

Optimale Strukturen

Bionische Flügelkonstruktionen in der Luftfahrt

Text: Felix Schaller

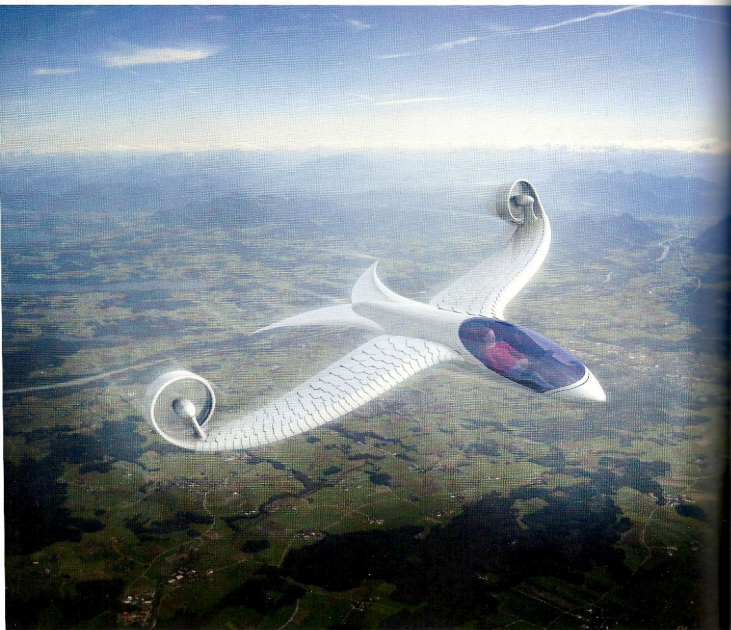
Der Traum vom Fliegen fasziniert die Menschheit schon seit Jahrtausenden. Sowohl in der Antike als auch in der Neuzeit unternahmen große Denker ihrer Zeit Versuche, den Flug von Vögeln nachzuahmen. Doch ohne Ausnahme konnte zu ihren Lebzeiten kein Versuch dokumentiert werden, der das Flugprinzip „schwerer als Luft“ gelingen ließ.

Seit etwas mehr als einem Jahrhundert gelingt es der Menschheit, effektiv mit Fluggeräten vom Boden abzuheben. Seither wurden eine Vielzahl an aerodynamischen Gesetzen gefunden, anhand derer das Flugprinzip weiter verbessert wurde. Auch wenn mittlerweile über die derzeitige Konstruktionsweise von Flugzeugen ein enormer Wissensstand geschaffen wurde, bewegt sich deren technische Anwendung noch weit von der Effizienz entfernt, wie es die Natur vormacht. Diese Arbeit gibt sich aber mit

diesem Defizit nicht zufrieden. Deswegen wurde der aktuelle aerodynamische Wissensstand neu hinterfragt, über die Ergebnisse berichtet dieser Artikel.

Vorüberlegungen

Obwohl sich in der heutigen Zeit Strömungsverhalten mit den verschiedensten numerischen Verfahren auf Basis der Navier Stokes-Gleichung simulieren lässt, liefern diese numerischen Verfahren nur wenige bis gar keine analyti-



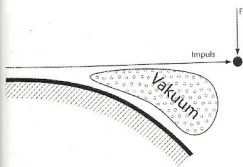
schen Größen
stellung m
Daher hem
nach welch
lich zu Sta

Lange Zeit
Bernoulli S
ihrer Einfac
Dabei hält
eine besond
gesetzes. In
längeren W
auf der Ob
muss, dam
Unterseite
dann der U
klären. In d
langem Ab
gen Zeit po
eine Rolle s

Es gibt heut
die allesam
den Auftrieb
Martin Will
Nachteil all
nologisch u
können, da
elementare
der Mechan
kommen da
Auftrieb me
zu erklären
David W. A
„Unterstan
sche Mecha
war, muss s

Gedanke

Der analyt
ist in der L
darüber ein
Beitrag nach
3. newtonsc
nungsweise
Gegenkraft
der Unterse
um Gesam
recherche bi
Ablenkung
Drucks. Wie
Newton beg
Becherche n



Ändert sich während des Wegs der Umströmung die Tangente der Oberfläche, sodass sich eine konvexe Krümmung ergibt, wird zwischen der geradlinigen und trägen Bewegung der Luft und der Oberfläche ein Volumen frei

schen Gründe für den Auftrieb, weil sie der Problemstellung mathematisch auf ganz andere Weise begegnen. Daher herrschen auch bis heute heftige Debatten darüber, nach welchem physikalischen Gesetz der Auftrieb eigentlich zu Stande kommt.

Lange Zeit war die Lauflängen-Theorie auf der Basis des Bernoulli Strömungsgesetzes sehr populär, sodass sie wegen ihrer Einfachheit auch Einzug bis in die Schulbücher fand. Dabei hält sich nach wie vor, speziell in letzterer Literatur, eine besonders prominente Fehlinterpretation des Strömungsgesetzes. In dieser wird angenommen, dass aufgrund des längeren Weges über die obere Tragflächenseite die Luft auf der Oberfläche mit höherer Geschwindigkeit passieren muss, damit sie wieder gleichzeitig mit der Luft auf der Unterseite zusammentrifft. Daraus soll sich nach Bernoulli dann der Unterdruck als resultierende Auftriebskraft erklären. In der Forschung hat man von dieser Theorie seit langem Abstand genommen. Deswegen wird in der heutigen Zeit postuliert, dass Bernoulli bei dem Auftrieb zwar eine Rolle spielt, aber eher eine untergeordnete.

Es gibt heutzutage noch eine ganze Reihe anderer Theorien, die allesamt jeweils ein mathematisches Modell liefern, um den Auftrieb zu beschreiben, wie zum Beispiel die von Martin Wilhelm Kutta entwickelte Rotationstheorie. Der Nachteil aller ist jedoch der, dass sie meist nur phänomenologisch und extrem idealisierte Zustände beschreiben können, das heißt diese Theorien basieren nicht auf einer elementaren Physik, wie das zum Beispiel mit Newton in der Mechanik der Fall ist. Gerade in den letzten Jahren kommen daher vermehrt Überlegungen auf, welche den Auftrieb mechanisch mittels der newtonschen Axiome zu erklären versuchen. Diesem Modell gehen zum Beispiel David W. Anderson und Scott Eberhardt in ihrem Buch „Understanding Flight“ nach. Da ursprünglich die newtonsche Mechanik nur für starre und autarke Körper gedacht war, muss sie nun demzufolge auf Fluide erweitert werden.

Gedankenspiele

Der analytische Ansatz der Auftriebstheorie nach Newton ist in der Literatur heute so weit entwickelt, dass man sich darüber einig ist, dass die Luftmasse hinter dem Flügel im Betrag nach unten beschleunigt werden muss. Nach dem 3. newtonschen Gesetz des Kräftegleichgewichts beziehungsweise der Impulserhaltung entsteht dadurch als Gegenkraft der Auftrieb. Dabei spielt die Oberfläche auf der Unterseite des Flügels eine weitaus geringere Rolle am Gesamtergebnis als die der Oberseite. Die Literaturrecherche bietet soweit zwar eine Begründung für die Ablenkung der Luft nach unten aufgrund des anliegenden Drucks. Wie sich dieser wiederum mechanisch nach Newton begründet, wird bisher auch nach gründlicher Recherche noch nicht weiter ausgeführt.

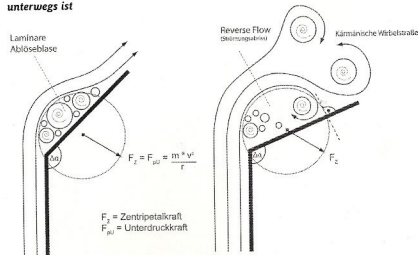
Damit man aber ein schönes, mechanisch ableitbares Modell erhält mit dem man arbeiten kann, muss auch eine Begründung für den Druck gemäß den newtonschen Axiomen geschaffen werden. Daher im Folgenden ein kleines Gedankenexperiment: Beim Fliegen bewegt sich der Flügel durch ein Gas, das unter zirka 1 bar Druck steht. Die Luftteilchen passieren zunächst die Oberfläche tangential. Ändert sich aber nun während des Wegs der Umströmung die Tangente der Oberfläche, sodass sich eine konvexe Krümmung ergibt, wird zwischen der geradlinigen und trägen Bewegung der Luft und der Oberfläche ein Volumen frei. Würde die Luft nun unter keinem Druck stehen, so würde sich dazwischen einfach ein Vakuum ausbreiten.

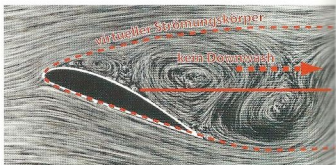
Da sich der Flügel aber in einem Gas mit Druck > 0 bewegt, beschleunigt das vorhandene Druckpotenzial die Luftteilchen zurück an die Oberfläche. Da diese Beschleunigung gemäß des 2. newtonschen Gesetzes gegen die eigene Trägheit der Luft aufgebracht werden muss, wird diese Beschleunigung aus dem Druckpotenzial entnommen. In der Folge sinkt der Druck und als Gegenkraft zum Unterdruck wirkt eine Kraft auf die Oberfläche, die sich dann als Auftrieb äußert.

Strömungslinien

Aus eingehenden Studien im Windkanal weiß man jedoch, dass dieser Auftriebs effekt sehr sensibel ist. Stellt man die Tragfläche so stark in den Wind, passiert bei kontinuierlichem Erhöhen des Anstellwinkels irgendwann ein Strömungsabriss. Was dabei mechanisch passiert, kann folgendermaßen gut mit Newton am Conda-Effekt erklärt werden: Aufgrund dem bereits erwähnten 2. newtonschen Axiom der Trägheit kann ein bewegter Körper keine abrupte Richtungsänderung erfahren, sondern erfährt dies idealerweise immer auf einer stetigen Kreisbahn. Die Luft umströmt also die konvexe Oberfläche und wird aufgrund der Trägheit mit leichtem Versatz mitgezogen. Das Ziel eines jeden mechanischen Systems ist, einen Kräfteausgleich herzustellen. Der Luft gelingt dies aber hier nicht, da sie mit einer derart hohen Geschwindigkeit über die Oberfläche unterwegs ist, dass diese zunächst bei kleinen Änderungen der Krümmung einen zu großen Kurvenradius benötigen würde, um in die noch relativ schmale „Lücke“, die in Form einer Unterdruckblase anliegt, einzuströmen. Stattdessen wird sie vom Unterdruck wieder an die Oberfläche gezogen und muss sich zunächst wieder mit der Strömung laminar anlegen.

Das Ziel eines jeden mechanischen Systems ist, ein Kräfteausgleich herzustellen. Der Luft gelingt dies aber hier nicht, da sie mit einer derart hohen Geschwindigkeit über die Oberfläche unterwegs ist





Der Downwash, die Impulsänderung der Luft nach unten, kann bei einem hohen Anstellwinkel nicht weiter gewährleistet werden. Hinter dem Tragflächenende wird keine Impulsänderung mehr erreicht und daher geht die Gegenkraft als Resultat des Auftriebs verloren

Erst wenn sich die Oberflächentangente über den Weg so stark ändert, dass aufgrund der Trägheit die Luft nicht mehr schnell genug an die Oberfläche zurück beschleunigt werden kann, so entsteht eine derart große Unterdruckblase im Zwischenraum, dass sie es in diesem Abstand schafft auf einem ausreichend großen Kurvenradius in die Unterdruckblase einzuströmen und einen Druckausgleich herzustellen.

Die bis dahin an der Oberfläche anliegende Unterdruckblase kollabiert und wird von der Oberfläche in einem Wirbel abgelöst. Dieses Kollabieren macht sich prompt durch einen Strömungsabriss bemerkbar. Das Flugzeug ist dadurch absturzgefährdet.

Dieses Zurückströmen der Luft in den Unterdruckbereich nennt man auch „Reverse Flow“. Beim kompletten Strömungsabriss strömt ebenso Luft von der Unterseite in den Unterdruckbereich ein. Der „Downwash“, sprich die Impulsänderung der Luft nach unten, kann nicht weiter gewährleistet werden. Hinter dem Tragflächenende wird im Betrag keine Impulsänderung mehr erreicht und daher geht die Gegenkraft als Resultat des Auftriebs verloren. Übrig bleibt lediglich ein turbulenter Luftwiderstand.

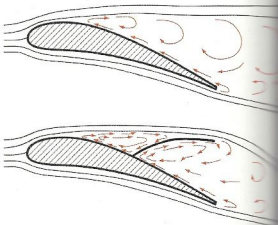
Vogelflug

Dass jedoch Vögel dieses Rückströmen durch passives Anheben ihrer Deckledern unterbinden können, ist der Forschung schon eine Zeit lang bekannt. Dabei strömt die laminare Luft über die Oberseite der Feder, während der Reverse Flow unter die Feder strömen muss. Dadurch wird die Unterdruckblase vor dem Kollabieren geschützt. Das Bionik Institut der Technischen Universität Berlin hat bereits Mitte der 1990er-Jahre Studien mit Rückstromklappen, die an der Flügelmitte angebracht werden, durchgeführt, um dieses Verhalten nachzubilden.

Praktisch lässt sich das in diesem Artikel dargestellte Konzept der Bionik an einem Elektroregler demonstrieren

Weitere Institute sowie das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) haben in der Zwischenzeit darauf aufbauend weitere Modell- als auch CFD-Studien durchgeführt, die die Ergebnisse der Berliner Untersuchung zum großen Teil bestätigten. Sie weisen in der bis dahin angewendeten Form zwar ein verbessertes Abrissverhalten auf, jedoch nur bis zu dem Grad, bei der eine Klappe in die laminare Strömung ragt. Allerdings zeigte sich bei den meisten Studien ein unvorteilhaftes Aufwölben dieser Klappen, die dadurch zu einer ungünstigeren Stromlinienform führten. Analysiert man nun die Hintergründe der ungünstigen Aufwölbung der Klappen, so kann nach Newton begründet werden, dass dieser Effekt, wie bereits geschildert, durch die Trägheit der Luft zustande kommen muss, da die Luft sich der Ablenkung an der Oberfläche widersetzt. Als Reaktion werden stattdessen die Elemente in die Strömung gezogen.

Klappen sind dazu in der Lage, das Abrissverhalten deutlich zu verbessern. Das geht jedoch auf Kosten der Aerodynamik





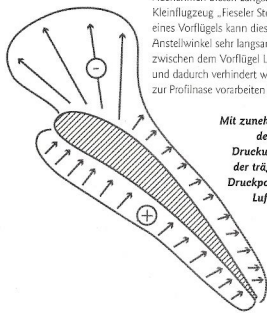
Vögel sind in der Lage das Abrissverhalten durch passives Anheben ihrer Deckfedern zu unterbinden

Dieses Verhalten an der Nase zeigt zudem, wie wichtig es hier ist, eine saubere Strömungskontrolle zu gewährleisten. Anders als bei bisherigen Untersuchungen mit beweglichen Klappen-Elementen, die sich mit Aufbauten im hinteren Teil des Profils zufriedengaben, soll anhand dieser Erklärung begründet werden, warum es wichtig ist, mit dynamischer Regelung der Oberflächenströmung bereits an der Profilnase anzusetzen. Hierzu ein Vergleich mit konventionellen Profilen: Starre Flügelprofile werden generell so konstruiert, dass man eine konstante Form gestaltet, die die vorgesehenen Anforderungen breit genug abdeckt, damit sie in den entsprechenden Einsatzbereichen akzeptable Leistungen bringt.

Man kann an diesem Beispiel schön zeigen, dass es nicht funktioniert die Strömungsmechanik am Flügel nur aufgrund von konstantem Unterdruck zu beschreiben, wie dies gerne mit Bernoulli begründet wird, sondern sich stattdessen in der Strömung ein mechanisches Kräftegleichgewicht zwischen Strömungsimpuls und ablenkendem Unterdruck einstellt. Diese Grenze definiert einen virtuellen Strömungskörper, der in Windkanalstudien deutlich zu erkennen ist. Wird diese Form von der Oberfläche nicht angenähert, wird der Zwischenraum mit teils turbulenter Grenzschicht gefüllt. Gibt die Oberfläche aber den Trägheitseffekten der Luft nach, weil sie zum Beispiel aus flexiblen Elementen besteht, wird diese bis zu dieser virtuellen Grenze in die Strömung gezogen – aber nicht weiter.

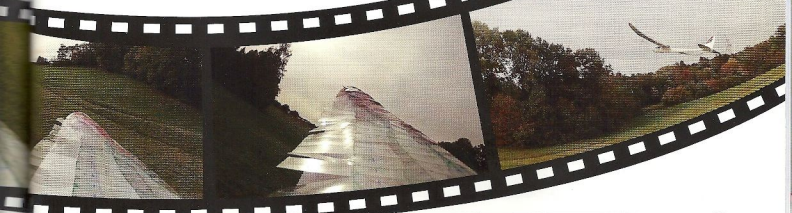
Druckeinflüsse

Zum weiteren Verständnis der Zusammenhänge hilft auch das Druckprofil einer stark angestellten Tragfläche in den kritischen Bereich von $\alpha_{Ca_{max}}$, die deutlich jene Trägheits-Charakteristika zeigt, indem sich der Druck immer mehr an der Profilnase konzentriert: Mit zunehmender Richtungsänderung der Oberfläche erhöht sich der Druckgradient als Resultierende der trägen Ablenkung, solange das Druckpotenzial ausreicht, damit die Luft noch zurück an die Fläche beschleunigt werden kann. Entsprechend werden die Ablenkungsradien mit steigendem Unterdruck kleiner, sodass sich der wirksame Unterdruck immer mehr an der Profilnase konzentriert. Der über den weiteren Flächenverlauf stark normalisierte Druck begründet sich dadurch, dass hier die Luft schon teilweise in den Reverse Flow übergegangen ist und beginnt, sich turbulent abzulösen.



Mit zunehmender Richtungsänderung der Oberfläche erhöht sich der Druckunterschied als Resultierende der trägen Ablenkung, solange das Druckpotenzial ausreicht, damit die Luft noch zurück an die Fläche beschleunigt werden kann

Das Aufstellen der Deckfedern im Modellversuch mit einem Elektrosegler





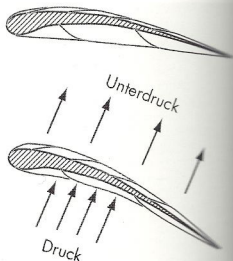
Vorflügel verbessern zwar die Flugeigenschaften bei kritischem Anstellwinkel, sie werden aber nicht ständig gebraucht. Eine regelmäßige Anpassung wäre permanent notwendig, um stets eine optimale Umströmung zu gewährleisten

Vor- und Nachteile

Vorflügel verbessern die Flugeigenschaften im kritischen Re-Bereich zwar hinreichend, sie werden jedoch nicht ständig gebraucht, da sie sich sonst eher nachteilig auf die Aerodynamik auswirken. Zudem erlauben sie auch keine selbständige Anpassung an die Strömungsbedingung. Eine regelmäßige Anpassung wäre aber permanent notwendig, um stets eine optimale Umströmung zu gewährleisten. Dies erfordert aber eine umfangreiche Regelungslogik und -sensorik zur aktiven Strömungskontrolle. Ganz anders verhält es sich jedoch an einer flexiblen Oberfläche. Trägheitseffekte der Luft können eine passive Regelung bei entsprechender Konstruktion von selbst erzeugen. Wie oben bereits angesprochen, wird die Oberfläche nur so weit ausgeformt, bis sie die Grenze des virtuellen Strömungskörpers erreicht hat. Diese Fähigkeit erzeugt damit nicht nur stets die optimale Profilform, sie sorgt auch dafür, dass die Grenzschicht möglichst gering gehalten wird.

Das ideale Verständnis einer laminaren Grenzschichtausbildung ist das zähe Fließen entlang einer flachen Oberfläche. In der Grenzschicht an einem gekrümmten Profil sind jedoch auch mechanische Ausgleichsbewegungen zur fluidodynamischen Kräfte-Statik enthalten, wenn die Oberfläche vom virtuellen Strömungskörper abweicht. Durch die Fähigkeit der Oberfläche diese Form selbständig zu finden, kann dieser Effekt vom regulären Aufdrücken durch Viskosität isoliert werden. Für die reguläre Aufdrückung ist die innere viskose Zähigkeit verantwortlich, bei der die Geschwindigkeit von der Oberfläche weg – idealerweise linear – bis zum Erreichen der Strömungsgeschwindigkeit, zunimmt.

Anders im turbulenten Fall. Bei turbulenter Strömung nimmt die Grenzschicht nahe der Oberfläche schneller die Strömungsgeschwindigkeit an. Daraus lässt sich schließen, dass die Ursachen für turbulenten Widerstand nicht viskoser Natur sind. Dieses unterschiedliche Verhalten ist bis jetzt nur phänomenologisch beschrieben. Eine genaue Begründung für die Ursachen gibt es soweit in der Literatur nicht. Es könnte jedoch gut sein, dass das Verhalten von Turbulenzen eine Art Kugellager-Effekt in Strömung erzeugt. Da Turbulenzen zueinander nicht scheren, rollt die darüber liegende laminare Schicht über die turbulente. Viskoses Scheren in einer Flüssigkeit absorbiert zunächst mehr Energie als die turbulente Bewegung, welche sich jedoch wiederum schneller verstärkt und durch Absorption von Energie in Wirbel bremst. Daher wäre es, wie einige Experimente am



Bei unterschiedlichen Anstellwinkeln wirken unterschiedliche Drücke. (Oben: Normalfluss, unten: Profil bei stärkerer Anströmung)

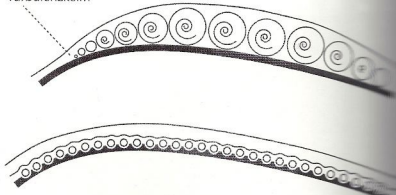
Beispiel Golfball oder Haihäuschhaut belegen, näherliegend Turbulenz bewusst durch regelmäßige Oberflächenstrukturierung an der selbständigen Verstärkung zu hindern und so allein von den mechanischen Vorzeichen der turbulenten Grenzschicht zu profitieren.

Flexibilität

Wird eine flexible Oberfläche zu lange am Stück ausgestaltet, so entsteht an ihrer Oberfläche Flattern. Bestimmt die Oberfläche jedoch aus Einzelelementen mit einer gewissen Erde, so können sich die Wirbel von der Oberfläche durch das dynamische Ausbilden einer Abrisskante von der Oberfläche besser ablösen. Beim Auswölben ergibt sich ebenso die Oberfläche. Wäre diese am Stützgebaut, würden starke Spannkraft die Oberfläche wenn Stofftuch auf Falten und ungünstig verformen. Biegt man die Oberfläche jedoch aus Einzelelementen sind diese kraftstatisch nicht voneinander abhängig.

Viskoses Scheren in einer Flüssigkeit absorbiert zunächst mehr Energie als die turbulente Bewegung, die sich jedoch wiederum schneller verstärkt und durch Absorption von Energie in Wirbel bremst

Turbulenzkeim



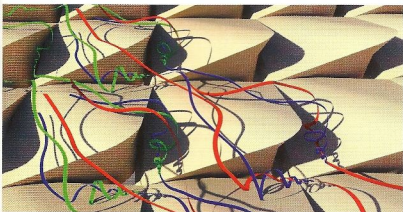
Interessant wird es auch besonders dann, wenn man mit der flexiblen Oberfläche in den Bereich eines Stoßungsabrisse kommt. Durch die starken Druckgradienten insbesondere an der Profilnase, bildet sich ein instabiles Feedback zwischen Strömungsablenkung und Oberflächenkrümmung, das sich selbst verstärkt. Kurz vor dem Überschlagen der Strömung wird das frei bewegliche Bauelemente mitgerissen und dadurch abgehoben. Es entsteht eine Abrisskante mit charakteristischer Wirbelstruktur. Hinter einem Element möchte der Wirbel durch einen

Reverse Flow in den Unterdruckbereich zurück strömen, allerdings versperrt ihm das Element den Weg. Somit bleibt die Unterdruckblase geschützt.

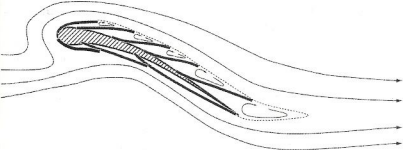
Diese Wirbel wiederum lenken die darüber liegende laminare Strömung durch ihre Bewegung stärker ab. Aufgrund der gespeicherten kinetischen Energie kann es sein, dass der Wirbel eine stärkere Trägheit zu seiner Umgebung besitzt und damit einen komplexen Widerstand darstellt. Durch diese inneren kinetischen Effekte leisten sie einen weiteren Beitrag zum Auftrieb. Generell ziehen Wirbel aus ihrer Umgebung Energie ab. Doch gerade bei extremen Flugmanövern wie zum Beispiel einer Landung, kann man diese Effekte positiv nutzen, indem der auftretende Widerstand, den die Wirbel erzeugen, zur Auftriebssteigerung genutzt werden kann. Da die Energie ja nicht verschwindet bleibt sie als zusätzlicher Betrag in den Wirbeln gespeichert. Dadurch kann man diesen Effekt für extreme Flugmanöver positiv ausnutzen, da dieser ja nur temporär aktiviert wird

Schlussbetrachtung

Eine dynamische Oberfläche hat gegenüber einer starren einen enormen aerodynamischen Vorteil, da sie sich jeder Situation selbständig anpasst und daher nicht auf



Wird eine flexible Oberfläche zu lange am Stück ausgestellt, so entsteht an ihrer Oberfläche Flattern, weil sich selbst verstärkende Wirbel entstehen. Mikroskopische Oberflächenstrukturen aber entspannen die Grenzschicht und nutzen den Vorteil geringerer Grenzschichtreibung im Randbereich turbulenter Grenzschicht. Durch regelmäßige Strukturierung wird die Verstärkung der Wirbel verhindert



ZUR PERSON

Felix Schaller ist Designer und entwickelt realitätsnahe 3D-Computersimulationen und -animationen für grafische Anwendungen. Seine intensive Auseinandersetzung mit seinem Spezialgebiet der Computer generierten Flüssigkeits-Effekte inspirierte ihn zu der Entwicklung von dynamischen Strömungsoberflächen. Das Thema hat er erstmals im März 2012 im Shaker Verlag publiziert. Es folgten Versuche an Modellflugzeugen mit Hochgeschwindigkeitskameras, die die theoretischen Ergebnisse im Modell bestätigten. Die Erfolge seiner Arbeit brachten ihm im November 2012 die begehrte Trophäe des Queckenker-Awards in der Kategorie „Erfinder“ ein.

Leistungstoleranzen ausgelegt werden muss. Die Oberfläche optimiert sich in jeder Situation selbständig. Selbst über die reine Form hinaus sind dynamische Anpassungsmöglichkeiten gegeben, wo sich im Extremfall die Elemente abheben lassen und so frühzeitig Strömungsabriss verhindern können, indem sie die Unterdruckblasen schützen. Auch wenn noch nicht vollständig belegt, würden bei kritischen Anstellwinkeln die ausgelösten Wirbel den Auftrieb signifikant erhöhen, da sie Energie aus der umliegenden Strömung absorbieren und in inneren Drehimpuls umwandeln, welcher sich Trägheits-erhöhend auswirkt.

Selbst zur Widerstandsminderung würde eine dynamisch verformbare Oberfläche einen großen Beitrag leisten, indem sie die Grenzschicht optimieren kann. Eine zusätzliche regelmäßige Oberflächenstruktur könnte die Reibungsmindernden Eigenschaften gleichmäßiger Turbulenzen nutzen. Alles in allem damit Fliegen nicht nur sicherer, sondern um ein vielfaches energiesparender zu machen. Vorstellbar wären damit Flugzeuge, die im Vergleich zu heutigen Flugzeugen einen minimalen Landeweg bräuchten. Dieser wäre theoretisch bis hin zu Punktlandung steigbar, da sie abrupte Bremsmanöver vor der Landung ohne die drohende Gefahr eines Strömungsabrisse bereits in der Luft ausführen könnten. Gleichzeitig wären diese Flugzeuge wesentlich sparsamer als heutige und würden damit einen großen Beitrag zu einer ökologischeren Luftfahrt leisten.

Flexible Oberflächen – angelehnt an das Deckgefieder von Vögeln – sind ein probates Mittel, um Auftrieb zu erzeugen

Anzeige



menZ PROP E

menZ HOLZ-PROP
www.Menz-Prop.de

*** NEU *** NEU *** NEU ***
optimiert für den Elektroantrieb in Größen von 15" bis 30"
Einzelheiten finden Sie auf unserer Homepage.

Menz Prop GmbH & Co.KG, Dammersbacher Str. 34, 36088 Hünfeld
Tel.: 06652/747126, Fax 06652/747127, E-Mail: info@menz-prop.de