, welches den Druckverlust über die Oberfläche zu einem großen Teil bestimmt (vgl. Abb. 1). Vorteil des Konzepts ist, dass eine variable Absaugverteilung über eine Variabilität der Maschenweite des Drahtgewebes erreicht wird, sodass auf eine Unterteilung in mehrere Kammern verzichtet werden kann. Außerdem kann die Oberfläche abnehmbar gestaltet werden, was einen leichten Austausch bei Beschädigungen erlaubt [3].

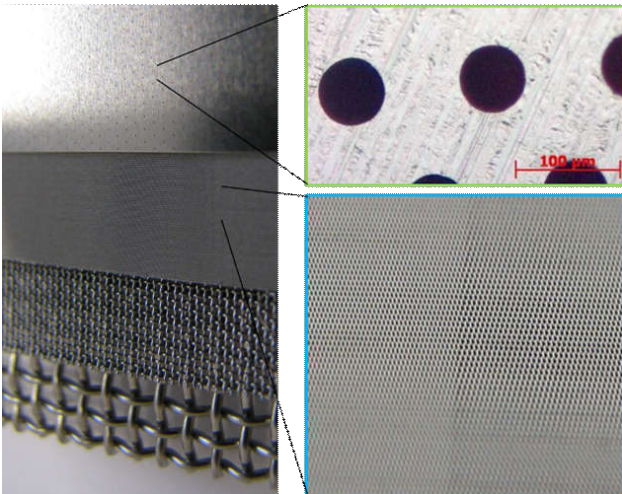


BILD 1. Aufbau der TSSD-Oberfläche, aus [3]

Durch jede Absaugöffnung einer beliebigen Absaugoberfläche wird eine dreidimensionale Störung in die Grenzschicht eingebracht, sodass diese von einer idealen ebenen Grenzschicht abweicht. Dieser Effekt kann dazu führen, dass die Transition weiter stromauf erfolgt als mit Methoden der Linearen Stabilitätstheorie (LST) vorhergesagt. Den Grenzfall hiervon stellt die Überabsaugung dar, bei dem eine weitere Erhöhung der Absaugrate zu einer Verschiebung der Transition stromauf führt (vgl. [1]). Nun

lässt sich die Hypothese aufstellen, dass spannweitig ausgedehnte Schlitze mit gleicher Öffnungsfläche insgesamt zu einer schwächeren Störung der Grenzschicht führen, weil weniger einzelne Öffnungen benötigt werden. Da eine geschlitzte Oberfläche mit der TSSD-Struktur auf einfache Weise realisiert werden kann, wird dieser Ansatz hier weiter verfolgt. Zur Auslegung dieser geschlitzten Absaugoberflächen werden Direkte Numerische Simulationen (DNS) sowie stationäre RANS-Simulationen (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) herangezogen. Die Oberflächen werden abschließend im Windkanal getestet und auf ihre Wirksamkeit hin untersucht sowie mit anderen Ansätzen verglichen.

2. HOCHAUFLÖSENDE NUMERISCHE SIMULATIONEN

Alle Simulationen werden mit dem blockstrukturierten DLR-Code *FLOWer* durchgeführt. Dieser eignet sich unter anderem zur Simulation von Tollmien-Schlichting-Wellen [4]. Für zeitauf lösende Rechnungen findet ein Verfahren vierter Ordnung nach Enk [5] Verwendung. Die Anströmbedingungen werden entsprechend der in Abschnitt 3 beschriebenen Windkanalversuche gewählt. Dabei beträgt die Anströmgeschwindigkeit $u_\infty = 60\ \text{m/s}$ und die Verdrängungsdicke $\delta_1 = 0,7028\ \text{mm}$.

2.1. Zweidimensionale DNS

Die zweidimensionalen Simulationen beinhalten ein Gebiet, welches die Grenzschicht, eine geschlitzte Wand der Dicke L sowie die Absaugkammer umfasst. Die Ausdehnung in Strömungsrichtung beträgt eine Wellenlänge der TS-Wellen λ . Die Netztopologie ist in Abb. 2 gezeigt.

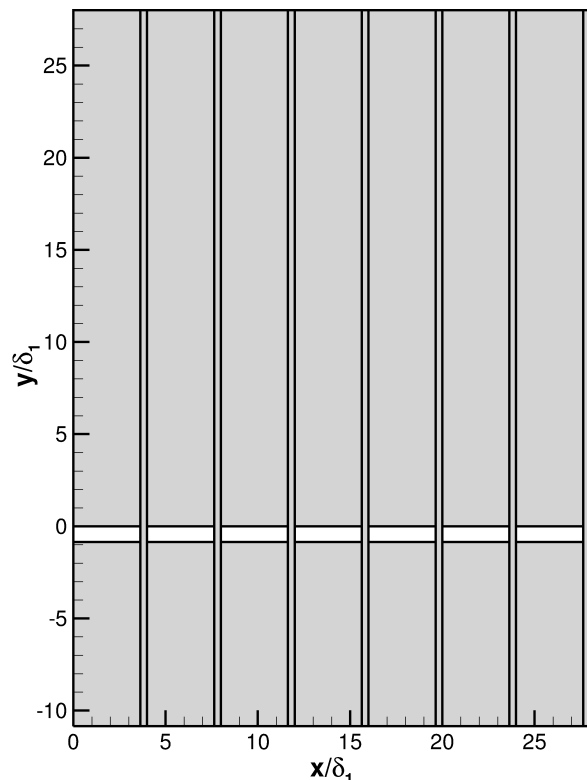


BILD 2. Beispielhafte Netztopologie der 2D-Simulationen

Die Anzahl der Netzblöcke beträgt das Dreifache der Schlitzanzahl. Es werden Simulationen mit 4, 7, 14 und 28 Schlitzen pro Wellenlänge durchgeführt. Auch variieren Blechdicke L , Schlitzbreite D und Kammertiefe K . Durch die Variation von Schlitzanzahl und -breite ergeben sich unterschiedliche Porositäten.

An allen Oberflächen wird eine Wandrandbedingung verwendet. In der Absaugkammer ist eine Druckrandbedingung vorgegeben, die hier gezeigten Ergebnisse gelten für $p_{exit} = p_{\infty}$. Es wird folglich das Verhalten ohne Absaugströmung betrachtet. Auch wird eine Wandrandbedingung am unteren Rand der Kammer betrachtet. In diesem Fall zeigten sich im Verhalten nahezu keine Unterschiede zur Druckrandbedingung. Am oberen Rand des Rechengebiets eine Fernfeldrandbedingung vorgegeben. Ein- und Ausströmrand sind mit einer Periodizitätsrandbedingung versehen, was zu einer rein zeitlichen Entwicklung der TS-Wellen führt. Die TS-Wellen werden als Anfangsbedingung der Grundströmung überlagert, das mittlere Grenzschichtprofil wird mithilfe von Quelltermen fixiert, sodass es nicht räumlich aufdickt. Es werden drei verschiedene Grenzschichtprofile sowie drei verschiedene Wellenlängen betrachtet.

In Abb. 3 ist die wandnormale Störgeschwindigkeit sowie der Verlauf der Isobaren zu sehen. Oberhalb der Wand zeigt sich die typische Form von Tollmien-Schlichting-Wellen, innerhalb der Kammer liegt eine gegenüber den TS-Wellen phasenverschobene Störung vor. Dies ähnelt stark den numerischen LST-Untersuchungen von Tilton in [6].

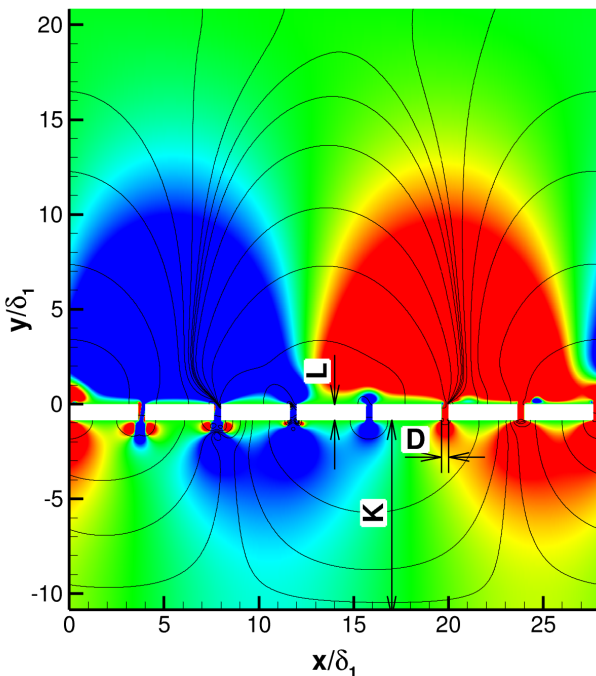


BILD 3. v -Komponente und Isobaren der Störströmung über einer geschlitzten Oberfläche

Die Amplituden der Störströmung werden jeweils in der Grenzschicht und in der Absaugkammer mithilfe eines Fortran-Tools bestimmt. Dies lässt Aufschluss über die absoluten Wachstumsraten sowie die Stärke der Interaktion zwischen Grenzschicht und Absaugkammer bei ver-

schiedenen Schlitzgeometrien zu. In Abb. 4 sind die Amplituden der TS-Wellen für verschiedene Geometrien über der Zeit aufgetragen. Ebenfalls findet sich dort eine Variation der Kammertiefe sowie als Referenz das Amplitudenwachstum über einer geschlossenen Oberfläche.

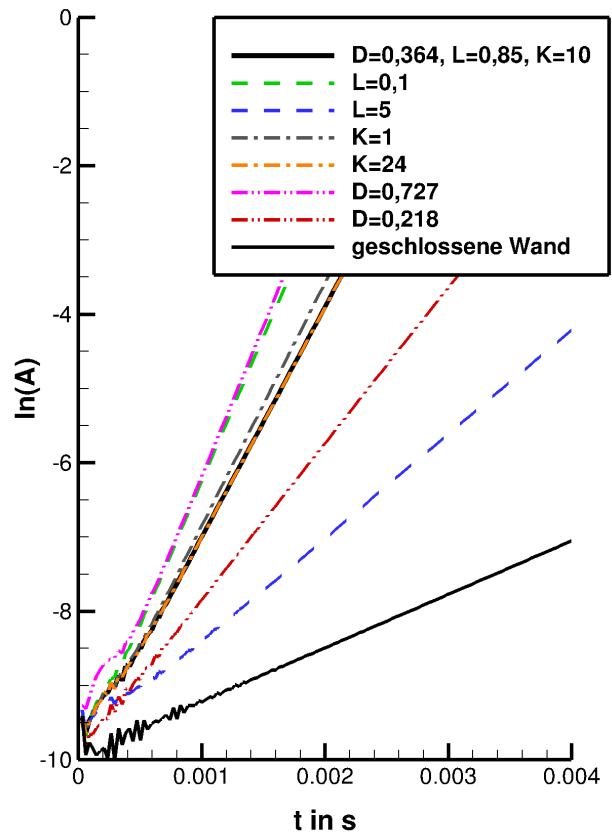


BILD 4. Wachstum der Amplituden der TS-Wellen für verschiedene Schlitz- und Kammerabmessungen

Es ist deutlich erkennbar, dass alle geschlitzten Oberflächen gegenüber der geschlossenen Oberfläche zu einem erhöhten Wachstum führen. Dabei führen folgende Kriterien zu stärkerem Wachstum:

- breitere Schlitz
- geringere Blechdicke
- flachere Kammer

Zu erwähnen ist, dass die Erhöhung der Kammertiefe von $10 \delta_1$ auf $24 \delta_1$ keinen nennenswerten Einfluss hat. Daher werden alle folgenden Betrachtungen bei $K = 10 \delta_1$ angestellt, die Kammer kann dann als unendlich tief angesehen werden.

Es findet sich ein Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von Grenzschicht- zu Kammeramplitude, welches ein Maß für die Stärke der Interaktion zwischen Grenzschicht und Kammer ist. Dieser ist in Abb. 5 dargestellt.

Zu erkennen ist, dass ein gleiches Maß an Interaktion unabhängig von der Geometrie zur gleichen Wachstumsrate führt. Dies legt die Vermutung nahe, dass eine Größe existiert, welche aus den Abmessungen der Schlitze berechnet werden kann und welche mit der Stärke der Interaktion korreliert.

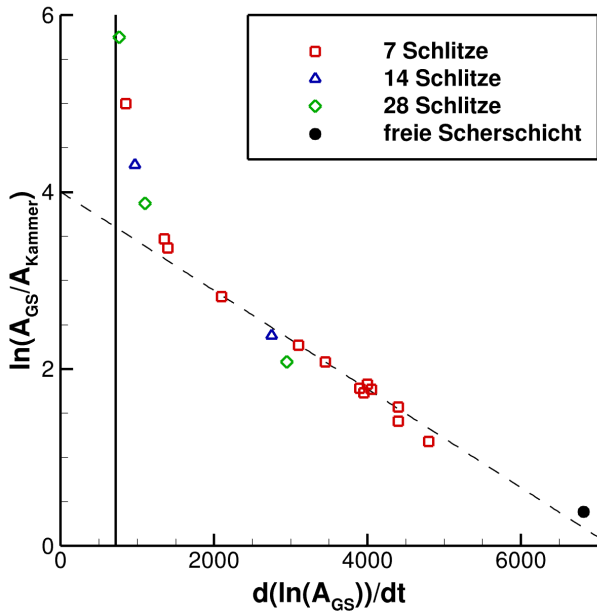


BILD 5. Zusammenhang von Stärke der Interaktion mit Wachstumsrate

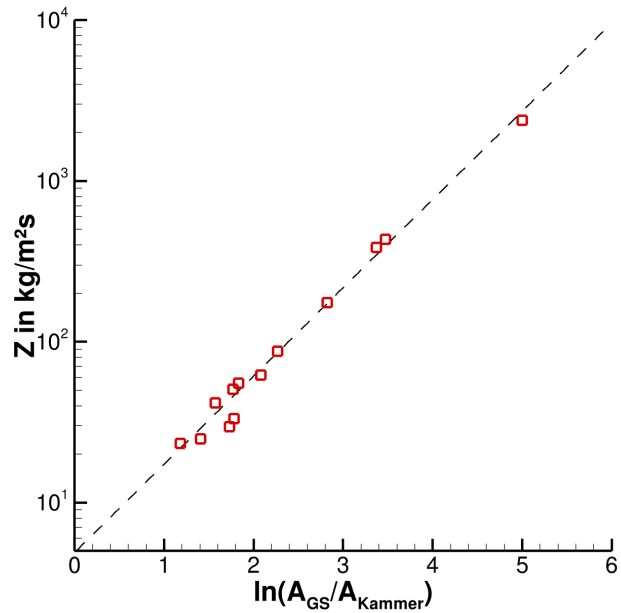


BILD 6. Zusammenhang von Stärke der Interaktion mit akustischer Impedanz der Oberfläche

Die akustische Impedanz Z ist nach [7] für eine geschlitzte Oberfläche

$$Z = \frac{\partial p}{\partial v} = j\omega\rho_\infty \frac{L}{\sigma} \left(1 - \frac{\tanh(D\sqrt{\omega/4\nu\sqrt{j}})}{D\sqrt{\omega/4\nu\sqrt{j}}} \right)^{-1}$$

Sie gibt das Verhältnis von Schalldruck ∂p zu Schallschnelle ∂v an und kann als instationärer Strömungswiderstand der Oberfläche aufgefasst werden. Mündungseffekte lassen sich berücksichtigen, indem ein Korrekturfaktor für die Schlittiefe aufgeschlagen wird. Trägt man Impedanz und Interaktionsstärke gegeneinander auf, lässt sich erneut ein klarer Zusammenhang erkennen (Abb. 6). Damit ist die Impedanz geeignet, um von der Geometrie der Schlitze auf die Wachstumsrate der TS-Wellen zu schließen. Dieser Zusammenhang konnte für alle drei untersuchten Grenzschichtprofile und Wellenlängen bestätigt werden.

Mit zunehmender Impedanz sinkt die Zusatzanfachung der TS-Wellen, die Wachstumsrate nähert sich der über der geschlossenen Oberfläche an. Daher ist es für reale Absaugoberflächen wünschenswert, eine hohe Impedanz aufzuweisen, um ein stärkeres Wachstum der TS-Wellen zu verhindern. Impedanzmessungen der ONERA mit TSSD-Oberflächen haben für Frequenzen, welche bei den HLFC-Versuchen im DNW-NWB auftreten, eine Impedanz in der Größenordnung von $1000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ergeben. Bei diesem Wert ist eine deutliche Zusatzanfachung der TS-Wellen festzustellen.

Für den Entwurf neuer geschlitzter Oberflächen bedeuten die Ergebnisse, dass eine geringe Porosität mit möglichst schmalen Schlitzen anzustreben ist, da diese nach Gl. 2.1 die größtmögliche Impedanz zur Folge hat. Auch eine große Blechdicke ist in diesem Punkt von Vorteil, ist jedoch für TSSD-Oberflächen aufgrund des Ätzverfahrens nicht zu realisieren. Dort leistet allerdings die Unterstruk-

tur aus Drahtgewebelagen einen wesentlichen Beitrag zur Impedanz, der nicht mit den hier zur Verfügung stehenden Formeln abgeschätzt werden kann.

Um die Oberflächen, welche im DNW-NWB getestet werden sollen, mit bestehenden Oberflächen vergleichen zu können, wird die Porosität auf 0,785 % festgelegt. Die Schlitzbreite wird durch die Möglichkeiten bei der Fertigung nach unten begrenzt. Daher wird eine Schlitzbreite von $60 \mu\text{m}$ gewählt.

Anders als in bisherigen Arbeiten wurde durch DNS die vollständig aufgelöste Strömungsinteraktion durch diskrete Schlitze berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen ein übereinstimmendes Verhalten mit Untersuchungen der ONERA. Das Vorhandensein einer Zusatzanfachung durch poröse Oberflächen, welches nicht mit der Oberflächenrauigkeit in Verbindung steht, wurde von Methel et al. in Experimenten beobachtet [8]. Davon abgeleitet wurde eine Modifikation eines LST-Verfahrens, welches eine Impedanzrandbedingung verwendet und in der Lage ist, die Transitionsposition unter Berücksichtigung der Porositätseigenschaften der Oberfläche vorherzusagen [9]. Solche LST-Ansätze lassen sich mit den gezeigten Simulationen aufgelöster Poren gut validieren.

2.2. Dreidimensionale RANS-Simulationen

Das Rechengebiet der stationären dreidimensionalen Simulationen umfasst einen Ausschnitt der diskret geschlitzten Oberfläche mit darüberliegender Grenzschicht, wie in Abb. 7 gezeigt. Dieser ist so gewählt, dass in spannweitere Richtung je nach Geometrie der Schlitze eine Periodizitäts- oder Symmetrierandbedingung verwendet werden kann. Am Einströmrand wird ein Grenzschichtprofil vorgegeben, welches bereits für die zweidimensionalen Simulationen zum Einsatz kam. Im Gegensatz zu diesen wird das Grenzschichtprofil nicht mit Quelltermen fixiert, sodass es sich in Strömungsrich-

tung entwickelt. Am unteren Rand der Schlitzte wird der Ausströmdruck p_{exit} vorgegeben. Auf diese Weise lässt sich eine Absaugströmung realisieren.

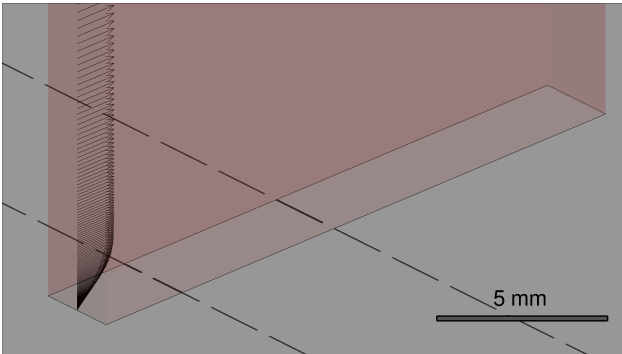
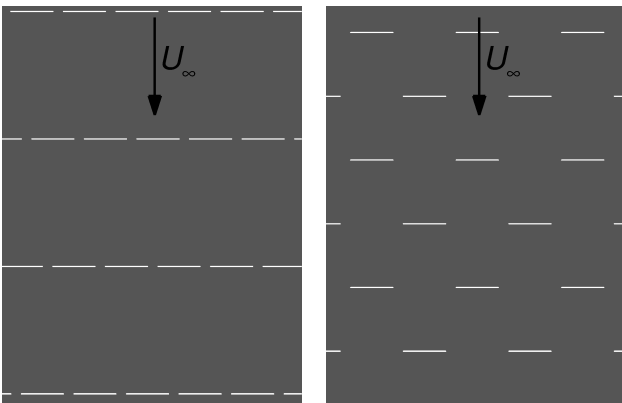


BILD 7. Rechengebiet für 3D-Simulationen

Aus fertigungstechnischen Gründen ist es nicht möglich, spannweitig unendlich lange Schlitzte wie in [2] zu realisieren. Es werden stattdessen zwei geometrische Ansätze bezüglich der Schlitzanordnung verfolgt. Diese sind in Abb. 8 gegenübergestellt und im Folgenden als „versetzte“ und „überlappende“ Anordnung bezeichnet. Dabei sind die Schlitzte jeweils in spannweitig ausgedehnten Reihen angeordnet. Im Falle der überlappenden Anordnung liegen zwei Schlitzreihen im Rechengebiet (vgl. Abb. 8), für die versetzte Anordnung sind es vier Reihen. Die spannweite Ausdehnung eines Schlitzes beträgt 2 mm. Der spannweite Abstand zweier benachbarter Schlitzte beträgt 0,5 mm für die überlappende und 3 mm für die versetzte Anordnung. Für Porosität und Schlitzbreite werden die bereits oben erwähnten Werte von $\sigma = 0,785\%$ und $D = 60\ \mu\text{m}$ verwendet. So ergeben sich Abstände der Reihen in Strömungsrichtung von etwa 6 mm bzw. 3 mm.



(a) „überlappende“ Anordnung

(b) „versetzte“ Anordnung

BILD 8. Vergleich beider untersuchter Schlitzanordnungen

Zunächst wird die Druckverlustcharakteristik untersucht. Dafür wird der Druck p_{exit} variiert, sodass die Druckdifferenz über den Schlitz für jeden Fall im Bereich von $0 \dots 0,01 p_\infty$ liegt. So stellt sich ein bestimmter Absaugvolumenstrom ein. Dieser wird hier als Volumenstrombeiwert angegeben, welcher wie folgt definiert ist:

$$c_Q = \frac{v_W}{u_\infty}$$

In Abb. 9 ist der Druckverlust über der Absaugrate für beide untersuchten geschlitzten Geometrien aufgetragen. In beiden Fällen ergibt sich ein sehr ähnlicher Verlauf, was aufgrund der gleichen Porosität und Schlitzabmessungen zu erwarten ist. Im Falle der überlappenden Anordnung ist eine etwa vier Prozent größere Druckdifferenz nötig als bei der versetzten Anordnung, um den gleichen Volumenstrom zu erreichen. Diese geringe Abweichung kann ihre Ursache in der Tatsache haben, dass die Schlitzreihen für beide Fälle nicht an den gleichen x -Positionen liegen (vgl. Abb. 8).

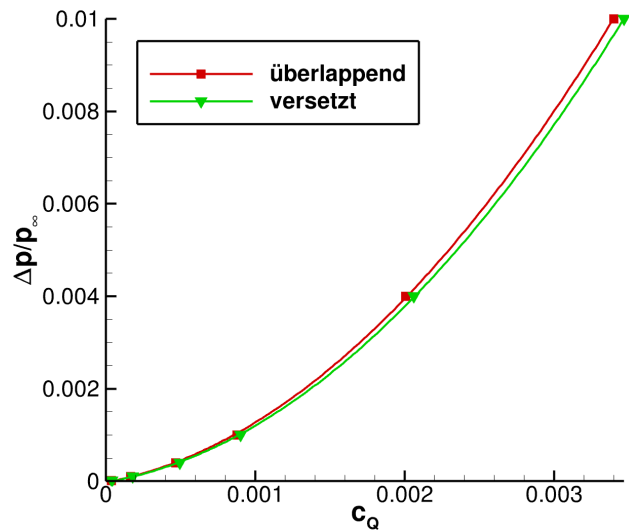


BILD 9. Druckverlust über Absaugöffnung in Abhängigkeit von c_Q

Anzumerken ist, dass auch Absaugraten weit über realistischen Werten von c_Q für HLFC-Anwendungen betrachtet werden. Es zeigt sich mit guter Genauigkeit ein quadratischer Zusammenhang zwischen c_Q und Δp . Unter Vernachlässigung der Ein- und Ausströmeffekte hingegen gilt analog zu dem Gesetz von Hagen-Poiseuille:

$$\Delta p = \bar{u} \cdot \frac{12\eta L}{D^2}$$

Die Abweichung von diesem linearen Zusammenhang kann mit den Ein- und Ausströmeffekten erklärt werden und wurde in [10] bereits in ähnlicher Weise für zylindrische Absaugbohrungen beobachtet. Im vorliegenden Fall ist der Effekt jedoch deutlich stärker ausgeprägt, da die Tiefe der Schlitzte mit $50\ \mu\text{m}$ sehr gering ist, sodass Mündungseffekte einen stärkeren Einfluss auf den Druckverlust haben.

Abb. 10 zeigt die Veränderung des Grenzschichtprofils hinter dem Bereich der Absaugung für alle untersuchten Volumenstrombeiwerte. Deutlich erkennbar ist, dass das Grenzschichtprofil mit zunehmender Absaugrate fülliger wird, die Grenzschichtdicke nimmt leicht ab. Beides hat nach der Linearen Stabilitätstheorie einen stabilisierenden Einfluss im Bezug auf Tollmien-Schlichting-Wellen. Für die detailliertere Betrachtung der Beeinflussung der Grenzschicht werden die Fälle mit $\Delta p = 0,0004 p_\infty$ be-

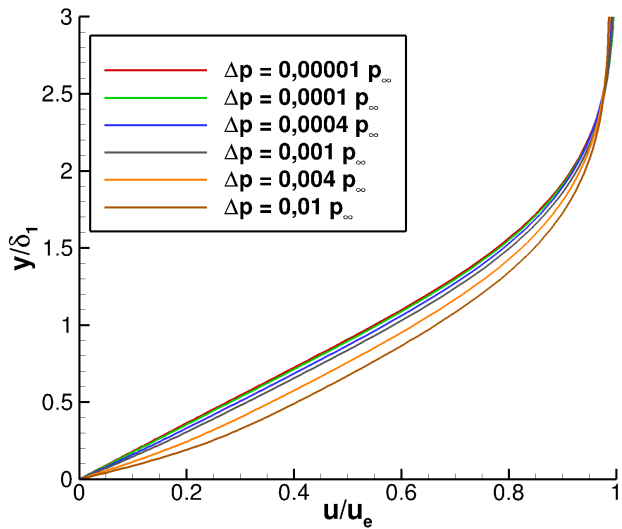


BILD 10. Grenzschichtprofile bei Variation des Absaugdrucks ($x = 25 \delta_1$), $\delta_1 = 0,7028 \text{ mm}$

trachtet, da diese mit $c_Q \approx 5 \cdot 10^{-4}$ bezogen auf reale HLFC-Anwendungen zu einer starken Absaugung führen. In diesem Bereich wird bereits mit einer deutlichen Beeinflussung durch dreidimensionale Störungen gerechnet. Um die stabilisierende Wirkung der Absaugung durch beide Schlitzgeometrien generell beurteilen und vergleichen zu können, werden die in spannweitung Richtung gemittelten Grenzschichtprofile stromab der Schlitzreife verglichen (Abb. 11).

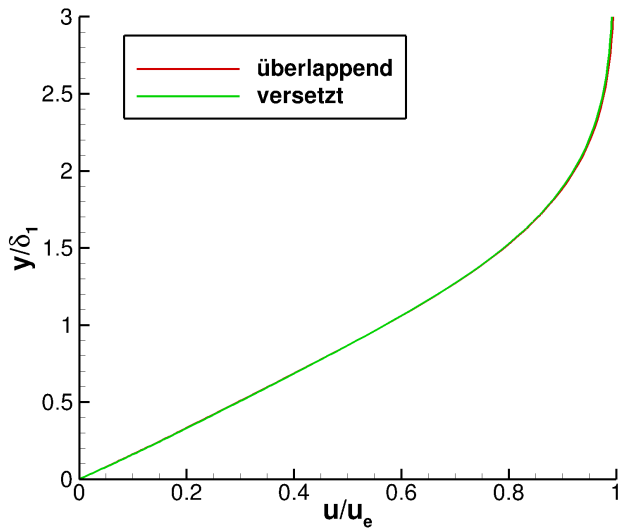


BILD 11. Vergleich der gemittelten Grenzschichtprofile in einiger Entfernung hinter den Schlitzreife ($x = 25 \delta_1$)

Einige Verdrängungsdicken stromab der hintersten Schlitzreihe, kurz vor dem Ausströmrand des Rechengebiets, zeigen sich nahezu keine Unterschiede im mittleren Geschwindigkeitsprofil. Daraus lässt sich schließen, dass beide Absaugoberflächen eine vergleichbare Wirksamkeit haben, sofern dreidimensionale Störungen nicht berücksichtigt werden. Etwaige Unterschiede in der Transitionslage sind also auf diese dreidimensionalen Effekte zurückzuführen.

Betrachtet man die Geschwindigkeitskomponenten der beeinflussten Grenzschicht normal zur Strömungsrichtung (Abb. 12 und 13), so lässt sich beobachten, dass die versetzte Schlitzanordnung zu deutlich größeren spannweiten Geschwindigkeiten führt als die überlappende. Ebenfalls lassen sich Längswirbel erkennen, welche Parallelen zu den in [11] diskutierten Wirbeln für zylindrische Absaugbohrungen aufweisen. Diese sind im Falle von versetzten Schlitzreihen deutlich stärker ausgeprägt, sodass die Vermutung aufgestellt werden kann, dass die überlappende Schlitzanordnung aufgrund der schwächeren dreidimensionalen Störung besser zur Stabilisierung der Grenzschicht geeignet ist.

Da aufgrund des Rechenaufwands keine Tollmien-Schlichting-Wellen in den dreidimensionalen Simulationen untersucht werden können, ist eine direkte Aussage über die Beeinflussung durch die dreidimensionalen Störungen des Strömungsfelds nicht im Voraus möglich. Aufschluss hierüber können experimentelle Untersuchungen wie die im Folgenden beschriebenen Windkanalversuche geben.

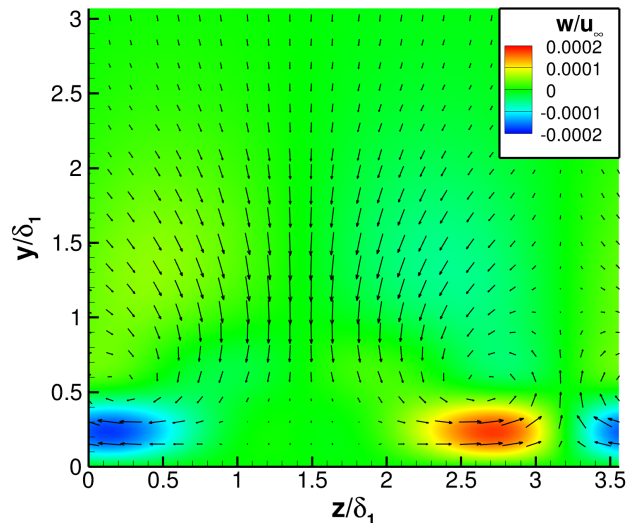


BILD 12. Grenzschicht normal zur Strömungsrichtung; überlappende Schlitzanordnung

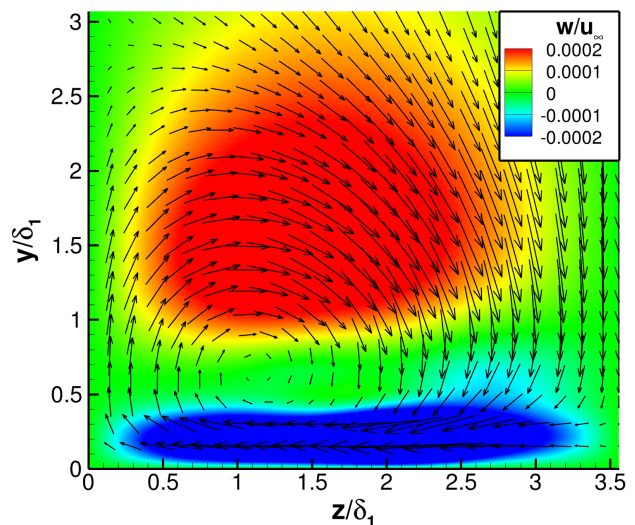


BILD 13. Grenzschicht normal zur Strömungsrichtung; versetzte Schlitzanordnung

3. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Bereits in den Jahren 2019 und 2021 wurden im DNW-NWB (Niedergeschwindigkeits-Windkanal Braunschweig der Deutsch-Niederländischen Windkanäle) Absaugexperimente an einem modularen Modell einer ebenen Platte mit verschiedenen Absaugoberflächen durchgeführt. Nun sollen die neu entwickelten geschlitzten TSSD-Oberflächen ebenfalls dort untersucht und mit bisherigen Oberflächen verglichen werden.

3.1. Beschreibung der bisherigen Windkanalexperimente

Die vollständige Auswertung der Versuche von 2019 ist in [12] zu finden, die Auswertung aus dem Jahr 2021 findet derzeit statt. Einige Ergebnisse sind jedoch bereits verwendbar [13].

Der DNW-NWB ist ein Windkanal Göttinger Bauart, der wahlweise mit geschlossener oder offener Messstrecke betrieben werden kann. Für die hier beschriebenen Versuche kommt die geschlossene Messstrecke zum Einsatz. Diese hat eine Breite von 3,25 m, eine Höhe von 2,8 m und eine Länge von 8 m. Dabei sind Anströmgeschwindigkeiten bis 90 m/s möglich, jedoch werden für die betrachteten Versuche nur Geschwindigkeiten bis 60 m/s benötigt.

Das modulare Windkanalmodell ist eine ebene Platte mit aerodynamisch geformter Nase und verstellbarer, keilförmiger Hinterkantenklappe. Es hat eine Gesamtlänge von 5 m und erstreckt sich von Windkanalboden bis -decke, sodass sich eine Spannweite von 2,8 m ergibt. Der ebene Bereich besteht aus austauschbaren Plattenelementen, die auf einem Aluminiumrahmen montiert sind. Im mittleren, 50 cm breiten Bereich lassen sich verschiedene Absaugpanels einsetzen (vgl. Abb. 14).

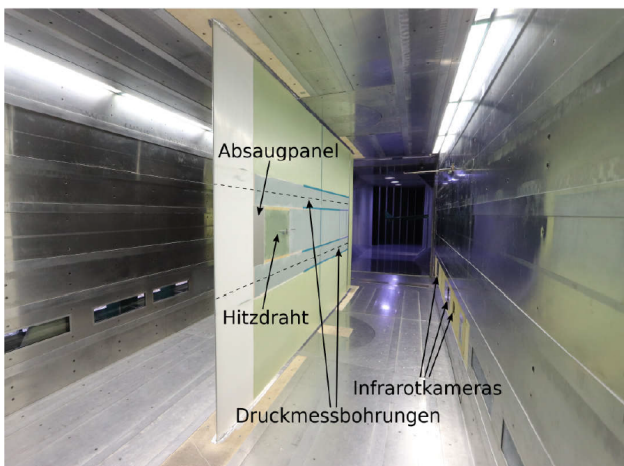


BILD 14. HLFC-Plattenmodell im DNW-NWB, aus [12]

Es werden Absaugpanels mit einer Breite von 50 cm und einer Länge von wahlweise 20 cm oder 40 cm verwendet. Diese bestehen aus der Absaugoberfläche, einer Kammerung und einem Plenum (vgl. Abb. 15). Es können sowohl lasergebohrte Bleche als auch TSSD-Oberflächen verwendet werden.

Als Messtechnik kommen Infrarotkameras zum Einsatz, mit welchen die Transitionsposition anhand der Oberflächentemperatur bestimmt wird. Um den Kontrast zu er-

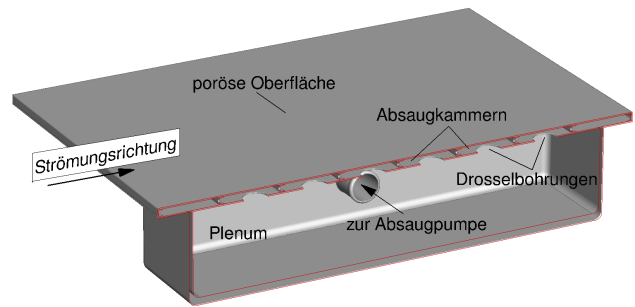


BILD 15. CAD-Schnitt durch ein Absaugpanel

höhen, kann das Modell beheizt werden. Grenzschichtprofile an einzelnen Positionen werden mit einem traversierten Hitzdraht gemessen. Der Absaugstrom wird mit dem sogenannten Laminar Flow Meter bestimmt, welches den Druckverlust in laminar durchströmten Röhrchen nutzt, um auf die Absauggeschwindigkeit zu schließen. Die Absaugraten liegen im Bereich $c_Q = 0 \dots 8 \cdot 10^{-4}$.

Um eine gute Vergleichbarkeit mit numerischen Berechnungen zu ermöglichen, wird die Druckverteilung auf der Oberfläche in zwei Schnitten mithilfe von Druckmessbohrungen bestimmt. Vergleichsrechnungen nach der LST werden mit dem Grenzschichtlöser COCO und dem Stabilitätslöser LILO (vgl. [14]) durchgeführt. Anhand der aus Infrarotbildern bestimmten Transitionsposition wird für jede untersuchte Kombination von Anströmgeschwindigkeit u_∞ und Volumenstrombeiwert c_Q der kritische N -Faktor entsprechend der e^N -Methode bestimmt.

In Abb. 16 ist die Transitionslage für zwei verschiedene Anströmgeschwindigkeiten über c_Q aufgetragen. Bis etwa $c_q = 2,5 \cdot 10^{-4}$ ergibt sich ein nahezu linearer Verlauf, bei höheren Absaugraten nimmt die Verschiebung ab. Dieses Verhalten kann mit sehr guter Übereinstimmung auch in den Ergebnissen aus LILO beobachtet werden.

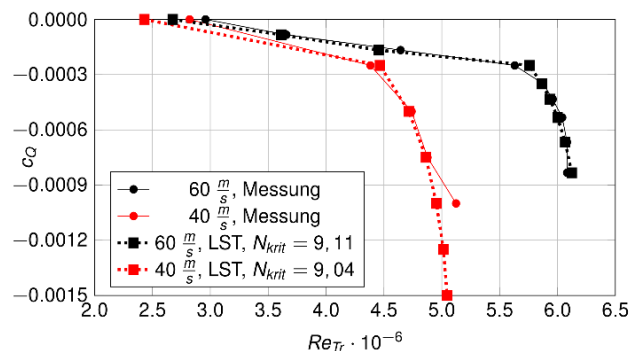


BILD 16. Verschiebung der Transitionslage in Abhängigkeit des Volumenstrombeiwerts, nach [12]

Für die TSSD-Oberflächen mit zylindrischer Perforation konnte die Wirksamkeit ebenfalls nachgewiesen werden (vgl. Abb. 17). Bezüglich der Transitionslage zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie für lasergebohrte Bleche. Gegenüber diesen sind die kritischen N -Faktoren noch geringfügig weiter reduziert, was einer geringeren Wirksamkeit entspricht. Eine mögliche Ursache hierfür ist die vergleichsweise geringe Impedanz der TSSD-Oberflächen (vgl. Abschnitt 2.1).

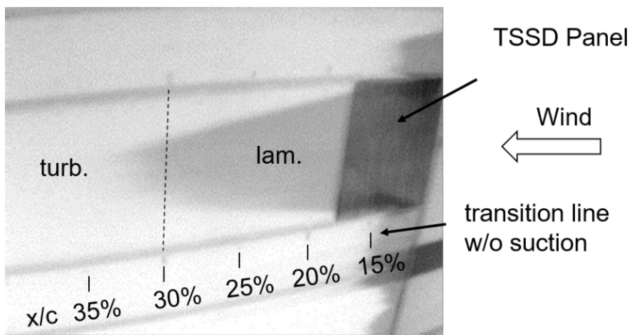


BILD 17. Verzögerte Transition hinter einem TSSD-Panel ($u_\infty = 60 \text{ m/s}$, $c_Q = 1,6 \cdot 10^{-4}$), Infrarotaufnahme aus [13]



BILD 19. Oberflächenfehler der geschlitzten Oberfläche (versetzten Anordnung)

3.2. Herstellung der geschlitzten Oberflächen und Durchführung der Versuche September 2022

Da sich das Ätzverfahren, welches für die TSSD-Oberflächen verwendet wird, nur für große Stückzahlen eignet, sind die Schlitzte im Falle der verwendeten Oberflächen mit einem Laser in die Edelstahlfolien eingebracht werden. Die Folien werden anschließend zugeschnitten und auf mehrlagige Drahtgewebe aufgesintert. Abb. 18 zeigt Detailfotos der geschlitzten Folien nach dem Lasern.

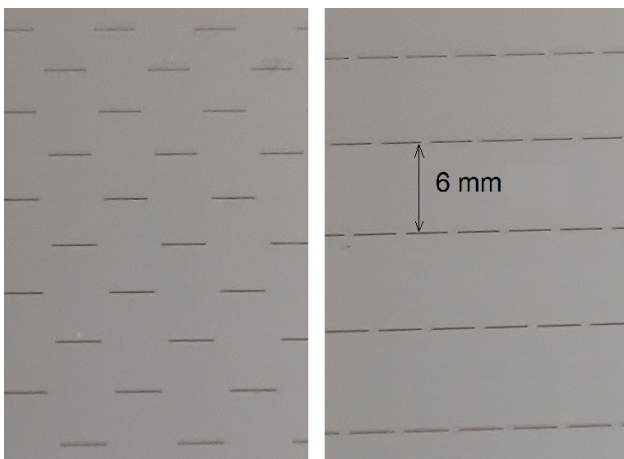


BILD 18. Gelaserte Edelstahlfolien mit Schlitzten; links versetzte und rechts überlappende Anordnung

Die gelaserten $50 \mu\text{m}$ starken Folien werden zugeschnitten und mit dem mehrlagigen Drahtgewebe (vgl. Abb. 1) verbunden. Aus diesem Prozess resultieren einige Oberflächenfehler, die einen negativen Einfluss auf die Wirksamkeit haben können. Besonders auffällig ist eine ca. 10 mm lange Vertiefung, welche oben links in Abb. 19 zu sehen ist. Darüber hinaus sind einige kreisförmige Imperfektionen zu sehen, beispielsweise rechts der Euromünze, welche als Größenvergleich dient. Unten rechts im Bild ist ein größerer Bereich ohne nennenswerten Fehler.

Die geschlitzten TSSD-Oberflächen werden mit Messingprofilen, einem Drosselblech und dem Absaugplenum verklebt. Die Absaugpanel entsprechen der Darstellung in Abb. 15.

Die Versuchsdurchführung ähnelt stark derjenigen der Versuche zu Clean Sky 2 NACOR. Untersucht werden folgende Konfigurationen:

- Geschlossene Oberfläche
- TSSD-Panel mit zylindrischen Poren
- TSSD-Panel mit versetzten Schlitzten
- TSSD-Panel mit überlappenden Schlitzten

Für jede Konfiguration werden Geschwindigkeitsreihen mit $u_\infty = 20 \text{ m/s} \dots 60 \text{ m/s}$ gemessen. Für alle Absaugoberflächen werden Volumenstrombeiwerte bis $c_Q = 10 \cdot 10^{-4}$ untersucht. Dabei zeigt sich, dass alle Absaugpanels in der Lage sind, die Transition stromab zu verschieben. Die größte Verschiebung kann mit Schlitzten in versetzter Anordnung erreicht werden, wie in den Infrarotbildern in Abb. 20 zu sehen. Im Falle der überlappenden Anordnung liegt die Transition zwischen den in der Abbildung dargestellten Fällen. Die Gründe für dieses Verhalten werden in der umfangreichen Auswertung erörtert.

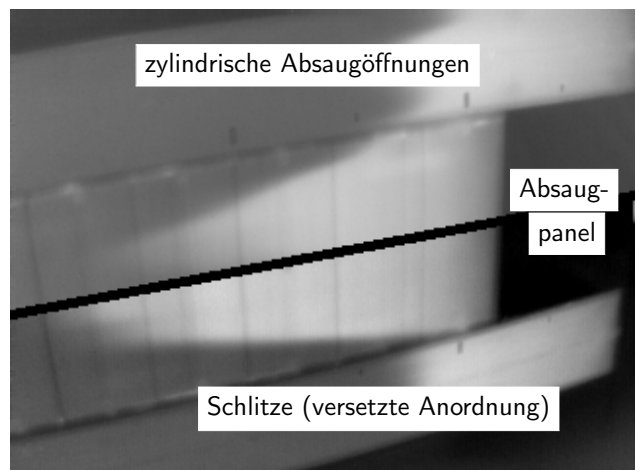


BILD 20. Vergleich der Transitionslage bei $u_\infty = 40 \text{ m/s}$ und $c_Q = 1,6 \cdot 10^{-4}$

Auffällig ist, dass für die TSSD-Oberfläche mit versetzter Schlitzanordnung ohne Absaugung keine Verschiebung der Transition stromauf gegenüber der geschlossenen Oberfläche zu beobachten ist. Das bedeutet, dass in diesem Fall der kritische N -Faktor nicht reduziert ist

wie in [12] beschrieben. Für die anderen beiden Oberflächen wird jedoch ein ähnliches Verhalten beobachtet wie bisher.

Zu erwähnen ist weiterhin, dass die in Abb. 19 dargestellte Oberflächenunebenheit keinen negativen Einfluss auf die Transitionslage hat. In keinem untersuchten Fall kann ein davon ausgehender Turbulenzkeil oder eine stromauf verschobene Transitionslage beobachtet werden. Diese Beobachtung ist wertvoll für Praxisanwendungen, da eine Beschädigung in dem hier vorliegenden Maß die Funktionalität nicht beeinträchtigt. Dies gilt jedoch nicht zwingend für Oberflächen an der Profilvorderkante oder höhere Reynoldszahlen.

4. SCHLUSSBETRACHTUNG

In Windkanalversuchen im DNW-NWB konnte gezeigt werden, dass mit den neu entwickelten geschlitzten Oberflächen eine zuverlässige Stabilisierung der Grenzschicht und so eine Verzögerung der Transition erreicht werden kann. Erste Vergleiche von Infrarotbildern deuten darauf hin, dass die Wirksamkeit der geschlitzten Oberflächen sogar geringfügig über derjenigen von Oberflächen mit zylindrischen Absaugbohrungen liegt. Die größte Verschiebung der Transitionslage ließ sich in den Versuchen mit der versetzten Schlitzanordnung erreichen. Quantitative Ergebnisse zur Verschiebung der Transitionslage für die verschiedenen Oberflächen können im Laufe der detaillierten Versuchsauswertung gewonnen werden. Zukünftige Versuche können die Wirksamkeit der geschlitzten Absaugoberflächen bei Querströminstabilitäten, wie sie bei gefeiltten Vorderkanten auftreten, untersuchen. Denkbar wäre etwa ein Versuchsaufbau wie in [13]. Dort wurden bereits TSSD-Oberflächen mit zylindrischer Perforation an einem Seitenleitwerksmodell untersucht. Auf diese Weise ließe sich auch die Wirkung der geschlitzten Oberflächen im Bereich sehr dünner Grenzschichten nahe dem Staupunkt bestimmen.

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2163/1 - Sustainable and Energy Efficient Aviation – Project-ID 390881007.

Kontaktadresse:

Richard.vonSoldenhoff@dlr.de

Literatur

- [1] Heiko Freiherr von Geyr. Schlussbericht VER²SUS. Technical report, DLR Braunschweig, 2015.
- [2] Werner Pfenninger. Low drag boundary layer suction experiments on a wing glove of a F-94 A airplane with suction through a large number of fine slots. In G. V. Lachmann, editor, *Boundary Layer and Flow Control*, volume 2, pages 981–999. Pergamon Press, Oxford/London/New York/Paris, 1961.
- [3] Matthias Horn, Arne Seitz, and Marvin Schneider. Cost-effective HLFC design concept for transport aircraft. In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 2019.
- [4] Heinrich Lüdeke and Richard von Soldenhoff. Direct numerical simulation of TS-waves over suction panel steps from manufacturing tolerances. *CEAS Aeronautical Journal*, 2021. DOI: [10.1007/s13272-021-00496-9](https://doi.org/10.1007/s13272-021-00496-9).
- [5] Stephan Enk. *Zellzentriertes Padéverfahren für DNS und LES*. PhD thesis, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, DLR Braunschweig, 2015.
- [6] Nils Tilton and Luca Cortelezzi. Stability of Boundary Layers over Porous Walls with Suction. *AIAA Journal*, 2015. DOI: [10.2514/1.J053716](https://doi.org/10.2514/1.J053716).
- [7] Sabry Allam, Ying Guo, and Mats Åbom. Acoustical study of micro-perforated plates for vehicle applications. *SAE Technical Paper*, 2009.
- [8] Jeanne Methel, Maxime Forte, Olivier Vermeersch, and Grégoire Casalis. An experimental study on the effects of two-dimensional positive surface defects on the laminar-turbulent transition of a sucked boundary layer. *Experiments in Fluids*, 2019. DOI: [10.1007/s00348-019-2741-2](https://doi.org/10.1007/s00348-019-2741-2).
- [9] Adrien Rouviere, Fabien Méry, Jeanne Methel, Olivier Vermeersch, and Maxime Forte. Experimental and Numerical Study on Wall Impedance Effects on Tollmien-Schlichting Waves. *AIAA Journal*, 2021. DOI: [10.2514/1.J060536](https://doi.org/10.2514/1.J060536).
- [10] Martin Bauer and Heinrich Lüdeke. Simulation von Absaugbohrungen für Laminartechnologien unter Berücksichtigung der Anström Grenzschicht. *DLRK*, 2017.
- [11] David G. MacManus and John A. Eaton. Flow physics of discrete boundary layer suction - measurements and predictions. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000. DOI: [10.1017/S002211200001026](https://doi.org/10.1017/S002211200001026).
- [12] Heinrich Lüdeke and Christian Breitenstein. Experimental investigation of hybrid laminar flow control by a modular flat plate model in the DNW-NWB. *CEAS Aeronautical Journal*, 2021. DOI: [10.1007/s13272-021-00564-0](https://doi.org/10.1007/s13272-021-00564-0).
- [13] Arne Seitz, Matthias Horn, Bart van Rooijen, Alexander Barklage, Peter Scholz, Camli Badrya, and Rolf Radespiel. Wind Tunnel Verification of Laminar Boundary Layer Control TSSD Concept. *AIAA Aviation 2022 Forum*, 2022. DOI: [10.2514/6.2022-3552](https://doi.org/10.2514/6.2022-3552).
- [14] Geza Schrauf. LILO 2.1: User's Guide and Tutorial. GSSC Technical Report 6, 2006.