

Die Schmitzsche Aerodynamik

... der niedrigen Reynoldzahlen / Dr. Heinz Eder

Die Aerodynamik der niedrigen Reynoldzahlen wurde immer schon stiefmütterlich behandelt, da sie kaum in das Vorlesungsschema von Hochschulen passt. Im täglichen Leben treten Strömungsvorgänge bei niedrigen Geschwindigkeiten jedoch häufiger auf als vermutet. Es sind nicht nur Flugmodelle und Vögel, die sich im Bereich niedriger Strömungsgeschwindigkeiten bewegen, sondern auch Insekten, Computerlüfter, Golfbälle und Fahrradrahmen (Tab. 1). Auch bei mantragenden Segelflugzeugen und Windturbinen werden heute Turbulatoren eingesetzt um die Strömung - z. B. vor Zonen mit größeren Druckanstiegen - zu beeinflussen. Die Größe des Objektes, die Geschwindigkeit und die kinematische Zähigkeit der Luft beschreiben im physikalischen Sinne den Strömungszustand, der mit der dimensionslosen Reynoldszahl (kurz Re-Zahl) gekennzeichnet wird. Der Bereich des Überganges von laminarer (unterkritischer) zu turbulenter (überkritischer) Strömung erstreckt sich bei schlanken Körpern je nach Oberflächenrauigkeit etwa zwischen 20.000 bis 200.000. Die Grundlagen zur Erkundung dieses Strömungsbereiches hat Studienrat Ing. Franz Wilhelm Schmitz in den Jahren 1937 bis 1956 an den Windkanälen der Staatlichen Ingenieurschule in Köln und des späteren Max Planck-Institutes für Strömungsforschung in Göttingen gelegt (Abb. 1). Seine Arbeiten wurden vom Direktor des damaligen Kaiser-Wilhelm-Institutes für Strömungsforschung, Ludwig Prandtl, gefördert.

Aerodynamik à la Schmitz

Zentraler Punkt der Schmitzschen Arbeiten waren die Strömungszustände an Flügelprofilen bei kleinen Re-Zahlen. Schmitz hat seine Ergebnisse im Wesentlichen in seinem Buch „Aerodynamik des Flugmodells, Tragflügelmessungen I und II bei kleinen Geschwindigkeiten“ niedergelegt (Erstausgabe 1942, 5. Ausgabe 1976). Inzwischen wurden zahlreichen Messungen im niedrigen Re-Bereich auch an anderen Windkanälen, z. B. in Stuttgart und Princeton durchgeführt, die die Schmitzschen Ergebnisse im Wesentlichen bestätigten. Über allem steht das Reynoldsche Ähnlichkeitsgesetz: Die dimensionslose Re-Zahl ist das Verhältnis von Beschleunigungsarbeit zu Reibungsarbeit. Zwei Strömungszustände mit gleicher Reynolds-Zahl sind strömungstechnisch ähnlich, wobei sich die Re-Zahl in Normalatmosphäre bekanntermaßen annähernd aus

$$Re = v * t * 70$$

(v Fluggeschwindigkeit m/s, t Profiltiefe bzw. Ausdehnung mm) berechnet.

Re = 20.000 bis 200.000 ist ein strömungstechnischer Bereich in dem sich z. B. der Vogelflug und der Modell-

flug abspielt. Diesem bis heute wenig erforschten Übergangsbereich hat sich Schmitz mit großer Leidenschaft gewidmet. Seine Ergebnisse sind auf folgende Aussagen komprimierbar:

- Im Re-Zahlbereich von 20.000 bis 200.000 erfolgt bei Flügelprofilen der Übergang vom unter- zum überkritischen Strömungszustand, d. h. die Grenzschicht der Profilloberseite ist unterhalb der sogenannten „kritischen Re-Zahl“ laminar (auch laminar abgelöst) und darüber turbulent.
- Eine turbulente Grenzschicht auf der Profilloberseite (d. h. überkritischer Zustand) ist in diesem Re-Bereich unbedingt erforderlich um den Druckanstieg im hinteren Profilbereich besser zu überwinden und damit den Widerstand zu reduzieren.
- Dicke Profile besitzen eine höhere kritische Re-Zahl als dünne. So ist eine gewölbte Platte mit 3% Dicke schon bei Re = 10.000 überkritisch, während das Profil N60 mit 12% Dicke erst bei Re= 80.000 „anspringt“. Ähnliches gilt für den Nasenradius: je kleiner der Radius, desto kleiner die kritische Re-Zahl und vice versa.
- Künstliche Turbulatoren - wie Vorspanndrähte und Stolperleisten - bewirken, dass die Ablöseblase verkürzt und der turbulente Umschlag rechtzeitig vor der Strömungsablösung erzwungen wird (Abb. 2).

Profildicke

Die ersten Flugzeuge, wie der Lilienthal-Gleiter und der Wright-Flyer, orientierten sich an den Vogelprofilen und lagen damit falsch! Mit dicken Profilen können im Re-Zahlbereich des Großfluges westlich höhere Auftriebsbeiwerte erreicht und die Statik des Flügels verbessert werden. Erst Junkers zeigte 1910 die Vorteile des di-

Gegenstand	Geschwindigkeit m/s	Ausdehnung mm	Re-Zahl
Ahornsamensamen	2	15	2.100
Libelle	10	13	9.100
Fahrrad (Rohr)	7	30	14.700
Modellsegler	5	140	49.000
Dohle	9	100	63.000
Golfball (vor Landung)	30	42	88.000
Marathonläufer	5	280	98.000
Windturbine (klein)	7	200	98.000

Tabelle 1: Verschiedene Objekte, die sich mit Re < 100.000 bewegen (kinematische Zähigkeit $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

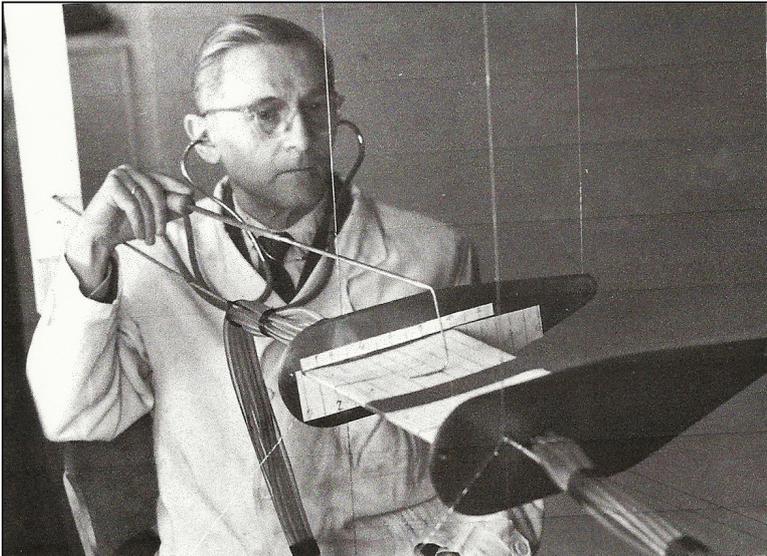


Abb. 1 F. W. Schmitz beim Arbeiten im Windkanal: „Abhören“ der Grenzschicht mit dem Stethoskop (Foto: Privatbesitz Arno Schmitz)

Die Ursache für die beschriebenen Zusammenhänge liegt darin begründet, dass an der Profilnase eine gewisse Mindestbeschleunigung der Strömung herrschen muss, um den Umschlag zu erzeugen. Bei dünnen Profilen bildet sich schon unmittelbar an der Profilnase ein Wirbel aus, der den Umschlag bewirkt. Bei dickeren Profilen kommt es erst nach einer gewissen Lauflänge zur laminaren Ablöseblase, die im günstigsten Fall zu einem turbulenten Wiederanlegen der Strömung führt (siehe **Abb. 2**). Die Begrenzung der Wölbung wiederum hat mit der beschränkten Fähigkeit der Strömung zu tun, einen positiven Druckgradienten zu überwinden.

Hinweis: Bei sehr niedrigen Re-Zahlen < 10.000 finden wir offenbar wieder andere Gesetzmäßigkeiten. Hier lässt sich die Laminarität immer weniger stören. Die Wölbung einer Platte kann erstaunlicherweise bis 10% und

mehr betragen, ohne dass sich größere Strömungsablösungen ereignen (Sunada et al. 1997). Das haben auch frühere Untersuchungen an Saalflugprofilen mit Profilwölbungen von 10% bei $Re = 6.000$ gezeigt (Hacklinger 1962).

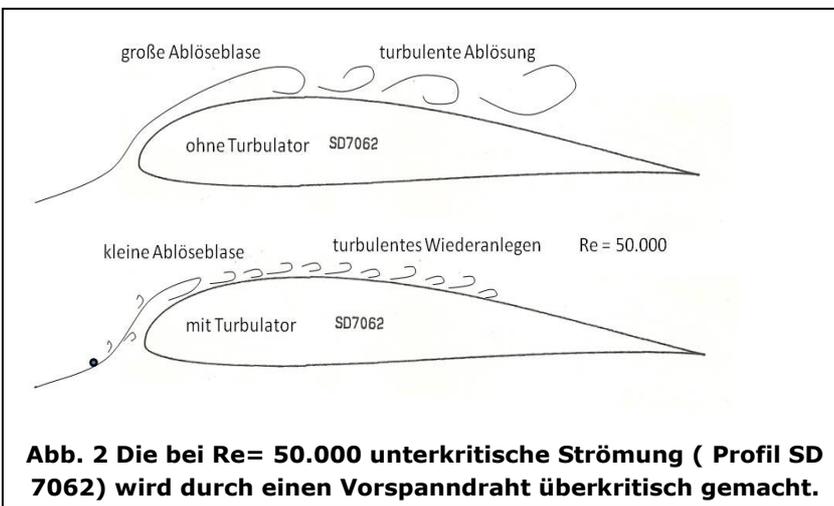


Abb. 2 Die bei $Re = 50.000$ unterkritische Strömung (Profil SD 7062) wird durch einen Vorspanndraht überkritisch gemacht.

Kontur der Profilnase

Ein von der Dicke her nach obiger Grafik ausgewähltes und damit der Strömungsgesetzmäßigkeit angepasstes Profil ist in der Regel besser, als ein zu dickes Profil mit zusätzlichem Turbulenzgeber, da letzterer selbstverständlich auch einen schädlichen Widerstand hervorruft. Sehr wichtig ist laut

cken Profils und öffnete somit den Weg für den freitragenden Eindecker. Wegen der höheren Festigkeit und des geringeren Strukturgewichtes versuchten die Konstrukteure fortan, möglichst dickere Profile einzusetzen.

Im niedrigen Re-Zahlbereich müssen wir besonders die dort eigenen Gesetze der Aerodynamik beachten. Die Gesetze der strömenden Luft als zähem und trägem Medium lassen es nicht zu, z. B. Profile aus dem Großflug direkt auf Modelle zu übertragen. Zu jeder Re-Zahl gehört eine bestimmte Profildicke, bei der die überkritische Strömung und somit optimale Werte für die Gleitzahl und die Sinkgeschwindigkeit erreicht werden (**Abb. 3**).

Abb. 4 zeigt den Zusammenhang von Profildicke und Re-Zahl, gewonnen aus einer Vielzahl von Windkanalmessungen (vom Autor ergänzt mit neueren Daten). Für den Nasenradius gilt eine ähnliche Gesetzmäßigkeit wie für die Profildicke. Die Profilwölbung hat relativ wenig Einfluss, sofern sie eine obere Grenze von rund 5% der Flügeltiefe bei Re-Zahlen um 20.000 und 6% bis 8% bei Re-Zahlen um 100.000 nicht überschreitet.

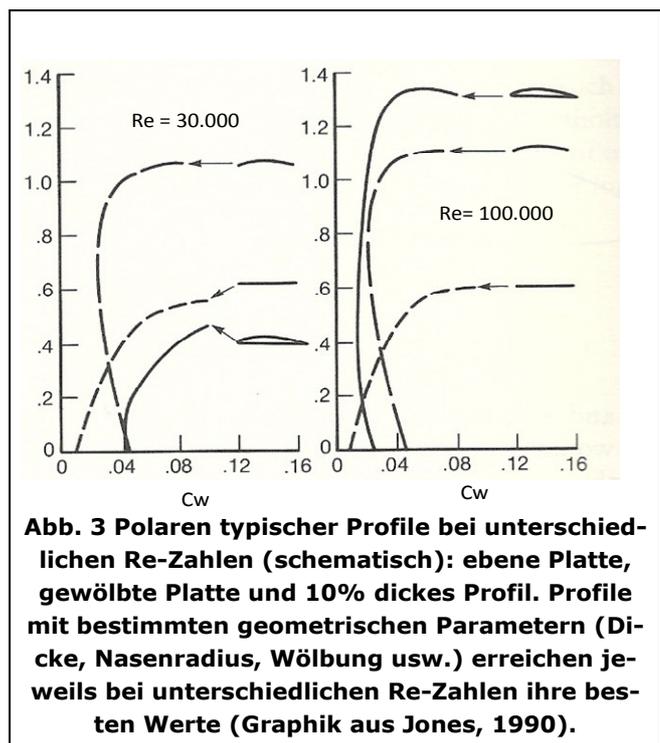
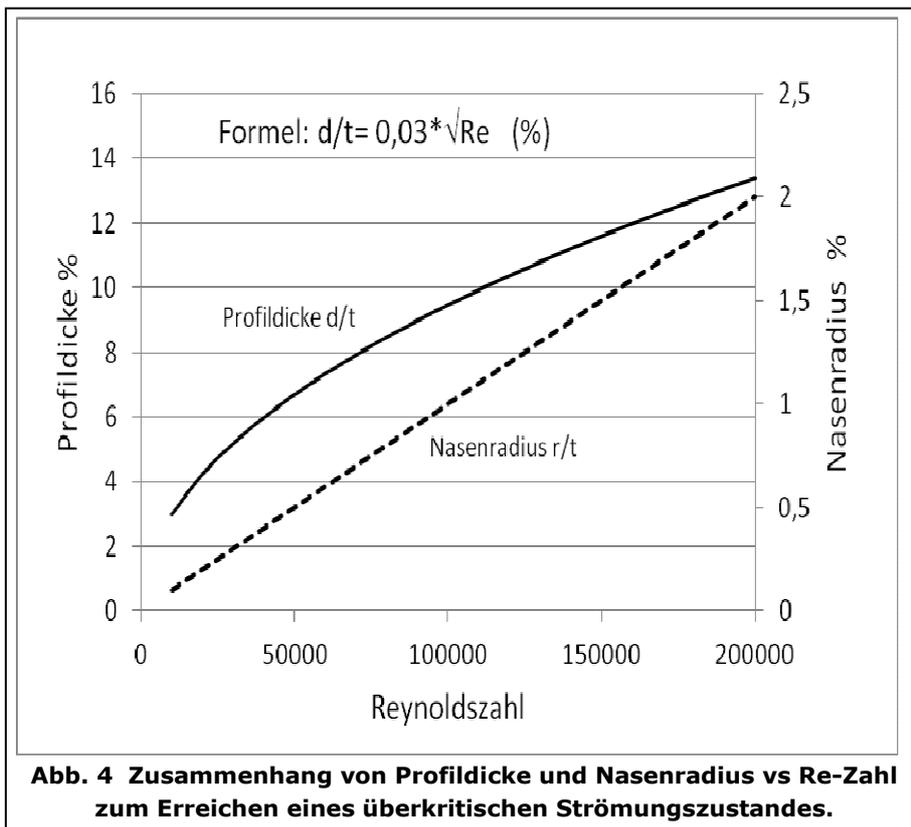


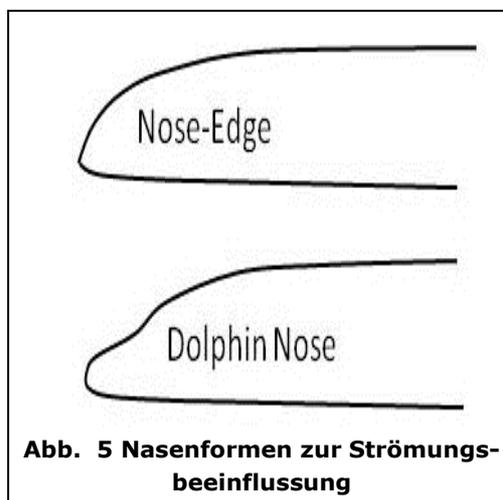
Abb. 3 Polaren typischer Profile bei unterschiedlichen Re-Zahlen (schematisch): ebene Platte, gewölbte Platte und 10% dickes Profil. Profile mit bestimmten geometrischen Parametern (Dicke, Nasenradius, Wölbung usw.) erreichen jeweils bei unterschiedlichen Re-Zahlen ihre besten Werte (Graphik aus Jones, 1990).



Schmitz die Einhaltung der Profilkontur im Nasenbereich: eine offene Bauweise ohne Nasenbeplankung kann keine ausreichende Profiltgenauigkeit gewährleisten, d.h. die Zwischenprofile sind beliebig und haben mit dem Original so gut wie nichts gemeinsam. Hinweis: In neuerer Zeit wird allerdings die Nasenkontur zur Strömungsbeeinflussung auch gezielt genutzt. Beispiele: die Nasenkante (Nose-Edge), die etwa im Staupunkt (Lage bei niedrigem Auftriebsbeiwert) liegt und nur dann umströmt wird, wenn der Auftriebsbeiwert ansteigt, wie auch die „Dolphin Nose“, die einen stationären Wirbel erzeugt, der wie ein Rollenlager wirkt (Eggleston 2010), **Abb. 5**.

Künstliche Turbulatoren

Dies sind Hilfsmittel zum Erzwingen der Turbulenz. **Abb. 6** zeigt die von Schmitz untersuchten Ausführungsformen. Da ein Turbulator auch einen Zusatzwiderstand darstellt, ist bei seiner Bemessung sehr sorgfältig vorzugehen. Zu dicke Turbulatoren können den Auftrieb stören und zu einer Reduzierung des Maximalauftriebs führen (Schmitz, 1976 und Eder 2011). Stolperstufen über 0,5 mm Höhe sind nur bei sehr niedrigen Re-Zahlen (≤ 20.000) angezeigt. In allen anderen Fällen wird man in diesem Re-Bereich mit max. 0,5 mm Stufenhöhe bzw. Drahtdicke auskommen. Generell gilt, dass die Störung vor der laminaren Ablöse-



blase liegen muss, sonst wird sie „laminar zugedeckt“. Hier die Schmitzschen Ergebnisse aus den Tragflügelmessungen II am Profil Gö 801 (siehe **Abb. 6**):

- Der Vorspanndraht (TD) mit einer Dicke von 0,5 mm, angebracht etwa 8%t vor der Nasenleiste auf der Unterseite tangente liefert von $Re = 30.000$ bis $Re = 100.000$ die besten Ergebnisse, gefolgt vom Papiermodell PM (mit abfallender Kante beim Übergang zur Bespannung), zwei abfallende Turbulenzstufen (TSt) aus Klebefilmstreifen je 0,3 mm Dicke, raue Zone RZ (ca. 10 mm breiter Streifen aus Schmirgelpulver hinter der Eintrittskante) sowie Stolperleiste (St) 0,5 mm.
- Die Stolperleiste mit 1 mm Höhe verringert den Auftrieb

und ist kontraproduktiv (außer bei $Re \leq 20.000$, wo sie tatsächlich die beste Lösung darstellt).

- Eine generelle Rauigkeit erhöht den Widerstand beträchtlich. Es reicht also in der Regel eine einmalige Anregung der Turbulenz an der richtigen Stelle bei sonst normal-rauer Oberfläche (z. B. Papierrauigkeit). Hinweis: Kontraproduktiv sind bei $Re > 20.000$ auch mehrfache, herausstehende Kanten. Eine einmal turbulent gemachte Grenzschicht überwindet zwar den Druckanstieg besser, ist aber überraschenderweise gegenüber Störkanten empfindlicher als die laminare Grenzschicht. Das nutzt man z. B. bei Invigatoren (Turbulenzverstärkern im rückwärtigen Profilbereich) aus, die relativ dünn sein können und trotzdem wirksam sind.
- Eine - von der Turbulenzstufe abgesehen - glatte Nasenpartie bringt leichte Gewinne. Die Profilver- seite sollte immer möglichst glatt bleiben, um die laminare Strömung weitgehend zu erhalten.
- Die günstigste Lage von aufgeklebten Störkörpern wie Streifen, Schnüre oder Zackenband ist typischerweise 5 bis 15% hinter der Naseneintrittskante. Bei Laminarprofilen, wie dem E 0058 (Gö 804), nutzt man den sanften Druckanstieg an der Nase (Kraemer 1961) und bringt den Turbulator bei 25 bis 30% an. Das Gö

804 kann durch den Turbulator überhaupt erst flugfähig gemacht werden, zeigt dann aber hervorragende Leistungen auch bei niedrigen Re-Zahlen (Eder 2011). Hinweis: Die Gefahr bei zu rückwärtiger Anbringung des Turbulators ist, dass dieser von der Laminarblase zugedeckt und damit unwirksam gemacht wird. Genau das passiert beim vorgespannten TD nicht, weshalb er über einen großen Re-Bereich wirksam ist.

- Turbulenzgeber, wie Zackenbänder, werden auch an kleinen Windturbinen und Groß-Segelflugzeugflügeln vor Zonen mit hohem Druckgradienten verwendet (z. B. Ruder). Eine Besonderheit stellt der sehr wirksame Stift- oder Eulenturbulator dar, eine Stiftreihe entlang der Profilnase.

Die beiden letztgenannten Turbulatoren wurden von A. Schäffler und R. Hofsäss im Wasserkanal der TU Stuttgart untersucht und haben sich als sehr wirksam erwiesen. R. Höbiger gibt im NFFS Symposium Report 2004 als einfache Formel für den Stiftdurchmesser $d = 3/v$ (v m/s, d mm) an. Die Stiftlänge sollte etwa das 1,3-fache des Stiftdurchmessers betragen und der Stiftabstand ca. 6 bis 7 mm (Abb. 7)

- Zumind. im Windkanal hat auch der Blasturbulator bei $Re = 100.000$ eine Strömungsverbesserung erbracht. Das Ausblasen erfolgt über kleine Löcher mit $0,3\%t$ Durchmesser ca. $5\%t$ vor dem Wölbungsmaximum der Profiloberseite. Der Überdruck für das Ausblasen wird beispielsweise aus Versorgungsbohrungen auf der Profilunterseite gewonnen (Schwetzler 1987).

Hysterese

Neben der Verbesserung der aerodynamischen Größen Sinkgeschwindigkeit, Gleitzahl, Maximalauftrieb, kann ein Turbulator auch die Flugstabilität insofern verbessern, als er eine Verstärkung des Verlaufs des Flügel-drehmomentes bewirkt. Die dicken Profile zeigen häufig Hysterese-Erscheinungen im betreffenden Re-Bereich, d. h. nach Über-

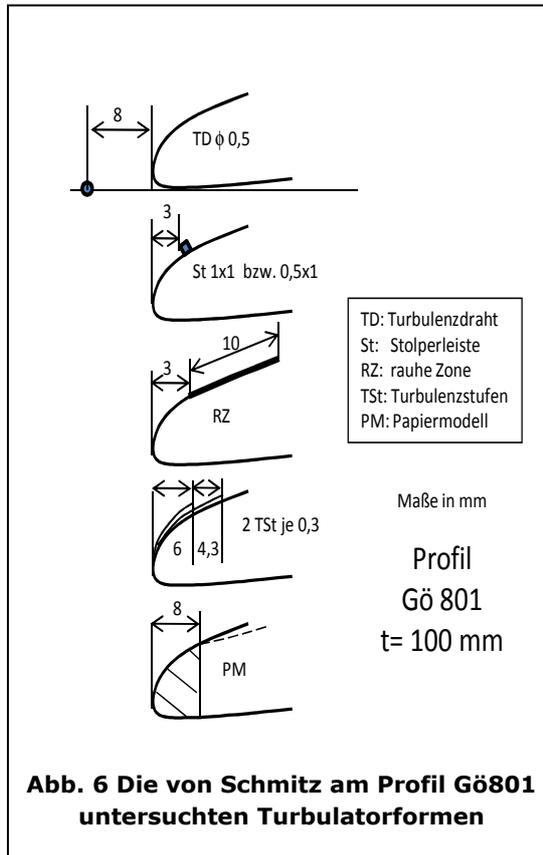


Abb. 6 Die von Schmitz am Profil Gö801 untersuchten Turbulatorformen

schreiten des Maximalauftriebes liegt die Strömung erst bei deutlich geringeren Anstellwinkeln wieder an. Ergebnisse von Windkanalmessungen weisen diesen für die Flugstabilität so bedeutsamen Hysteresebereich oft nicht aus und zeigen nur die Polare für den zunehmenden Anstellwinkel. Ein Profil mit starker Hysterese ist aber bei hohen Auftriebsbeiwerten quasi fluguntauglich, siehe Messungen des Autors am Rundlauf (Eder 2011). Dünne Profile sind dagegen weitgehend hysterese-frei – auch ist das eine wichtige Erkenntnis aus den Schmitzschen Untersuchungen. Durch die Anwendung von Turbulatoren kann bei dickeren Profilen der Hysteresebereich eingegrenzt oder sogar vermieden werden, wie am Beispiel des Papiermodells mit Störkante ersichtlich, **Abb. 8**.

Zusammenfassung

Sich langsam bewegende Flugobjekte erfordern hinsichtlich der Profilierung des Tragflügels eine besondere Sichtweise, die im Wesentlichen F.W. Schmitz in den Jahren 1937 bis 1956 mit seinen Messungen an den Windkanälen in Köln und Göttingen erarbeitet hat. Um gute Flugeigenschaften zu erlangen, muss immer der überkritische Strömungszustand angestrebt werden. Das heißt, dass bei Re-Zahlen im Übergangsbereich von 20.000 bis 200.000 jeweils eine gewisse Profildicke bzw. ein bestimmter Nasenradius nicht überschritten werden darf. Ggf. sind künstliche Turbulenzgeber erforderlich um die Flugeigenschaften zu verbessern.

Danksagung

Dem Bibliotheksarchiv der DLR, Göttingen, sowie Arno Schmitz danke ich für die Überlassung von Unterlagen und Bildern.

Literatur

- H. Eder**, Langsam Voran, Profilmessungen im Bereich niedriger Re-Zahlen, Aufwind 3/2011
- B. Eggleston**, High Endurance Airfoils for Small CLG and HLG Models. Annual Report of the National Free Flight Society Symposium 2010
- M. Hacklinger**, Theoretische und experimentelle Untersuchungen an

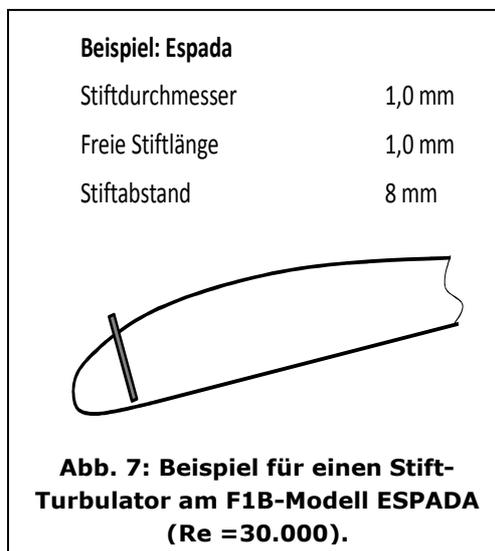


Abb. 7: Beispiel für einen Stift-Turbulator am F1B-Modell ESPADA (Re = 30.000).

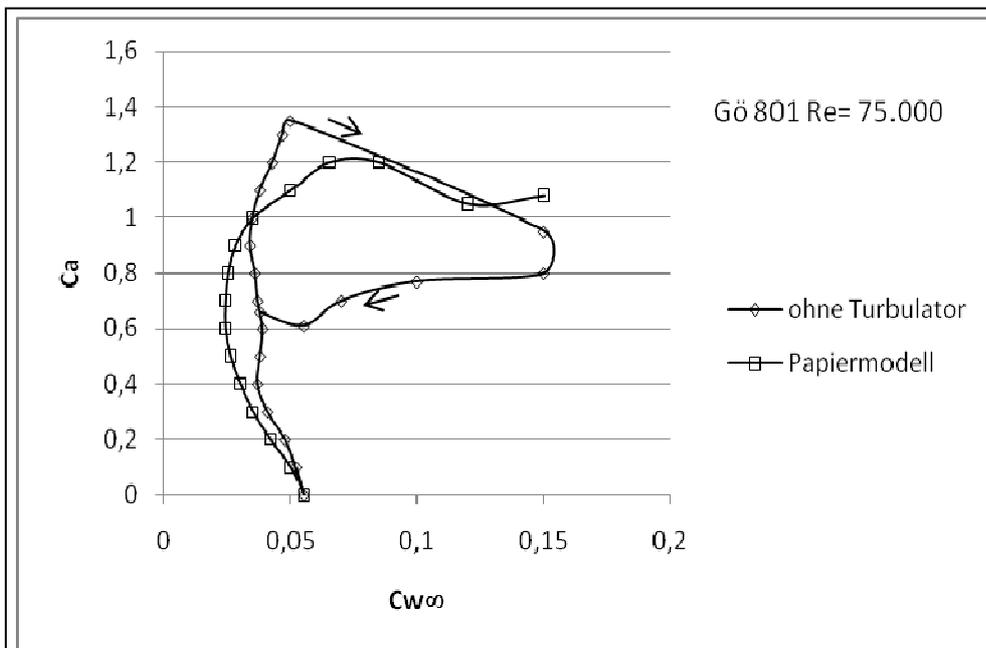


Abb. 8 Ein dickes Profil wie das Gö 801 zeigt bei $Re = 75.000$ starke Hysterese-Erscheinungen (Pfeile). Dagegen ist das Papiermodell mit der Turbulenzkante an der Nase praktisch hysteresefrei.

R. T. Jones, Wing Theory, Princeton University Press, 1990

K. Kraemer, Flügelprofile im kritischen Reynoldszahl-Bereich, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Bd. 27 (1961) Nr. 2, S. 33-46

F. W. Schmitz, Aerodynamik des Flugmodells, Tragflügelmessungen I und II bei kleinen Geschwindigkeiten, 5. Auflage, Luftfahrt-Verlag Walter Zuerl 1975

D. Schwetzler, Widerstandsverbesserung an Modellflugzeugen, Flug und Modelltechnik 373 (1987)

S. Sunada, A. Sakaguchi, K. Kawachi, Airfoil

Saalfugmodellen, WGLR (Wiss. Ges. Für Luft und Raumfahrt) Jahrbuch 1962, S. 237-245

R. Höbiger, The Pin Turbulator, Annual Report of the National Free Flight Society Symposium 2004

Section Characteristics at low Reynolds Numbers, Journal of Fluids Engineering, 119 (1997) S. 129-135

Korrespondenz: Dr.-Ing. Heinrich Eder, ede-h@arcor.de