

# SIMULATION VON ABSAUGBOHRUNGEN FÜR LAMINARTECHNOLOGIEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER ANSTRÖM-GRENZSCHICHT

M. Bauer, H. Lüdeke,  
 DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik,  
 Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Germany

## Zusammenfassung

Die nachfolgende Studie befasst sich mit numerischen Simulationen der periodischen Absaugbohrungen eines HLFK-Systems ohne Absaugkammer unter Berücksichtigung der Anström Grenzschicht. Aus den Simulationsergebnissen werden Druckverlustcharakteristiken erstellt, das heißt die Abhängigkeit der Druckverluste von der Absauggeschwindigkeit in der Bohrung. Das Ziel dieser Studie ist die Feststellung von Einflüssen der Anström Grenzschicht auf Druckverluste in Bohrungen der Mikroperforation. Dazu werden verschiedene Variationen von Bohrungsgeometrien und Bedingungen in der Anström Grenzschicht durchgeführt.

## 1. EINLEITUNG

Ingenieure und Wissenschaftler sind ständig auf der Suche nach neuen Technologien und Verbesserungen an aktuellen Flugzeugkonfigurationen. In der Aerodynamik setzt man auf eine wirkungsvolle Verringerung des Reibungswiderstandes, der zurzeit ca. 50 % des gesamten Widerstandes im Reiseflug bei Verkehrsflugzeugen beträgt. Dies lässt sich durch eine Verschiebung der Transitionslage, das heißt die Verschiebung des Übergangs der laminaren Grenzschicht zur turbulenten Grenzschicht stromab erreichen. Die laminare Grenzschicht zeigt im Vergleich zur turbulenten deutlich niedrigere Reibungsbeiwerte. Bei heutigen konventionellen Verkehrsflugzeugen ist es technologisch nicht möglich, die laminare Grenzschichtströmung aufgrund der hohen Reynoldszahl im Reiseflug und der relativ großen Pfeilung der Tragflügel und Leitwerke auf natürliche Weise zu erhalten. Eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Laminarhaltung ist die Absaugung der Grenzschicht durch eine mikroperforierte Oberfläche, die die laminare Grenzschicht stabilisiert. In Kombination mit der natürlichen passiven Laminarhaltung, die auf einem geeigneten Druckgradienten durch Formgebung der Oberfläche basiert, wird dieses System als hybride Laminarhaltung oder auch HLFK-Hybrid Laminar Flow Control bezeichnet. Die Grenzschichtabsaugung wird bei dieser Technologie nur im vorderen Bereich des Flügel- oder Seitenleitwerksprofils angewendet (Bild 1). Einer der wichtigsten Aspekte bei Entwürfen solcher aktiven Laminarhaltungstechnologien ist die genaue Kenntnis der Druckverlustcharakteristiken der verwendeten mikroperforierten Oberflächen. Das heißt die Abhängigkeit des Druckverlustes durch die Mikroperforation von der Absauggeschwindigkeit. Die Bestimmung dieser Charakteristiken ist Gegenstand dieser Studie.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird die Strömung der periodischen Bohrungen der äußeren Mikroperforation des HLFK-Systems mit Hilfe des DLR CFD-Lösers FLOWer numerisch simuliert. Anders als in experimentellen Charakterisierungen der

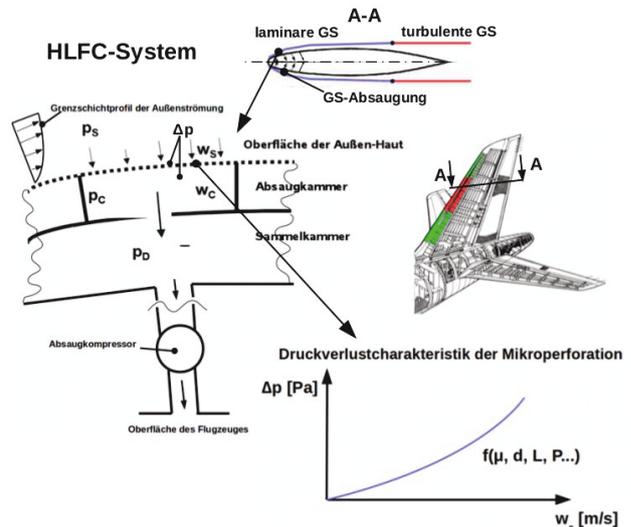


BILD 1. HLFK-System mit der Absaugung der Grenzschicht im Nasenbereich

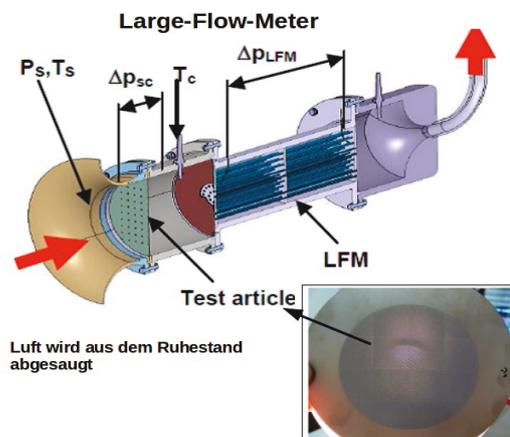


BILD 2. Large-Flow-Meter [4] zur Untersuchung mikroperforierter Oberflächen

mikroperforierten Oberflächen für aktive Laminarhaltung im Luftfahrtforschungsprojekt VER<sup>2</sup>SUS mit einem Large-Flow-Meter (LFM [4] – siehe Bild 2) in ruhender Strömung, wird im Folgenden auch die Grenzschicht auf der Außenseite der mikroperforierten Oberfläche berücksichtigt, die im realen Freiflug auftritt. Die Bestimmung ihres Einflusses auf die Druckverlustcharakteristik der Mikroperforation ist das Ziel dieser Studie. Neben einer Validierung der numerischen Simulationen von Absaugbohrungen werden Einflüsse der unterschiedlichen Anströmungsgrenzschichten sowie verschiedene Grenzschichtdicken, Anströmmachzahlen und Grenzschichtprofile auf die Druckverlustcharakteristik mit unterschiedlichen Bohrungsparametern wie verschiedenen Durchmessern, Bohrungstiefen und Konizitäten untersucht. Eine vollständige Darstellung der vorgenommenen Simulationen ist in [2] zu finden.

In Bild 3 sind die wesentlichen geometrischen Parameter der Mikroperforation dargestellt, im Einzelnen die Durchmesser  $d$  und  $D$ , die Bohrungsabstände  $A_{Ab}$  und  $B_{Ab}$ , die Bohrungstiefe  $L$  und die Porosität  $P$ .

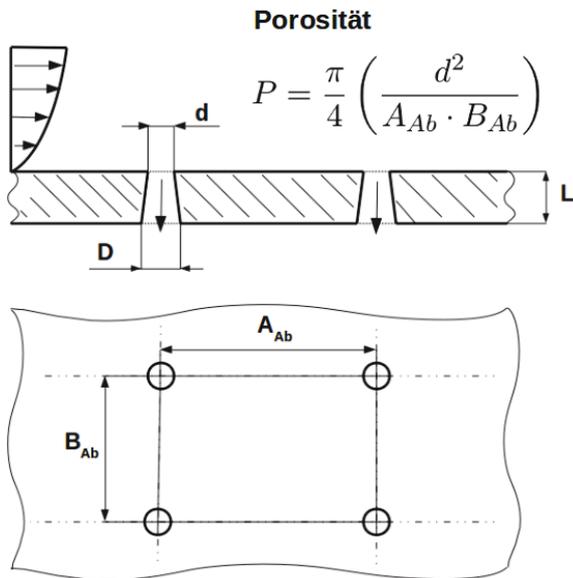


BILD 3. Geometrische Parameter der äußeren Mikroperforation

In Bild 4 wird die diskrete Absauggeschwindigkeit  $w_B$  eingeführt, die bei realer Grenzschichtabsaugung auftritt und die kontinuierliche mittlere Absauggeschwindigkeit  $w_S$ , die für Berechnungen der Grenzschichtstabilität verwendet wird.

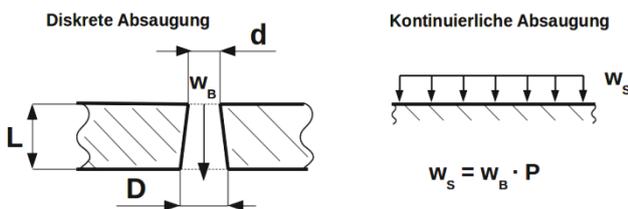


BILD 4. Diskrete und kontinuierliche Absauggeschwindigkeit einer mikroporösen Oberfläche

## 2. NUMERISCHE EINSTELLUNGEN ZUR SIMULATION DER ABSAUGBOHRUNGEN

### 2.1. Berechnungsgeometrie und Randbedingungen

Im Folgenden werden diskrete Absaugbohrungen mit periodischen Randbedingungen simuliert. Das Rechengebiet besteht aus dem Außenbereich und der Bohrung (Bild 5). Die Absaugkammer unterhalb der Bohrung wird nicht simuliert, daher endet das Rechenetz am Ende der Bohrung, wo ein festgelegter Druck vorgegeben wird. In Bild 5 sind verwendete Randbedingungen der Simulationen in blau dargestellt. Die Randbedingung am Einlauf fixiert ein laminares Grenzschichtprofil, das zuvor mit dem Grenzschichtlöser Bprep bestimmt wurde. Dieser GS-Löser erzeugt sowohl inkompressible Blasius- als auch kompressible Falkner-Skan-Grenzschichtprofile. Die Randbedingung am Auslass der Bohrung fixiert den statischen Druck relativ zum Anströmdruck.

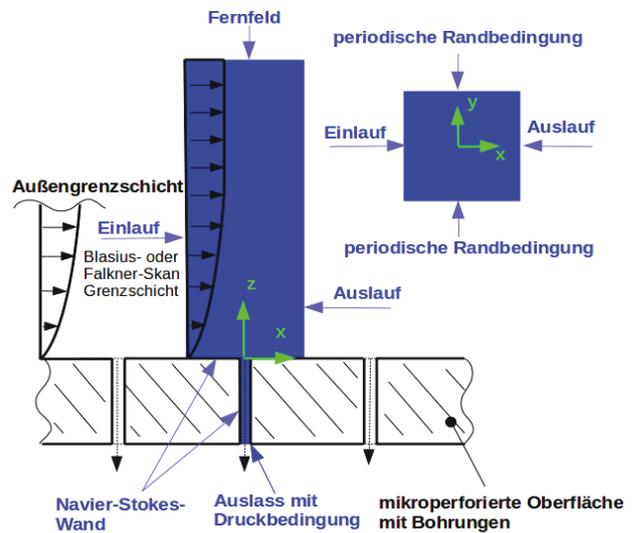


BILD 5. Berechnungsgeometrie und Randbedingungen

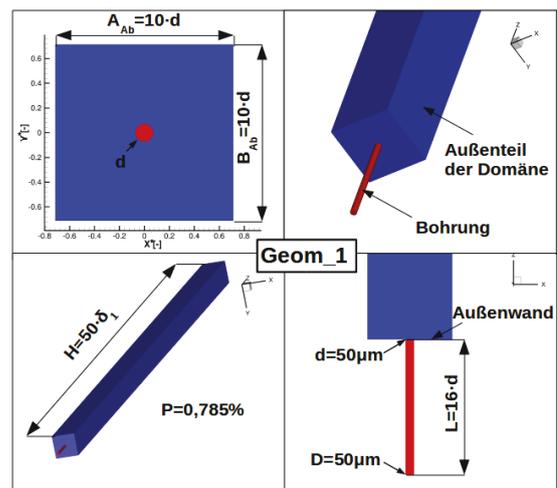


BILD 6. Referenzgeometrie Geom\_1 mit Dimensionierung und Porosität in Prozent

Die relativen Abstände der Bohrungen in beiden Richtungen (x, y) betragen in allen untersuchten Fällen  $A_{ab}$  und  $B_{ab}=10 \cdot d$  (Bild 6). Daraus ergibt sich eine Porosität von  $P=0,785\%$ . Weiterhin ist der Fernfeldabstand mit  $H=50 \cdot \delta_1$  in ausreichender Distanz zum Grenzschichttrand gewählt worden. Alle weiteren Parameter wie d, D und L werden in der Studie variiert. Bild 6 zeigt die Referenzgeometrie der Absaugbohrung ohne Konizität, die vergleichbar mit Absaugbohrungen von heutigen HLFC-Systemen ist.

**2.2. Netzgenerierung**

Für Simulationen der Absaugbohrungen ließen sich strukturierte, körperangepasste, Mehrblock-Netze unter Verwendung einer O-Topologie mit dem DLR Netzgenerator MegaCads in 18 Blöcken erzeugen. Für die Simulationen werden verschiedene Netze mit unterschiedlichen Feinheiten verwendet, für die sich die Gesamtzahl der Netzpunkte zwischen ca. 123000 und 2316000 bewegt.

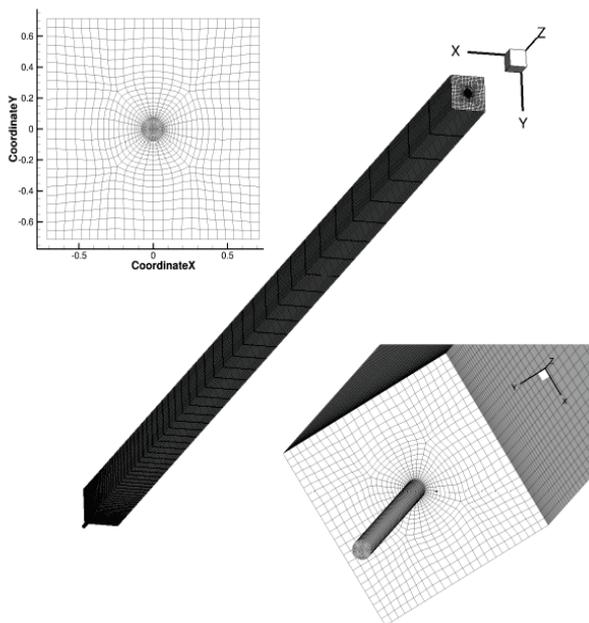


BILD 7. Grobes Berechnungsnetz mit aufgelöster Bohrungsgeometrie

**2.3. Einstellung des numerischen Verfahrens**

Diese Studie zeigt stationäre laminare Ergebnisse der kompressiblen dimensionslosen Navier-Stokes-Gleichungen auf strukturierten Mehrblock-Netzen, simuliert mit Hilfe des DLR Navier-Stokes-Lösers FLOWer [1]. Dazu ließ sich ein zell-zentriertes Finite-Volumen-Verfahren mit einem zentralen Schema zweiter Ordnung in räumlicher Diskretisierung und einem 2.Ordnung 5-Stufen Runge-Kutta Verfahren zur zeitlichen Diskretisierung einsetzen. Dissipative Terme sind zur Dämpfung hoher Frequenzen implementiert, um die Simulation zu stabilisieren. Um die Berechnung zu beschleunigen, wird ein impliziter Residuen-Glätter verwendet. Die Bohrungen befinden sich im laminaren Bereich des Profils, zudem wird die kritische Reynoldszahl innerhalb der Bohrung nicht überschritten ( $Re_{kr}=2500$ ). Daher kann in der gesamten Domäne von laminarer Strömung ausgegangen werden. Das Blasius- oder auch Falkner-Skan-Grenzschichtprofil der Außenströmung wird

mit einem GS-Verfahren vorab berechnet und als Randbedingung am Einlauf in der Simulation am vorderen Rand des Außenteils der Berechnungsdomäne vorgegeben. Dieses Grenzschichtprofil wird auch als initiale Lösung der Simulation verwendet. Die wandnormale Grenzschichtkomponente wird für die Simulationen nicht berücksichtigt und zu Null gesetzt. In gleicher Weise lassen sich Querströmkomponenten der Grenzschicht vernachlässigen, da sie im Rahmen der verwendeten Näherungen keinen Einfluss zeigen. Grenzschichtdaten von Windkanalmessungen eines Seitenleitwerksmodells aus dem Projekt VER<sup>2</sup>SUS [3] stellen Referenzfälle für Parameter der Anströmung dar. Es handelt sich um die Reynoldszahl  $Re_{\delta_1}$ , die Grenzschichttrandgeschwindigkeit  $u_e$  ( $Ma_\infty$ ) und die Verdrängungsdicke  $\delta_1$ , die der laminaren Grenzschicht mit Absaugung entspricht.

**2.4. Bestimmung der Druckverlust-characteristik aus Navier-Stokes Lösungen**

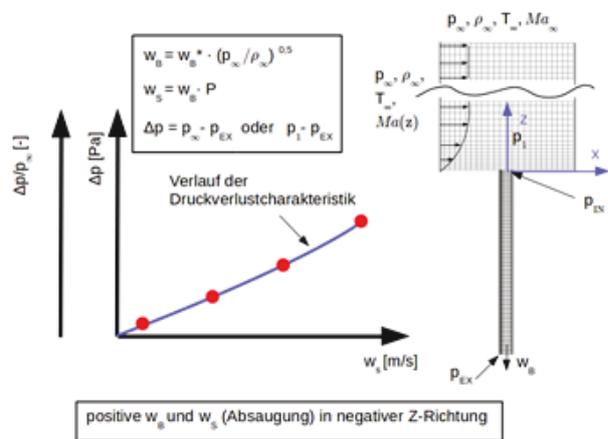


BILD 8. Erstellung der Druckverlustcharacteristik

Im Post-Processing der Simulation wird aus der Feldlösung am unteren Rand der Bohrung die durchschnittliche Bohrungsabsauggeschwindigkeit in der negativen Z-Richtung  $w_B^*$  bestimmt (Bild 4 – diskrete Absauggeschwindigkeit). Sie lässt sich in die dimensionsbehaftete Form  $w_B$  umrechnen. Durch die Multiplikation der Geschwindigkeit  $w_B$  mit der Porosität P der mikroperforierten Oberfläche erhält man die mittlere Absauggeschwindigkeit des zugehörigen Panels  $w_s$  (Bild 4 mit kontinuierlicher Absauggeschwindigkeit). Der Druckverlust  $\Delta p$  stellt die Differenz zwischen dem statischen Druck der Außenströmung  $p_\infty$  und dem statischen Druck am Auslass der Bohrung  $p_{EX}$  dar. Bei Simulationen der einzelnen Bohrungen mit höheren Anströmgeschwindigkeiten treten in der Außengrenzschicht künstlich erhöhte Drücke auf die zu einem Modellierungsproblem führen können, so dass die ermittelte Absauggeschwindigkeit der Bohrung korrigiert werden muss. Deshalb wird in diesen Fällen der Druckunterschied  $\Delta p$  als der Unterschied zwischen dem statischen Druck  $p_1$  oberhalb der Bohrung und dem statischen Druck im Auslass der Bohrung  $p_{EX}$  aus der Druckrandbedingung berechnet. Nach Simulationen mit unterschiedlichen Differenzdrücken in typischen Intervallen von  $\Delta p^*=0,005-0,05$  wird daraus ein Diagramm der Druckverlustcharacteristik erstellt (Bild 8).

## 2.5. Validierung der numerischen Simulationen mit Absaugbohrungen

Zur Überprüfung der numerischen Einstellungen für Simulationen der Absaugbohrungen wurden zunächst Studien an einem typischen Validierungsfall durchgeführt. Es handelt sich um eine Simulation ohne die Absaugbohrung, eine Netzkonvergenzstudie und die Überprüfung der Randbedingung der Außengrenzschicht mit Hilfe von FLOWer Ergebnissen. Weiterhin um einen Vergleich der Strömungstopologie durch eine Absaugbohrung mit Bildern aus Literaturstellen. Danach wurden die ermittelten Druckverlustcharakteristiken mit dem linearen Hagen-Poiseuille-Gesetz verglichen (Bild 9), das im Gegensatz zu den vorgestellten Simulationen keine Außengrenzschicht, keinen Einlaufbereich in der Bohrung und keine Kompressibilität berücksichtigt.

Hagen-Poiseuille-Gesetz:

$$\Delta p = \frac{32 \cdot \mu \cdot L}{d^2 \cdot P} \cdot w_s \quad (1)$$

Schließlich wurde ein Vergleich mit dem quadratischen Druckverlustvorhersagemodell nach Goldstein [5] durchgeführt (Bild 9), das den Einlaufbereich in der Bohrung durch Modellierungsparameter berücksichtigt.

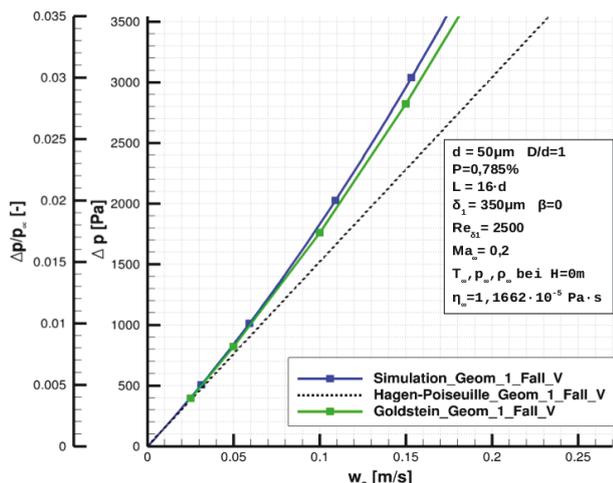


BILD 9. Vergleich der Druckverlustcharakteristik der Simulation und mit dem Hagen-Poiseuille-Gesetz und dem Modell nach Goldstein [5]

Mit Hilfe dieser Voruntersuchungen ließen sich die Einstellungen der numerischen Betrachtungen erfolgreich überprüfen und validieren.

## 3. UNTERSUCHUNG VON EINFLÜSSEN DER AUßENGRENZSCHICHT AUF DRUCKVERLUSTE IN DER BOHRUNG

### 3.1. Vergleich von Simulation mit und ohne Außengrenzschicht

Im Folgenden werden Druckverluste für einen Fall (Fall\_1) mit Blasius-Außengrenzschicht bei  $\delta_1=352\mu\text{m}$ ,  $Ma_\infty=0,318$  und einer Absaugung ohne Außen-grenzschicht verglichen (Fall\_LFM), der den LFM-Messungen (Bild 2) entspricht. Es wird für beide Fälle die Bohrungsgeometrie Geom\_1 verwendet (Bild 6). Die Druckverlustcharakteristiken unterscheiden sich in diesen beiden Fällen nicht [2]. Das heißt, dass bei dieser Bohrungsgeometrie (Geom\_1) und Anströmbedingungen (Fall\_1) die Außengrenzschicht die Druckverluste nicht beeinflusst. In Bild 10 werden Stromlinien in der mittleren XZ-Ebene mit der Wandnormalen Geschwindigkeit  $w^*$  für beide Bedingungen verglichen. Strömungstopologien innerhalb der Bohrung sind in beiden Fällen nahezu identisch. Bild 11 zeigt den zugehörigen Vergleich der Druckverluste bei unterschiedlichen Netzfeinheiten mit einer sehr guten Übereinstimmung für beide Anströmbedingungen.

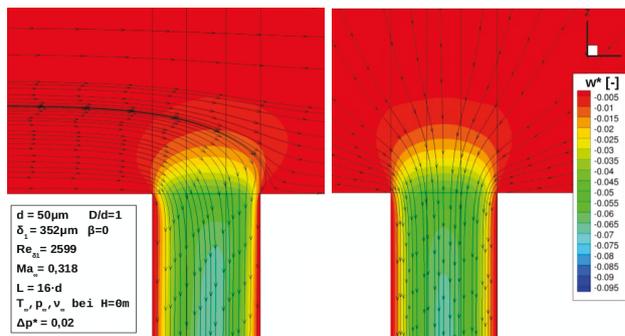


BILD 10. Stromlinien und Absauggeschwindigkeit  $w^*$  in der mittleren XZ-Ebene mit Außengrenzschicht für Geometrie 1, Fall 1(links) und LFM (rechts)

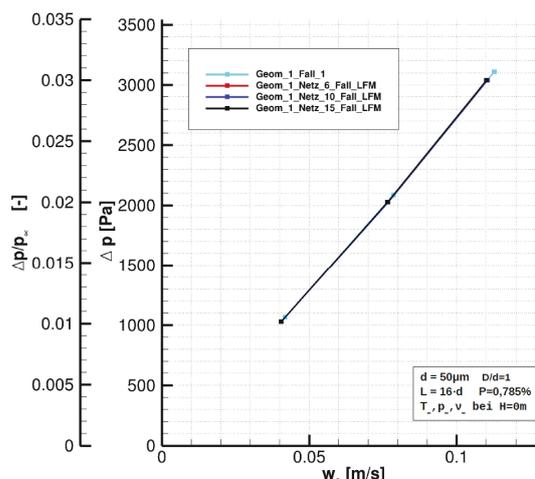


BILD 11. Vergleich der Druckverlustcharakteristik von LFM und Fall 1 mit Platten-Grenzschicht

### 3.2. Variation der Außengrenzschicht in vier Schnitten der Windkanalkonfiguration

Im nächsten Schritt wurden Simulationen zur Verdrängungsdickenvariation ( $\delta_1=50-352\mu\text{m}$ ), unterschiedlichen Grenzschichtprofilen ( $\beta=-0,15-0,8$ ) und Grenzschichttrandgeschwindigkeiten mit Machzahlvariation ( $Ma_\infty=0,11-0,7$ ) durchgeführt. Vier Referenzfälle dieser Variationen entsprechen den Bedingungen von vier laminaren Profilpositionen mit Absaugung aus VER<sup>2</sup>SUS-Windkanalmessungen am Leitwerksmodell unter Bodenbedingungen bei Reiseflugreynoldszahl. Es wird die Bohrungsgeometrie Geom\_1 bei diesen Fällen verwendet. Das heißt  $d=50\mu\text{m}$ ,  $L=0,8\text{mm}$ ,  $P=0,785\%$  und  $D/d=1$ . Aus Simulationsergebnissen dieser Variationen wurde kein oder nur ein geringer Einfluss der Außengrenzschicht auf Bohrungsdruckverluste bei höheren Absauggeschwindigkeiten festgestellt, wie in späteren Abschnitten zu sehen ist. Demgegenüber beeinflusst die Außengrenzschicht auch Strömungsfelder innerhalb der Bohrung. Bei kleineren Verdrängungsdicken der Außengrenzschicht oder höheren Randgeschwindigkeiten (siehe Bild 12) sowie bei kleineren Druckunterschieden  $\Delta p$  entstehen am Einlass der Bohrung Ablösungen, die aber in den gezeigten Fällen den Druckverlust der Bohrung nicht sichtbar vergrößern. Es sei erwähnt, dass mit der Randgeschwindigkeit auch die Re-Zahl signifikant variiert (Bild 12).

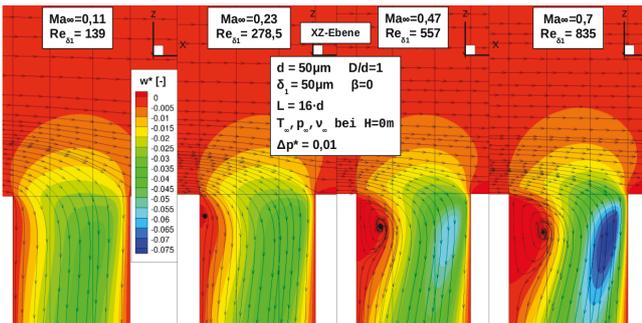


BILD 12. Strömungsfeld – Variation der Randgeschwindigkeit in der Außengrenzschicht (Machzahl- und Reynoldszahlvariation)

In den folgenden Abschnitten werden drei Parameterstudien der Bohrungsgeometrie-Variationen ( $d$ ,  $L$ ,  $d/D$ ) bei Bodenbedingungen dargestellt. Dabei wird die Randgeschwindigkeit der Außengrenzschicht nach Blasius mit  $\delta_1=100\mu\text{m}$  und damit sowohl Mach- als auch Re-Zahl variiert ( $Ma_\infty=0,14-0,86$ ), um ihren Einfluss festzustellen.

### 3.3. Einfluss des Bohrungsdurchmessers

In diesem Abschnitt wird der Einfluss verschiedener Bohrungsdurchmesser untersucht. Die Druckverlustcharakteristiken der einzelnen Bohrungsdurchmesser sind im Bild 13 dargestellt. Für den Durchmesser  $d=50\mu\text{m}$  sind nur geringfügige Unterschiede bei einer Variation der Randgeschwindigkeit zu erkennen. Das bedeutet einen geringen Einfluss der Außengrenzschicht auf Druckverluste in der Bohrung bei dieser Parameterwahl. Druckverlustcharakteristiken bei Loch-Durchmessern von  $d=100\mu\text{m}$  und  $d=150\mu\text{m}$  zeigen deutlich niedrigere Druckverluste, was dem Hagen-Poiseuille-Gesetz aus Gleichung 1 entspricht. Weiter treten für diese Fälle

deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten auf. Das heißt, dass es einen sichtbaren Einfluss der Außengrenzschicht für diese Geometrien gibt. Der absolute Unterschied zwischen Druckverlustcharakteristiken mit verschiedenen Anströmmachzahlen vergrößert sich weiter bei höheren Druckunterschieden  $\Delta p$  und Absauggeschwindigkeiten  $w_s$ .

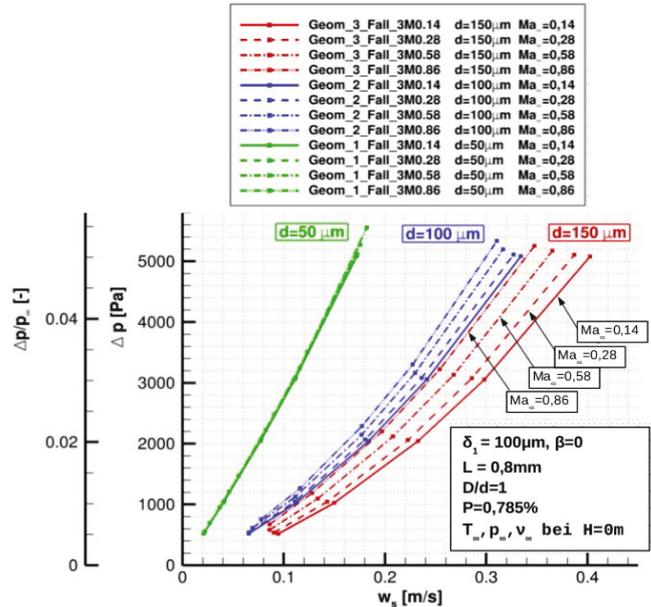


BILD 13. Einfluß des Bohrungsdurchmessers auf die Druckverlustcharakteristiken bei verschiedenen GS-Randgeschwindigkeiten

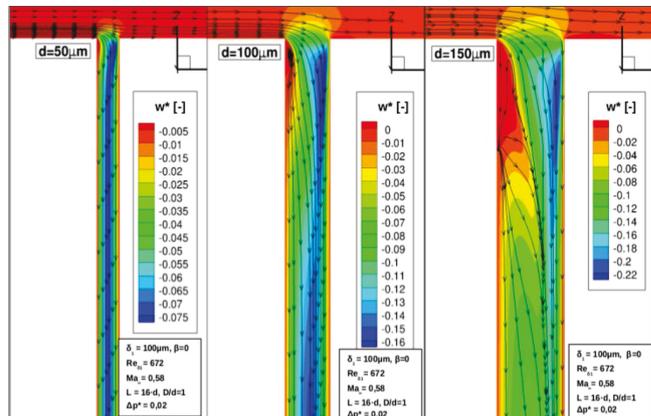


BILD 14. Bohrungsdurchmesservariation-Strömungsfeld in der mittleren XZ-Ebene

In Bild 14 werden Strömungsfelder mit dimensionslosen Geschwindigkeitskomponenten  $w^*$  bei drei unterschiedlichen Durchmessern und mit Anströmmachzahl  $Ma_\infty=0,58$  sowie einem Druckunterschied von  $\Delta p^*=0,02$  dargestellt. Für den Durchmesser von  $d=100\mu\text{m}$  und  $d=150\mu\text{m}$  ist erkennbar, dass kein vollentwickeltes parabolisches Geschwindigkeitsprofil unterhalb der Ablösung in der Bohrung verglichen zum Fall mit  $d=50\mu\text{m}$  entsteht. Die Außengrenzschicht verursacht in den Fällen mit  $d=100\mu\text{m}$  und  $d=150\mu\text{m}$  eine starke Inhomogenität der Profile innerhalb der Bohrung. Der Kern mit höheren Geschwindigkeiten befindet sich in diesen Fällen auf der Stromabseite der Bohrung. Beim Fall mit  $d=150\mu\text{m}$  ist es

nicht gewiss, ob es sich innerhalb der Bohrung aufgrund der Ablösung und der Krümmung der Stromlinien eine turbulente Strömung bildet, trotz der im Vergleich zur kritischen Rohr Reynoldszahl ( $Re_{d_{kr}} \approx ca. 2300$ ) kleinen Re-Zahl in der Bohrung ( $Re_d < ca. 500$ ). Eine weitere Frage ergibt sich aus in der Möglichkeit instationärer Strömungen innerhalb der Bohrung, die aufgrund des verwendeten stationären Ansatzes nicht modelliert werden können.

### 3.4. Untersuchung der Bohrungstiefe

Die Druckverlustcharakteristiken für unterschiedliche Bohrungstiefen sind in Bild 15 dargestellt. Je kleiner die Bohrungstiefe, desto niedrigere Druckverluste treten auf, was auch hier dem Hagen-Poiseuille-Gesetz (Gleichung 1) entspricht. Weiterhin zeigen sich für  $L=0,4$  und  $0,8\text{mm}$  sichtbare Unterschiede bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten. Das heißt, dass sich für diese Fälle ein erkennbarer Einfluss der Außengrenzschichtströmung auf Druckverluste innerhalb der Bohrung zeigt. Der absolute Unterschied zwischen Druckverlustcharakteristiken mit verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten vergrößert sich bei höheren Druckunterschieden  $\Delta p$  und Absauggeschwindigkeiten  $w_s$ .

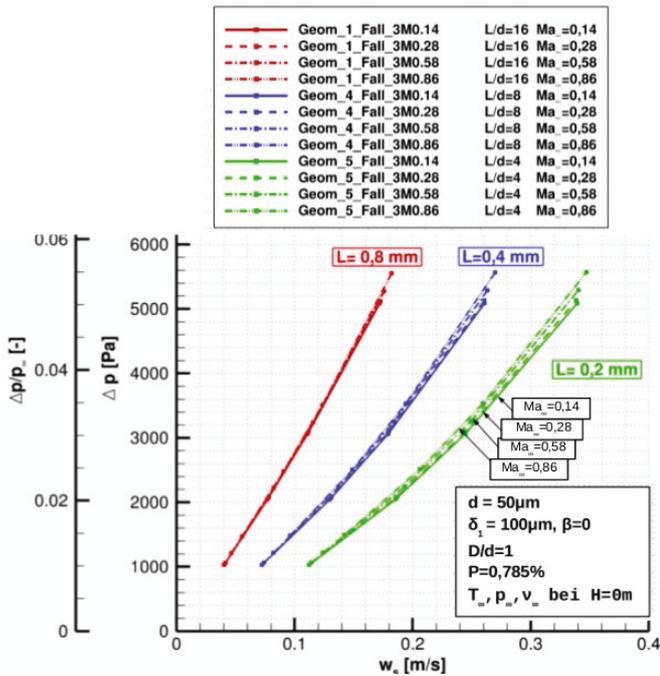


BILD 15. Druckverlustcharakteristiken unter Einfluss der Bohrungstiefe

### 3.5. Konizität der Absaugbohrung

Druckverlustcharakteristiken bei variabler Konizität sind in Bild 16 dargestellt. Die Druckverlustcharakteristiken mit  $D/d=1,4$ ,  $D/d=2$  und  $D/d=3$  haben niedrigere Druckverluste als für  $D/d=1$ . Dies wird einerseits durch einen größeren mittleren Durchmesser, andererseits durch die Vergrößerung der Querschnittsfläche der Bohrung, also eine zusätzliche Druckrückgewinnung, verursacht. Weiter deuten diese Geometrien schon sichtbare Unterschiede bei verschiedenen Anströmmachzahlen an. Das heißt, dass es auch in diesen Fällen einen deutlichen Einfluss der Außengrenzschichtströmung auf die Druckverluste gibt.

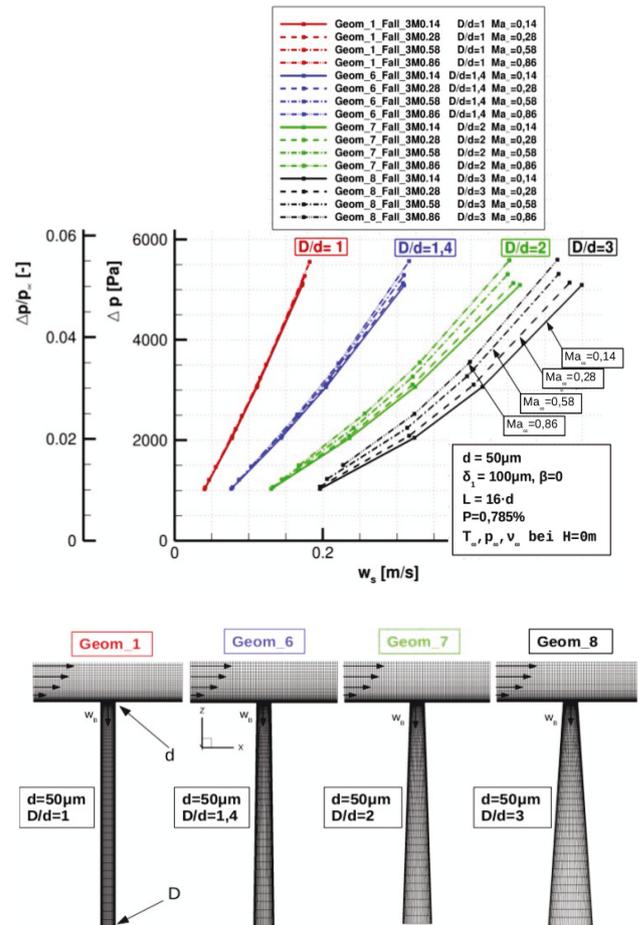


BILD 16. Konizitäts-Untersuchung der Druckverlustcharakteristiken mit Außengrenzschicht

### 3.6. Abhängigkeit zusätzlicher Druckverluste von der Bohrungsreynoldszahl $Re_d$

Bei der Untersuchung der Außengrenzschicht in vorherigen Simulationen wurde festgestellt, dass zusätzliche Druckverluste in der Bohrung von der Bohrungsreynoldszahl  $Re_d$  abhängen. Im Bild 17 und 18 sind bereits gezeigte Druckverlustcharakteristiken mit einer Bohrungsdurchmesser- und Bohrungstiefe-Variation dargestellt. Dabei sind auch Bohrungsreynoldszahlen  $Re_d$  mit abgebildet. Man kann einerseits erkennen, dass erst ab einer gewissen Bohrungsreynoldszahl ( $Re_d \approx ca. 40-50$ ) sichtbare durch die Außengrenzschicht verursachte zusätzliche Druckverluste auftreten. Andererseits haben verschiedene Bohrungsgeometrien mit gleicher Bohrungsreynoldszahl  $Re_d$  vergleichbare zusätzliche Druckverluste. Als Beispiel seien die Reynoldszahlen  $Re_d=156$  (rote Ellipsen) oder  $Re_d=235$  genannt (schwarze Ellipsen). In Bild 18 haben alle Punkte der Druckverlustcharakteristiken auf jeder zur Y-Achse parallelen Linie gleiche Bohrungsreynoldszahl, da der Bohrungsdurchmesser  $d$ , die kinematische Viskosität  $\nu$  und die Absauggeschwindigkeit  $w_s$  gleich sind. Tatsächlich sind für diese Fälle keine Unterschiede in den Druckverlust-Variationen, die aufgrund der Außen-Randgeschwindigkeiten auftreten, zu erkennen.

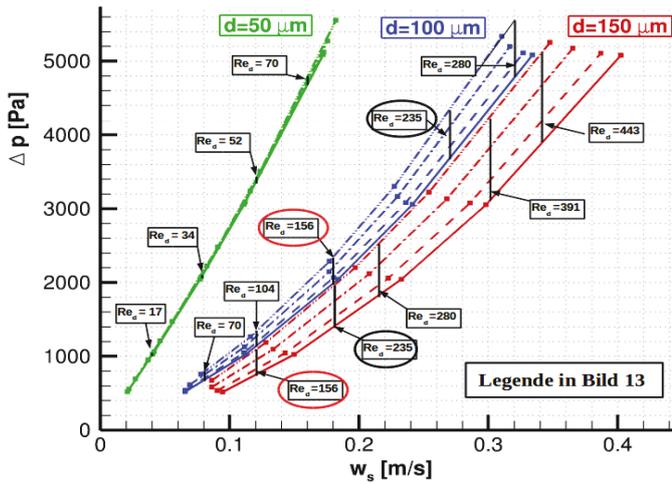


BILD 17. Druckverlustcharakteristiken mit  $Re_d$ : Bohrerdurchmesser-Studie bei verschiedenen GS-Rand Geschwindigkeiten

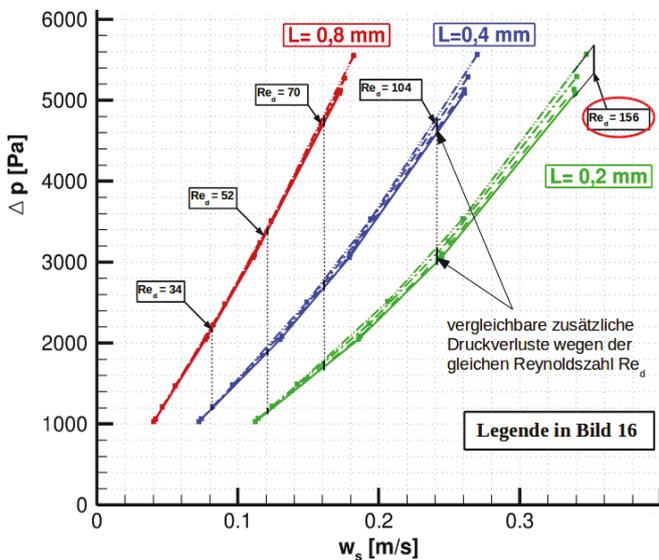


BILD 18. Druckverlustcharakteristiken mit  $Re_d$  – bei variiert Bohrertiefe

Eine ähnliche Abhängigkeit der zusätzlichen Druckverluste von der Reynoldszahl ist auch bei einer vergleichbaren Rohrströmung mit einer  $90^\circ$  Umlenkung in Rohrkrümmern zu beobachten (Bild 19). Bild 20 zeigt einen Vergleich für den Fall der Grenzschichtabsaugung mit der Strömung im Rohrkrümmer. Beide Fälle unterscheiden sich hauptsächlich in der Grenzschicht stromauf der Umlenkung, die einerseits eine Plattengrenzschicht, andererseits eine Rohrströmung darstellt. Im Fall der Rohrströmung hängt die Strömung vor und nach der Umlenkung miteinander direkt zusammen, beide haben die gleiche mittlere Geschwindigkeit und den gleichen Massenstrom. Die kritische Reynoldszahl, ab der nun zusätzliche Druckverluste auftreten, hängt nur von der relativen Krümmung der Röhre ab. Im Fall der Grenzschichtabsaugung sind zwei Strömungsbereiche zu unterscheiden. Erstens ist dies die eingehende Außengrenzschicht, die ein breites Spektrum an Variationen der Grenzschichttrandgeschwindigkeit, -dicken oder Grenzschichtform haben kann. Für die Außengrenzschicht gilt die Haftbedingung nur an der

Außenwand, was einen Unterschied zum Fall der Rohrströmung darstellt. Der zweite Bereich der Grenzschichtabsaugung ist die Bohrungsströmung, die mit der Reynoldszahl  $Re_d$  charakterisiert ist. Trotz dieser offensichtlichen Unterschiede zeigen sich hinsichtlich der Strömungsphänomene hinter der Umlenkung bemerkenswerte Ähnlichkeiten [2].

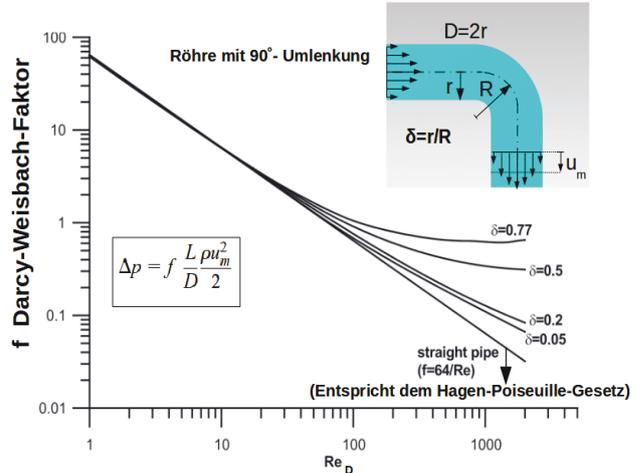


BILD 19. Druckverluste der Rohrströmung mit Umlenkung in der  $Re_d$ -Abhängigkeit [6]

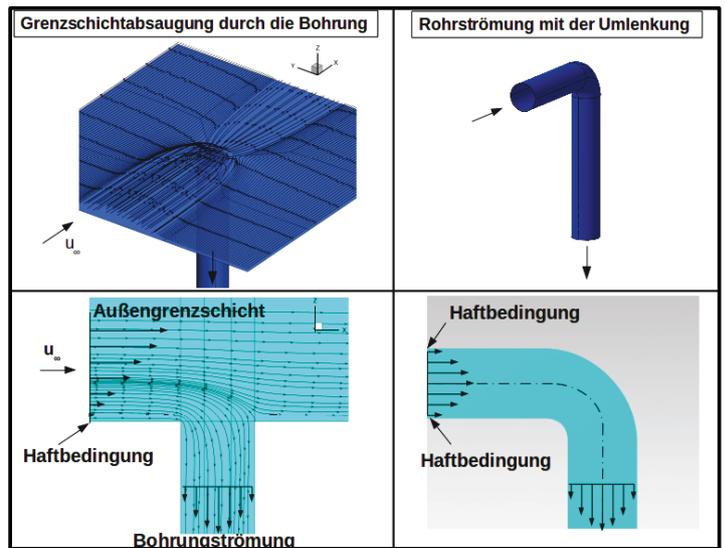


BILD 20. Vergleich der Grenzschichtabsaugung und der Rohrströmung mit Umlenkung, Stromlinien und Verhalten der Grenzschichten

### 3.7. Viskositätsbetrachtung innerhalb der Bohrung

Die Hypothese, dass zusätzliche durch die Außengrenzschicht verursachte Druckverluste bei gegebenem Grenzschichtzustand von der Bohrungs-Reynoldszahl  $Re_d$  abhängen, wird in diesem Abschnitt durch eine Viskositätsstudie überprüft. In allen vorherigen Abschnitten dieses Kapitels wurden generell Bodenbedingungen ( $H=0$  Fuß) der Anströmung verwendet. Das heißt  $p_\infty=101325$  Pa,  $\rho_\infty=1,225$  kg·m<sup>-3</sup>,  $T_\infty=288,15$  K,  $\nu_\infty=14,6 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s

und  $\mu_\infty=17,89 \cdot 10^{-6}$  kg/(m·s). Nun werden zwei Druckverlustcharakteristiken mit unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten unter Reiseflugbedingungen bei  $H=31000$  Fuß betrachtet. Das bedeutet  $p_\infty=28805$  Pa,  $\rho_\infty=0,4424$  kg·m<sup>-3</sup>,  $T_\infty=226,8$  K,  $v_\infty = 33,385 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s und  $\mu_\infty=14,77 \cdot 10^{-6}$  kg/(m·s). Diese zwei Druckverlustcharakteristiken werden mit denen bei Bodenbedingungen verglichen. In Abbildung 21 ist dieser Vergleich auch mit zugehörigen linearen Ansätzen nach Hagen-Poiseuille gezeigt. Die Anströmmachzahlen unterscheiden sich zwischen den beiden Parametergruppen bei  $Ma_\infty=0,13-0,8$  und  $Ma_\infty=0,11-0,7$ , die so gewählt wurden, dass der absolute Unterschied in der Grenzschicht-randgeschwindigkeit in m/s gleich bleibt, das heißt konkret:  $\Delta U_\infty=200$ m/s. Die Charakteristiken bei Bodenbedingungen zeigen höhere Druckverluste, da die dynamische Viskosität  $\mu$  größer ist, so dass sich die Steigung der Kurve nach dem Hagen-Poiseuille-Gesetz aus Gleichung (1) vergrößert. Bei Reiseflugbedingungen zeigen die Ergebnisse nahezu keine Unterschiede zwischen beiden Anströmgeschwindigkeiten. Diese Fälle haben eine höhere kinematische Viskosität  $\nu$  und somit niedrigere Bohrungsreynoldszahlen  $Re_d$ . Das bedeutet einen geringeren Einfluss der Außengrenzschicht bei gleichem Geschwindigkeitsprofil auf Druckverluste in der Bohrung unter Reiseflugbedingungen.

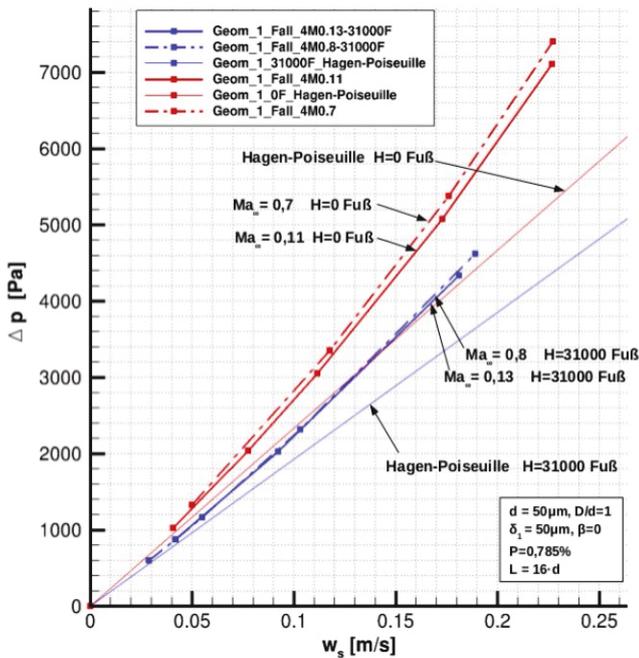
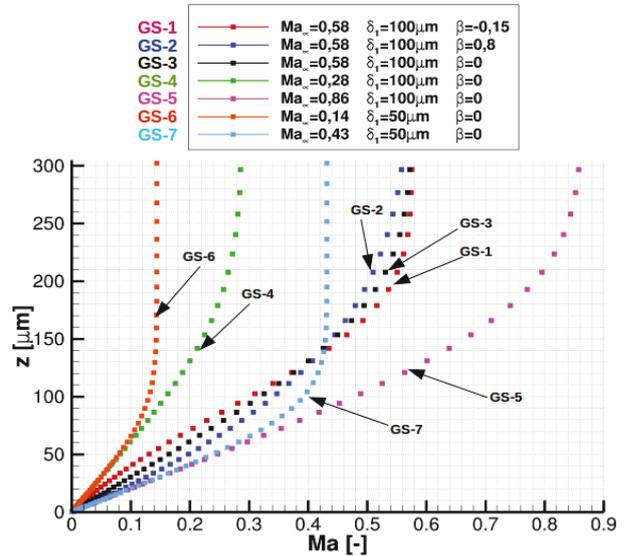


BILD 21. Druckverlustcharakteristiken unter Bodenbedingungen und im Reiseflug

### 3.8. Einfluss der Form des Außengrenzschichtprofils

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Grenzschicht-randgeschwindigkeit, des Hartree-Parameters  $\beta$  aus der Falkner-Skan-Gleichung und der Verdrängungsdicke auf Druckverluste bei einer fixen Bohrungsgeometrie betrachtet. Verwendet wird die Geometrie mit einem Durchmesser von  $d=100\mu\text{m}$ , für die sichtbare zusätzliche Druckverluste aufgrund der Außengrenzschicht auftreten. Die dabei verwendeten

Außengrenzschichtprofile GS-1 – GS-7 sind in Bild 22 aufgetragen. Aus den Druckverlustcharakteristiken in Bild 23 ist zu ersehen, dass der bestimmende Parameter der Außengrenzschicht für die zusätzlichen Druckverluste, die Fülligkeit der Grenzschicht in der Nähe der Außenwand ist. Je fülliger, desto höhere Druckverluste



treten auf.

BILD 22. Grenzschichtprofile verschiedener Form und Verdrängungsdicke

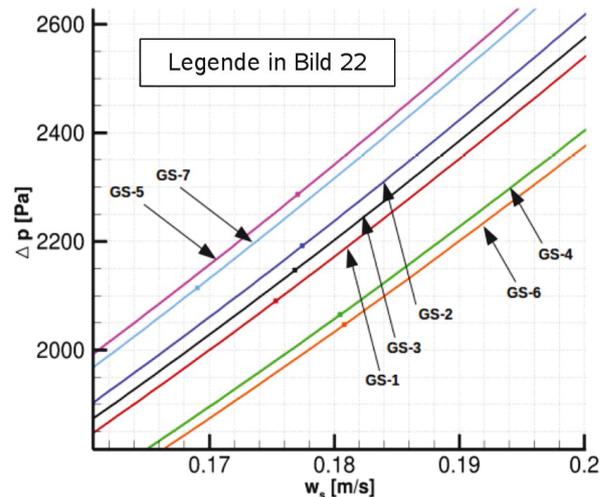


BILD 23. Druckverlustcharakteristiken für die Außengrenzschichten aus Bild 22.

### 3.9. Gegenläufige Wirbel innerhalb der Bohrung während der Grenzschichtabsaugung

Bild 24 zeigt die sekundäre Strömung von gegenläufig rotierenden Wirbeln innerhalb der Bohrung, die neben Ablösungsgebieten die Entstehung von zusätzlichen Druckverlusten in der Rohrströmung verursacht. Bei der Absaugung der Grenzschicht bildet sich aufgrund der Krümmung der abgesaugten Stromlinien und aufgrund der einhergehenden Zentrifugalkräfte, ein radialer Druckgradient am Bohrungseinlass. Das resultiert in der Entstehung eines Bereichs mit höherem Druck an der Hinterkante der Bohrung (siehe Bild 24). Die im Stromabereich der Bohrung ankommende Strömung verläuft aufgrund der Druckgradienten entlang der Wand zurück zur Vorderseite, wo ein niedrigerer Druck herrscht. Dadurch entstehen zwei gegenläufigen Wirbel in der Bohrung, die sekundäre Strömung oder auch Dean-Wirbel genannt werden. Solche Wirbel treten auch bei Rohrströmungen mit Krümmung auf und ergeben erhöhte lokale Geschwindigkeiten in der Bohrung sowie eine vergrößerte Wandschubspannung und zusätzliche Druckverluste. Dean-Wirbel lassen mit der Entfernung vom Bohrungseinlass nach. Ihre Intensität hängt vom Außengrenzschichtzustand, deren Fülligkeit und der Bohrungsreynoldszahl  $Re_d$  ab.

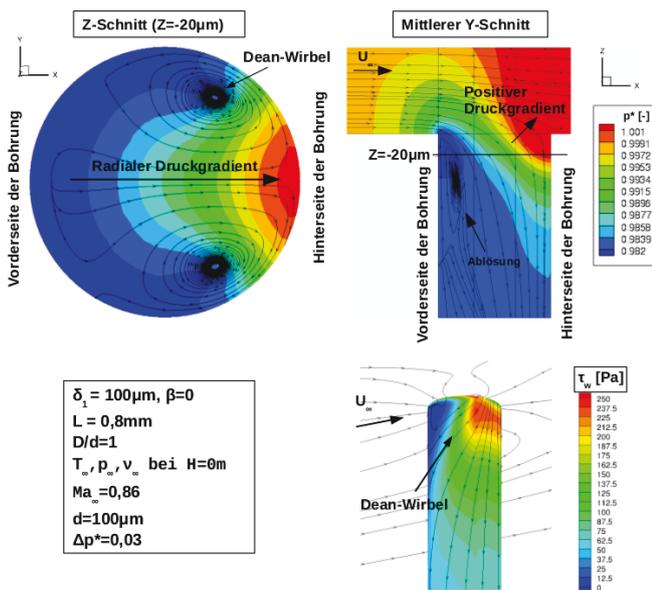


BILD 24. Radialer Druckgradient und Dean-Wirbel innerhalb der Bohrung bei Grenzschicht

### 3.10. Druckverluste im kritischen Fall bei Reiseflugbedingungen

Schließlich wurden durch die Außengrenzschicht verursachte zusätzliche Druckverluste in einem kritischen Fall der Absaugung unter Reiseflugbedingungen untersucht. Es wird eine typische Bohrungsgeometrie des aktuellen DLR-HLFC-Systems verwendet. Das heißt der Bohrungsdurchmesser beträgt  $d=50\mu\text{m}$  und die Bohrungstiefe  $L=0,8\text{mm}$ . Die Konizität der Bohrung beträgt  $D/d=1,4$  und die Porosität  $P=0,785\%$ . Die Außengrenzschicht hat eine Verdrängungsdicke  $\delta_1$  von  $50\mu\text{m}$ . Das heißt es handelt sich um den kritischsten

laminaren Grenzschichtzustand mit Absaugung an der Vorderkante des Leitwerksprofils aus VER<sup>2</sup>SUS-Messungen. Diese Windkanalmessungen wurden bei Reiseflugreynoldszahl durchgeführt, so dass die Grenzschichtdicken dem Reiseflug entsprechen. Die Machzahl der Grenzschichttrandgeschwindigkeit wird für die Simulation auf  $Ma_\infty=0,8$  eingestellt. Für die Falkner-Skan Außengrenzschicht wird der Hartree-Parameter  $\beta=0,9$  verwendet, so dass sich ein fülligeres GS-Profil ergibt. Die Veränderung der Dichte und weiteren Zustandsgrößen am Profil wird nicht berücksichtigt.

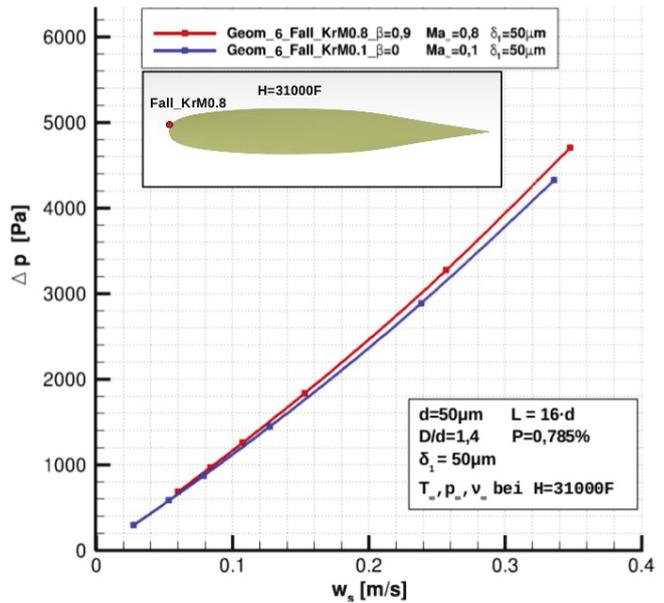


BILD 25. Druckverlustcharakteristik für den Kritischen Absaugungsfall im Reiseflug

Die maximale mittlere Absauggeschwindigkeit an der Vorderkante für VER<sup>2</sup>SUS-Messungen betrug nominell  $w_s=0,15\text{m/s}$ . Um den gleichen Absaugkoeffizienten  $c_q$  zu gewährleisten, müssen im Reiseflug höhere Absauggeschwindigkeiten  $w_s$  eingestellt werden. Dann liegt der höchste Wert im Bereich von  $w_s = 0,35\text{m/s}$ . Die Absauggeschwindigkeiten können sich für andere Flugzustände, HLFC-Geometrien oder Sammelkammerdrücke ändern, so dass sich auch die Dicke und Fülligkeit der Außengrenzschicht ändert. In Bild 25 sind zwei Druckverlustcharakteristiken dieses kritischen Falls unter Reiseflugbedingungen mit  $Ma_\infty=0,1$  für  $\beta=0$ , und  $Ma_\infty=0,8$  für  $\beta=0,9$  aufgetragen. Es ist nur ein geringer Einfluss der Außengrenzschicht auf Druckverluste vor allem bei höheren Absauggeschwindigkeiten erkennbar. Das heißt, dass gemäß den Simulationsergebnissen für die Grenzschichtabsaugung am Seitenleitwerk eines Airbus A320 im Reiseflug bei der verwendeten Bohrungsgeometrie nur kleine zusätzliche durch die Außengrenzschicht verursachte Druckverluste der Mikroperforation im Nasenbereich erwartet werden. Diese Treten in Bereichen auf, in denen sich eine dünne Grenzschicht und große Absauggeschwindigkeiten  $w_s$  bis zu  $0,35\text{m/s}$  ergeben.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Studie wurde die Strömung periodischer Absaugbohrungen einer HLFC-Mikroperforation ohne Absaugkammer mit Hilfe des DLR CFD-Lösers FLOWer numerisch simuliert. Aus den Simulationsergebnissen ließen sich Druckverlustcharakteristiken erstellen und somit Abhängigkeiten der Druckverluste innerhalb der Bohrung von der Absauggeschwindigkeit ableiten. Das Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der zusätzlichen Bohrungsdruckverluste durch die Außengrenzschicht, die im realen Flug auf der Außenseite der mikroperforierten Fläche auftritt. In Experimentellen Messungen mit dem LFM im VER<sup>2</sup>SUS-Projekt [3] wurden solche Einflüsse der Außengrenzschicht bisher nicht berücksichtigt, da diese Messungen unter Bedingungen ruhender Umgebungsluft durchgeführt werden.

Die numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere die Fülligkeit der Außengrenzschicht in Nähe der Außenwand und die Bohrungsreynoldszahl  $Re_d$  die durch die Außengrenzschicht verursachten zusätzlichen Druckverluste der Absaugung-Mikroperforation bestimmt. Das bedeutet, je größer die Fülligkeit der Außengrenzschicht oder je größer die Reynoldszahl  $Re_d$ , desto höher sind zusätzliche Druckverluste. Eine ähnliche Reynoldszahl-Abhängigkeit solcher zusätzlichen Druckverluste ist in Rohrströmungen mit Umlenkung zu beobachten [6]. Beide Fälle, das heißt die Grenzschichtabsaugung durch eine Bohrung und die Rohrströmung mit Krümmung, verhalten sich ähnlich, was zusätzliche Druckverluste betrifft. Zusätzliche Druckverluste in der Bohrung mit Außengrenzschicht sind abgesehen von Ablösungen im Einlass durch gegenläufige Wirbel am Beginn der Bohrung verursacht. Sie erhöhen lokale Geschwindigkeiten und damit auch Wandschubspannungen und Druckverluste in der Bohrung. Je höher die Bohrungsreynoldszahl, desto stärker sind diese Wirbel im Fall der Präsenz einer Außengrenzschicht ausgeprägt.

Zuletzt wurde ein kritischer Fall von Absaugung an der Vorderkante des Flügelprofils unter Reiseflugbedingungen mit einer typischen Bohrungsgeometrie der gängigen HLFC-Systeme untersucht. Bis zur mittleren Absauggeschwindigkeit  $w_s=0,35\text{m/s}$  zeigten sich für diesen Fall nur geringe zusätzliche Druckverluste.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen lassen sich in zukünftigen Studien unter anderem durch Windkanal-messungen überprüfen. Der Einfluss von Geometrieunregelmäßigkeiten oder gegenseitigen Interaktionen zwischen Bohrungen auf zusätzliche Druckverluste wurde hier nicht untersucht.

Die Ergebnisse dieser numerischen Studie belegen, dass die Außengrenzschicht bei üblichen Absauggeschwindigkeiten und Perforations-Geometrien unter Reiseflugbedingungen keine signifikanten zusätzlichen Druckverluste verursacht. Gleiches zeigt sich in direkten Vergleichen zwischen Absaug-Strömungen unter LFM-Bedingungen und mit Außengrenzschicht.

Im Fall einer experimentellen Bestätigung dieser Ergebnisse, lassen sich für die Charakterisierung von HLFC-Systemen der gezeigten Geometrien auch weiterhin Messungen von Absaugblechen mit einem Laminar-Flow Meter ohne Berücksichtigung der Außengrenzschicht einsetzen.

[1] Aumann, P. ; Bartelheimer, W. : FLOWer Installation and User Manual. DLR. 2008.1.

[2] Bauer, M. : Simulation von Absaugbohrungen für Laminartechnologien unter Berücksichtigung der Anström-Grenzschicht. Masterarbeit, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Braunschweig, 2017.

[3] Geyr, H. : Abschlussbericht VER<sup>2</sup>SUS. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Braunschweig, 2015.

[4] Seitz, A. : Gebrauchsmuster, Bezeichnung: Messkörper, Durchflussmesssystem und Computerprogramm dafür, Stichwort: Laminar - Durchflussmessgerät,. International Patent Classification (IPC): G01F 1/34 Eintragungs -Nr.: 20 2014 104 037, Tag der Eintragung: 04.12.2015.

[5] Goldstein, S. : Modern development in fluid dynamics, volume 1. Clarendon press, Oxford, 1937.

[6] Pantokratoras, A. : Steady laminar flow in a 90° bend. School of Engineering, Democritus University of Thrace, 2016.