

## Modellflug mit Blasturbulatoren

MIBB - Strömungsingenieur

Beitrag zum ISF-Seminar von Detlev Schwetzler

### Einleitung

Ein wesentlicher Faktor bei der Auslegung von Modellsegelflugzeugen ist die Profilwahl. Beschäftigt man sich intensiv mit den Profilleistungsdaten, den Profilpolaren, so wird man einen Unterschied zwischen den theoretischen (errechneten) und den im Windkanal vermessenen Daten feststellen.

Der Grund dafür ist einem Effekt zuzuschreiben, welcher bei den im Modellflug üblichen Reynoldsschen Zahlen auftritt, der *laminaren Ablöseblase*.

Diese "aerodynamische Leistungsbremse" ist wiederholt in der Modellbauliteratur beschrieben worden. Zum Verständnis des eigentlichen Aufsatzthemas möchte ich dennoch eine kurze Gedächtnisauffrischung ermöglichen.

### Der physikalische Hintergrund

Überstreicht Luft einen Körper, so haften die wandnächsten Moleküle an der Oberfläche. Die oberhalb liegenden Luftschichten gleiten mit in der Höhe zunehmender Geschwindigkeit darüber hinweg bis etwas von der Wand entfernt der ursprüngliche Wert erreicht wird. Diesen Bereich nennt man die *Grenzschicht*.

Diese Grenzschicht kommt in zwei Zuständen vor, *laminar* und *turbulent*.

Die laminare Form erzeugt nur geringen Reibungswiderstand, kann jedoch Profilkonturen nur schwer folgen und löst deshalb leicht von der Oberfläche ab.

Anders die turbulente Grenzschicht. Diese Strömung enthält auch Luftbewegungen quer zur Hauptströmungsrichtung. Dadurch ist ein Energietransport von der "gesunden" Aussenströmung in die abgebremste Grenzschicht möglich. So wird die wandnahe Schicht immer wieder aufgefrischt und kann daher auch um gekrümmte Konturen strömen. Allerdings verursacht diese Grenzschichtstruktur auch deutlich höheren Reibungswiderstand als Laminarströmung.

Wird eine Oberfläche überströmt, so hat die sich bildende Grenzschicht zunächst laminare Struktur. Nach einer gewissen Laufstrecke, deren Länge von der Reynoldsschen Zahl, der Grundturbulenz der anströmenden Luft, der Oberflächenbeschaffenheit sowie den örtlichen Druckverhältnissen abhängt, schlägt die Grenzschicht nach turbulent um.

### Was geschieht am Modellflugzeug?

Bei der Umströmung eines Tragflügels wird die Luft um das Profil zunächst beschleunigt. Zum Profilende hin muß die Strömung wieder abgebremst werden. Ist der Umschlag laminar -> turbulent vor dem Beginn der Verzögerung auf dem Profil, so entstehen keine Probleme. Die Luft kann der Flügelkontur bis zur Hinterkante folgen. Solche Verhältnisse liegen z.B. bei Großflugzeugen vor.

Bei Modellflugzeugen liegen die Verhältnisse aufgrund der kleinen Re-Zahl oft anders. Der Druckanstieg an einem Profil beginnt bevor der Umschlag erfolgt ist. Die Laminarströmung kann dem Profil nicht folgen und löst von der Oberfläche ab. Diese Ablösung kommt bei gebräuchlichen Flügelprofilen und üblichen Anstellwinkeln meist nur auf der Profiloberseite vor, kann bei entsprechenden Druckverhältnissen aber auch

auf der Unterseite auftreten.  
Durch die Ablösung wird in der abgelösten Strömung ein Strömungsumschlag bewirkt. Geschieht dieser Umschlag in der Nähe der Flügeloberfläche, so kann die nun turbulente Strömung sich wieder an das Profil anlegen. Den Bereich der abgelösten Strömung nennt man eine *laminare Ablöseblase*. Diese Strömungsverhältnisse sind für ein Profil mit Ablöseblase auf der Oberseite in Bild 1 dargestellt.

#### Auswirkungen der Blase

Die Folgen einer laminaren Ablöseblase auf die Profildaten kann man so beschreiben:

Theoretische Überlegungen ergeben, daß beim Auftreten der Blase ein geringer Anstieg des Auftriebs feststellbar sein sollte. Die meisten Profilmessungen zeigen dagegen einen kleineren Auftrieb bei zunehmender Blasengröße. Diese Auftriebsänderung wirkt sich störend als Änderung des Nullauftriebswinkels aus, weil bei Modellen mit geringer Flügeltiefe noch im Schnellflug unterkritische Verhältnisse vorliegen können und in diesem Fall die Flügelenden nach unten durchbiegen.

Ansonsten sind die Auswirkungen der Ablöseblase auf den Flügelauftrieb gering.

Ganz anders sieht die Betrachtung in Widerstandsrichtung aus. Hier verursacht dieser Effekt erheblichen Zusatzwiderstand.

Bei im RC-Modellbau üblichen Re-Zahlen kann sich der Profilwiderstand verdoppeln.

Auf Bild 2 sind die Auswirkungen der Ablösung am Beispiel eines Vergleiches von errechneten Polaren des Profils E-193 und einer von mir durchgeführten Messung an einem Modellflügel mit dem Profil E-193/gerade Unterseite erkennbar.

Während die Messung bei einer Re-Zahl von 200000 gut mit der Rechnung übereinstimmt, weichen die cw-Werte mit abnehmender Re-Zahl deutlich von den Rechnungen ab.

In der Praxis führt dieser Widerstandsanstieg bei Modellen mit hoher Streckung zu schlechten Flugleistungen bei mittleren Fluggeschwindigkeiten. Solche Modelle sind dennoch recht leistungsfähig im Langsamflug, weil, wie in Bild 2 erkennbar, selbst bei kleinen Re-Zahlen der Grenzschichtumschlag laminar -> turbulent im Bereich des Maximalauftriebs schon an der Profilnase geschieht und die Ablöseblase sehr klein ist. Das äußert sich in geringem Luftwiderstand.

Mit diesem Exkurs zu dem physikalischen Problem beim Modellsegler stellen wir jetzt die Frage:

#### Was kann man gegen die Blasenwiderstände tun?

Das einfachste Mittel gegen die Zusatzwiderstände ist, den Grenzschichtumschlag auf dem Profil herbeizuführen bevor eine laminare Ablösung auftreten kann.

Dies gelingt bei Modellflugprofilen nicht durch die Formgebung des Profils. Also verwenden manche Modellflieger künstliche "Stolperkanten" für den Umschlag der Grenzschicht, sogenannte Turbulatoren. Bei richtiger Größe und Lage bewirken solche Maßnahmen den gewünschten Effekt. Leider ist für das richtige Anbringen solcher Mittel viel Erfahrung nötig. Außerdem können diese Turbulatoren nicht bei allen Anstellwinkeln funktionieren. Im Schnellflug ist sogar mit Zusatzwiderstand zu rechnen.

Wünschenswert ist also eine Einrichtung die eine Ablösung verhindert, jedoch abschaltbar ist, wenn sie nicht gebraucht

wird. Diese Möglichkeit gibt es seit einigen Jahren bei den großen Brüdern der Modellsegler, den Segelflugzeugen. Das Prinzip heißt *pneumatische Turbulatoren* oder auch *Blasturbulatoren*. Bei dem Verfahren wird die "Stolperkante" für die laminare Grenzschicht durch kleine Luftkugeln erzeugt, welche durch Bohrungen in der Flugzeugoberfläche austreten. Die Ausblaseluft wird einem Stauraum entnommen. Da bei den Großflugzeugen auf der Flügeloberseite durch höhere Re-Zahlen keine Ablöseblase auftritt, werden Blasturbulatoren hier auf der Profilunterseite zur Verbesserung des Profilwiderstandes eingesetzt. Grundsätzlich sollte dieses Verfahren auch an Modellflugzeugen möglich sein.

#### Das Prinzip wird für Modellflugzeuge getestet

Um die Wirkung an Modellflügeln festzustellen, wurden an einem Profilstück im Windkanal zunächst Olanstrichbilder erzeugt. Dazu wurde die Oberfläche mit farbigem Öl eingestrichen und mit dem gewünschten Anstellwinkel im Windkanal angeströmt. So entstanden auf der Modelloberfläche Linien, welche die Ablöseblase sichtbar machten. Auf diese Art und Weise wurde ihre Größe und Lage bei verschiedenen Anstellwinkeln und Re-Zahlen ermittelt (Bild 3).

Überlegungen zur Platzierung der geplanten Ausblaselöcher lieferten das Ergebnis, die Öffnungen etwas vor dem Beginn der Blase anzubringen, da die Löcher einen Abstand voneinander haben müssen und sich die turbulente Störung keilförmig (Keilwinkel ca. 8 Grad) ausbreitet. So vergehen einige Millimeter Lauflänge bis die Keile sich treffen und der Umschlag auf der gesamten Front erfolgt ist.

Da andererseits wegen des geringen Reibungswiderstandes möglichst lange laminare Strömung erwünscht ist, empfiehlt es sich, die Öffnungen nicht zu weit vorne zu bohren. Da die Olbilder zeigten, daß die Blase mit steigendem Anstellwinkel langsam nach vorne wandert, jedoch kurz vor Erreichen des maximalen Auftriebs von ca. 30% der Profiltiefe sprunghaft an die Nase verlagert, entschloss ich mich, die Bohrungen ca. 10 mm vor den Blasenbeginn bei mittleren Anstellwinkeln zu legen. So wurden auf der Oberseite des hohlen Flügelstücks die Ausblaselöcher ( $\varnothing$  0.5 mm, Abstand 3 mm) bei 30% Flügeltiefe angebracht. Als Luftversorgung benutzte ich kein Stauraum, sondern bohrte durch die Flügelunterseite größere, jedoch weniger Löcher ( $\varnothing$  2 mm, Abstand 150 mm). Dadurch nutzt man die unterschiedlichen Druckverhältnisse zwischen Profi-ober- und Unterseite als Luftpumpe. Wenn der Flügel wie im vorliegenden Fall hohl ist, sind keine Einbauten (Leitungen) erforderlich. Zudem erreicht man so ein "abschalten" der Ausblasung im Schnellflug, weil sich die Drücke auf Ober- und Unterseite bei kleinen Anstellwinkeln annähern und so keine Luftversorgung gewährleistet ist. Dadurch wird bei kleinen Anstellwinkeln eine lange laminare Laufstrecke ermöglicht.

Erneute Olanstrichbilder im Windkanal ergaben deutlich den gewünschten Erfolg, die Blase war "weggepustet" (Bild 4). Anschließend wurde an einem anderen Flügelstück mit dem gleichen Profil eine Kraftmessung durchgeführt, die als Ergebnis eine deutliche Verbesserung des Widerstandes durch Ausblasen ergab (Bild 5).

#### Ein Modell mit Löchern

Um festzustellen, ob diese unter "Laborbedingungen" erzeugten Verbesserungen sich auch in der Praxis zeigen,

bauten ich für meinen Elektrosegler ein Paar Turbulatorflächen mit der Flügelstreckung 20. Der Flügel wurde konventionell als Balsa-Rippenbauweise mit Vollbeplankung ausgeführt. In dem Bereich der Ausblasseöffnungen wurde die Konstruktion etwas auf Turbulatoreinsatz zugeschnitten. Etwa 20mm vor dem Kiefernholm wurde ein Hilfsholm aus Balsaholz eingebaut. Die Fläche wurde bis auf den Bereich zwischen diesen Holmen beplankt, und zwar bis jeweils zur Holzmitte. In dem unbepunkteten Bereich wurden zwei Lagen Glasgewebe eingearzt. Nach dem Aushärten füllte ich dieses Gebiet mit Microballons auf und verschliff die Kontur (Bild 6). Diese Mischbauweise erschien mir notwendig, da Holz sehr empfindlich auf Feuchtigkeit reagiert und die Gefahr des Dichtquellens der kleinen Ausblasseöffnungen in Holz besteht. Nach dem Bespannen des Flügels mit Folie entfernte ich am Ort der anzubringenden Turbulatorlöcher einen 5mm tiefen Folienstreifen und bohrte mittels einer Miniaturbohrmaschine die Löcher im Abstand von ca. 3mm frei Hand. Die Versorgungslöcher auf der Flügelunterseite durften direkt durch das Balsaholz gebohrt werden, weil bei dem gewählten Durchmesser von 3mm kaum eine Verstopfung denkbar ist.

Weiter Einbauten sind nicht erforderlich!

Die Flugerprobung des Modells ergab die erhofften Flugleistungen, die ich allerdings wegen fehlender Meßmöglichkeiten nur subjektiv beurteilen kann. Die einzige Meßgröße ist die maximale Flugzeit, welche bei ruhigem Wetter ohne Thermik ca. 25 min, bei stürmischem Wetter immerhin noch etwa 15 min. beträgt. Dies steht gegen die Flugdauer des Vorgängermodells, bei welchem diese Werte etwa 20 min/13 min betrugen. Jenes Modell hatte bei gleicher Flügelfläche und gleicher Flächenbelastung ( $40\text{N/m}^2$ ) eine Streckung von knapp 12, Profil Clark Y, und war damit wegen der großen Flügeltiefe überkritisch ausgelegt. Soviel zu meinen bisherigen Untersuchungen zum Einsatz von pneumatischen Turbulatoren.

Nun möchte ich auf einige Punkte eingehen, die eine intensive Betrachtung verdienen.

#### Ausblasen auf der Profilunterseite

Grundsätzlich kann eine laminare Ablöseblase auch auf der Unterseite eines Profils auftreten. Dies geschieht aber relativ selten, da dies Problem bei kleinen Anstellwinkeln entsteht. Kleine Anstellwinkel bedeuten jedoch hohe Fluggeschwindigkeit und somit große Re-Zahlen. Hierbei ist die Gefahr einer laminaren Ablösung klein. Dennoch gibt es Profile, bei denen wahrscheinlich auf der Unterseite laminare Ablösungen vorkommen. Solche Profile erkennt man an einer kräftigen Hohlkehle im hinteren Bereich der Profilunterseite (z.B. E-211). Auch hier kann ein Blausturbulator helfen. Allerdings kann für die Profilunterseite der Trick mit dem Durchbohren des Flügels zur Luftversorgung nicht angewendet werden. Die Luft wird stattdessen einem Staurohr entnommen. Solch ein Pitotrohr wird etwa 10mm von der Profilunterseite entfernt in der Flügelmitte angebracht und sollte bei üblichen Modellgrößen ca. 10mm Durchmesser haben. Die Luft wird einfach in den möglichst hohlen Flügel geleitet, welcher als Verteiler zu den Ausblaselöchern fungiert. Der Widerstand eines strömungsgünstig verkleideten Rohres

ist in den meisten Fällen gering im Vergleich zur erzielbaren Verbesserung.

### Wo bringt man Ausblasseöffnung an?

Die beste Methode um den günstigsten Ort zu bestimmen, ist ohne Frage ein Windkanalversuch. Dabei kann man wie oben beschrieben die Ablöseblase sichtbar machen und die Lochreihe optimieren.

Eine weiterer Weg ist das Errechnen der Druckverteilung des betrachteten Profils. So kann man die Stelle auf dem Profil erkennen, bei dem je nach Anstellwinkel der Druckanstieg beginnt. Hier ist wie wir uns erinnern die Gefahr einer laminaren Ablösung groß und der Beginn einer Blase möglich. Allerdings gehört Erfahrung und Kenntnis der Strömungslehre dazu, die Blase vorherzusagen.

Da nicht jeder Modellflieger die Möglichkeiten hat die beschriebenen Wege zu gehen, liegt es nahe, eine Faustregel aufzustellen. Solch eine Regel gestattet keine Optimierung des Problems, wird aber bei den gängigen Profilen deutliche Leistungsverbesserungen erlauben.

Für normale Modellgrößen und Profile sind folgende Richtwerte sinnvoll:

#### **Ausblasen auf der Flügeloberseite**

- Lochabstand : 3 mm
- Lochdurchmesser : 0.4 mm *mindestens 0.4  $\Rightarrow$  Verblockung*
- Lage der Öffnungen : 30% der Profiltiefe
- Luftversorgung : Bohrungen durch die Flügelunterseite
  - Durchmesser 3mm
  - Abstand der Löcher 150mm
  - Lage der Bohrungen ca. 20% t

#### **Ausblasen auf der Flügelunterseite**

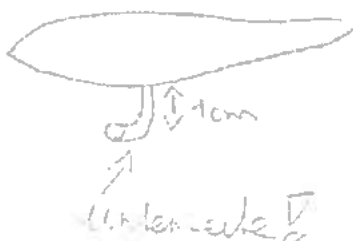
nur für Schnellflug sinnvoll

- Lochabstand : 3 mm
- Lochdurchmesser : 0.4 mm
- Lage der Öffnungen : bei Hochleistungsprofilen etwa 40% t
- Luftversorgung : Staurohr unter jedem Flügel
  - Durchmesser 10mm
  - Abstand von der Unterseite 10mm
  - Lage des Staurohres 50% Profiltiefe
  - Anordnung etwa bei halber Spannweite

*Verhältnis  
 $F_{L1} : F_{L2} = 1$   
wählen*

Ich würde mir wünschen, daß viele Modellflieger den Vorteil dieser neuen Methode zur Grenzschichtbeeinflussung erkennen und den geringen Mehraufwand für die Installation wagen. Mit dem vorgestellten Verfahren wird an gebräuchlichen Modellauslegungen eine deutliche Verbesserung der Flugleistung erreicht.

*Charakter: Lohrspannweite, 1cm über Oberfläche*



*Fläche Verhältnis = 1  
und als Bodenankerbung.*

*Ausblasselöcher  
so anordnen:  
.....  
 $\Rightarrow$  Wirkung  
größer!*