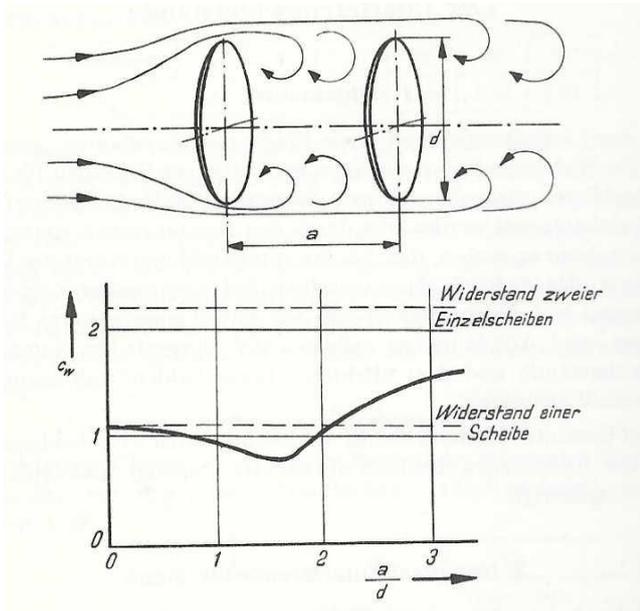


# Nachlaufdele und Abwindfeld

## Welche Auswirkungen haben diese beiden Effekte bei Freiflugmodellen? / DS

Radrennfahrer profitieren vom Windschatten (Nachlaufdele). Louis Bilat wurde Weltmeister bei den Fesselflug-Speedmodellen, weil er den Widerstand der Steuerleinen durch eine ideale Position reduzieren konnte. Er erreichte dies durch Metallföhnchen, die er auf die Leinen auffädelt. **Bild 1** zeigt einen ähnlichen Effekt am Beispiel von zwei hintereinander liegenden Kreisplatten (**Ref. 1**). Kraniche reduzieren den Energieaufwand bei ihren Flügen in wärmere Gegenden indem sie eine Formation bilden, bei der die Vögel von Randwirbeln des Abwindfeldes der vorausfliegenden Tiere profitieren. Speziell bei Freiflugmodellen spielt die vertikale Staffelung von Flügel und Höhenleitwerk, welche sich je nach Flugphase ändert, eine entscheidende Rolle. Das Flugverhalten wird dadurch positiv oder negativ beeinflusst.

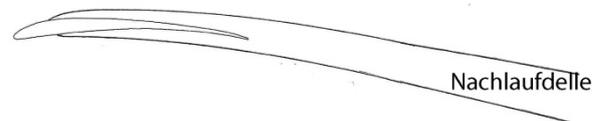


**Bild 1: Widerstand von zwei hintereinander liegenden Kreisplatten in Funktion von ihrem Abstand.**

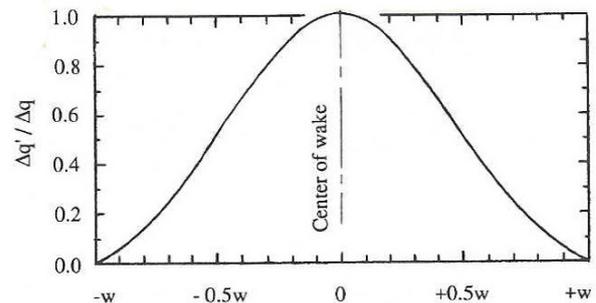
### Nachlaufdele

Hinter jedem bewegten Körper gibt es eine Zone verringertener Strömungsgeschwindigkeit. Bei einem Flügel ist dies ein in der Höhe eng begrenztes Gebiet, das sich mit zunehmendem Abstand vergrößert (**Bild 2**). Bei den üblichen Höhenleitwerkspositionen beträgt die Dicke der Nachlaufdele etwa 70% der Flügeltiefe. Der Verlust beim Staudruck beträgt dort circa 8%. Dies gilt für die Mitte der Nachlaufdele. **Bild 3** zeigt den ungefähren Verlauf der Staudruckabnahme über die Breite der Delle. Das heißt: Ein Höhenleitwerk, welches im Zentrum der Delle platziert wäre, würde dort 8% seiner Wirksamkeit verlieren. Die vertikale Lage der Nachlauf-

dele folgt dem Weg der vom Flügel abgelenkten Luft, der gemäß dem Impulssatz zur Generierung des Auftriebs erforderlich ist. Durch diese Ablenkung fliegt das Modell sozusagen im eigenen Abwind. Der Auftriebsvektor neigt sich in Abhängigkeit von der Streckung nach hinten, was als induzierter Anstellwinkel bezeichnet wird (**Bild 4**). Der effektive Anstellwinkel im Flug ergibt sich demnach aus dem Profilanstellwinkel (beispielsweise aus Profili, **Ref. 2**) und dem induzierten Anstellwinkel. Den dadurch entstandenen Zusatzwiderstand bezeichnet man als induzierten Widerstand. Nach Ansicht der Aerodynamiker hat die Abwärtsge-

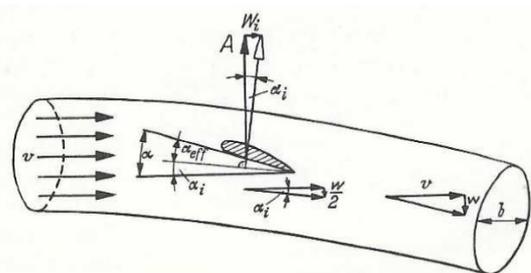


**Bild 2. Nachlaufdele hinter einem Flügelschnitt.**



**Bild 3. Verteilung der Staudruckverluste über der Nachlaufdele.**

windigkeit der Strömung in der Flügelmitte erst die Hälfte ihrer vollen Größe erreicht. Demnach wirkt sich beim Höhenleitwerk nahezu der doppelte induzierte Flügelanstellwinkel aus. Je nach Faktenlage (Windkanalmessungen kombiniert mit theoretischen Überlegungen) sind verschiedene Formeln zur Berechnung dieses Effekts bekannt. Dies illustriert die Problematik einer quantitativen Voraussage. Für die unerlässlichen



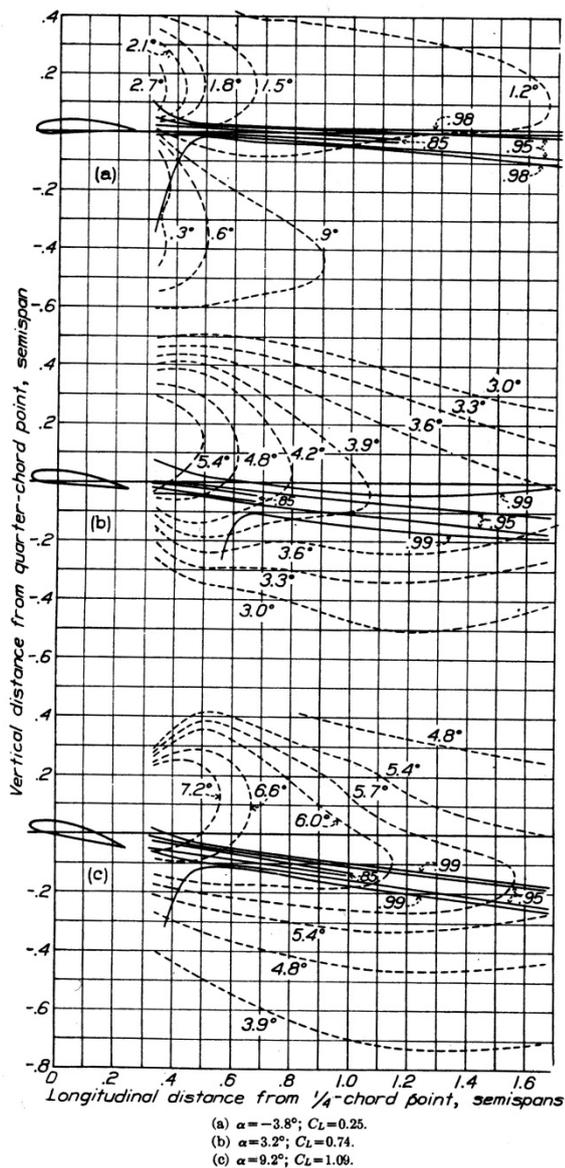
**Bild 4. Strömungsablenkung am Flügel, Winkel und induzierter Widerstand.**

Experimente auf dem Flugfeld genügt es, wenn die qualitativen Zusammenhänge verstanden werden. Mit einer Abschätzung des Flügelanstellwinkels und der Modellgeometrie lässt sich vermuten, bei welcher Fluglage das Höhenleitwerk die Nachlaufdelle trifft. Daraus zeigt sich, dass bereits eine geringe Winkeländerung beim Flügeinbau eine wesentliche Veränderung des Flugverhaltens bewirken kann. Mehr davon bei der Anwendung auf die verschiedenen F1-Kategorien.

kel ab. Immerhin kann festgestellt werden, dass diese Abnahme so gering ist, dass, für die üblichen Höhenleitwerksauslegungen, der Abwind über die Höhenleitwerkspannweite nahezu konstant bleibt. **Bild 5** zeigt die Situation in der Mitte eines Flügels am Beispiel von Windkanalmessungen bei einer Streckung von  $\Lambda = 6$ , und vermittelt Hinweise über den qualitativen Verlauf vom Abwindfeld (gestrichelt) und der Nachlaufdelle (ausgezogene Linien) für verschiedene Anstellwinkel.

## Höhenleitwerksauslegungen

Vergleicht man Dreiseitenansichten aus den 50-ern und 60-er Jahren mit aktuellen Publikationen, so fällt auf, dass damals die Höhenleitwerksflächen, besonders bei Motormodellen, wesentlich grösser waren als heute. Entsprechend weit hinten lag der Schwerpunkt. Ein möglicher Grund ist, dass die damals praktizierten Korkenziehersteigflüge ohne Winkelsteuerungen mit diesen Auslegungen besser beherrschbar waren. Auch mag die Überlegung eine Rolle gespielt haben, das ohnehin zur Stabilisierung notwendige Höhenleitwerk gleich mit zur Auftriebsgenerierung heranzuziehen. Wie falsch solche Gedanken waren, zeigt sich darin, dass der Auftriebsvektor eines tragenden Höhenleitwerks im Abwindfeld des Flügels um den doppelten induzierten Anstellwinkel nach hinten geneigt ist und damit einen beträchtlichen Zusatzwiderstand erzeugt. Zudem gilt: Fläche ist ein kostbares Gut und sollte keineswegs im Höhenleitwerk vergeudet werden. Die Steigzahl ( $Ca^3/Cw^2$ , Größe zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit) für ein Flächen-Element im Flügel ist um ein Mehrfaches besser als wenn es im Höhenleitwerk platziert würde. Je weiter der Schwerpunkt nach vorne gelegt wird, desto kleiner werden die Flügelmomentänderungen und umso kleiner können die Höhenleitwerke gebaut werden. Das Verhalten bei der Thermikbremse limitiert dieses Vorgehen. Bei Schwerpunktlagen vor 45% der mittleren Flügeltiefe wird die Sache kritisch. Das Modell turnt zu Boden und läuft Gefahr, bei der Landung beschädigt zu werden. Bei Schwerpunktlagen von 45% kann auch die strömungsgünstige ebene Platte im Höhenleitwerk verwendet werden, die als einziges Profil ohne zusätzlichen Turbulator im niedrigen Reynoldszahlbereich eine saubere, stetige Polare aufweist. Da die Längsstabilisierung im Prinzip ein Proportionalregler (d.h. der Eingriff ist proportional zur Abweichung) ist, und somit systembedingt eine Regelabweichung hat, ist es vorteilhaft, wenn zumindest vom Höhensteuer her keine Unregelmäßigkeit auftritt.



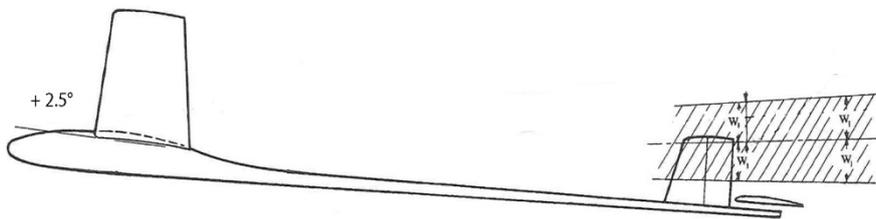
**Bild 5. Abwindwinkel und prozentuale Staudrücke der Nachlaufdelle. Abwindfeld**

Unter einem Abwindfeld versteht man den hinter dem Tragflügel liegenden Bereich des Strömungsfeldes, in dem die Luft auch eine vertikale Komponente hat. Im Gegensatz zur Nachlaufdelle, welche sich in einem schmalen Band zeigt, erstreckt sich das Abwindfeld, bei dem deutliche Winkeländerungen auftreten, über eine vertikale Distanz die grösser ist als die Flügelspannweite. Gegen die Flügelenden zu, nehmen die Abwindwin-

Auffallend ist bei alten Dreiseitenansichten, dass oft die Angaben über Anstellwinkel, Verwindungen und Motorzugachsen fehlen. Dies deutet darauf hin, dass solchen Daten wenig Bedeutung geschuldet wurde. Heute ist dies anders: Ohne die sorgfältige Einbringung von in Flugversuchen gefundenen Daten wäre es nicht möglich, das hohe Niveau des Freiflugs zu halten.

## Lage des Höhenleitwerks relativ zur Nachlaufdelle

Für eine grobe Abschätzung werden die Geometriedaten des Modells, sowie der aus Erfahrungswerten geschätzte Auftriebsbeiwert des Flügels benötigt. Daraus lässt sich der Anstellwinkel des Flügels bestimmen (Profili, **Ref. 2**, oder Windkanalergebnisse) und der induzierte Anstellwinkel (zusätzlicher Winkel weil das Modell im eigenen Abwind fliegt, **Bild 4**) berechnen. Er ist proportional zum Auftriebsbeiwert und umgekehrt proportional zur Flügelstreckung. Multipliziert man diesen Bruch ( $C_A/\lambda$ ) mit 18,2 erhält man den induzierten Anstellwinkel in Grad. Zur Erinnerung: Da der Flügel zur Auftriebserzeugung Luft ablenken muss, kommt noch der induzierte Anstellwinkel dazu. Hinter dem Flügel ist die Ablenkung vollbracht, der abgelenkte Luftstrom ist gegenüber der freien Anströmung um den doppelten induzierten Anstellwinkel geneigt (**Bild 6**).



**Bild 6. Nachlaufdelle bei einem F1A-Modell im Gleitflug.**

Vergleicht man diese Aussage mit **Bild 4**, wird ersichtlich, dass ziemlich vereinfacht wurde. Für eine qualitative Abschätzung reicht diese Vorgehensweise. Sie kann noch weiter vereinfacht werden, da der Faktor 18,2 oft nahezu identisch ist mit der Streckung vieler Freiflugmodelle. In diesem Fall entspricht der dimensionslose Auftriebsbeiwert dem induzierten Anstellwinkel des Flügels.

Bezogen auf eine Referenzlinie (am einfachsten die Längsachse des Leitwerkträgers) wird die Höhenlage der Flügelendleiste bestimmt. Das Gleiche gilt für die Nasenleiste des Höhenleitwerks. Der Winkel des Flügels bezüglich der Referenzlinie wird ebenfalls ermittelt. Die Bestimmung kleiner Winkel funktioniert auch, wenn man berücksichtigt, dass auf einer Strecke von 57,3 mm ein senkrechter Abstand von 1 mm einem Grad entspricht, und das Ganze umrechnet. Bezogen auf die Profilsehne wird eine Linie abwärts von der Flügelendleiste mit dem Flügelanstellwinkel plus den zweifachen induzierten Anstellwinkel gelegt. Sie repräsentiert nahezu den Verlauf des Peaks der Nachlaufdelle. Wie bereits erwähnt, entspricht die Breite der Nachlaufdelle an der Stelle des Höhenleitwerks etwa 70% der Flügeltiefe. Damit kann eruiert werden, ob die Staudruckänderung der Nachlaufdelle Wirkungen zeigt (**Bild 6**).

## F1A- Modelle

Hochstartsegler fliegen im Gleitflug gemäß Profili bei gemittelten Auftriebsbeiwerten von 1 (LDA-Profile) bis 1,1 (Thermikprofile) und einem Profilanstellwinkel um 5°. Wendet man das oben beschriebene Verfahren bei einem Durchschnitmodell an, so zeigt sich, dass das Höhenleitwerk ab einem eingebauten Flügelwinkel von 2,5° Gefahr läuft, in die Nachlaufdelle einzutauchen.

In der Startphase zum Bunt müssen die Modelle viel Auftrieb generieren, damit die in Flugrichtung weisende Komponente des Leinenzuges die Modelle wirksam beschleunigen kann. Hier zeigt sich ein Unterschied in der Profilwahl. Der geringere Widerstand der LDA-Profile ermöglicht es den Spitzenleuten, an der Schnur Geschwindigkeiten von 250 km/h zu erreichen (**Ref. 3**). Würde das Modell den zu Beginn wertvollen Auftriebsbeiwert von 1 beibehalten, entstände so ein Leinenzug von 90 kg, der es dem Startenden ermöglichen würde,

mitsamt seinem Modell abzuheben. Selbstverständlich ist dies ein hypothetischer Fall, wegen dem induzierten Widerstand wäre es nicht möglich, die 250 km/h zu erreichen. Der induzierte Widerstand wächst im Quadrat mit der Geschwindigkeit. Rechnet man von dem maximal praktikablen Leinenzug von 40 kg zurück, ergibt sich im Idealfall eine allmähliche Reduzierung des Auftriebsbeiwertes von

1,00 auf 0,44. Damit verringert sich der induzierte Widerstand um 80 %. Er beträgt dann nur noch 20 % des Gesamtwiderstandes. Dies ermöglicht es dem Modell, trotz einer mit zunehmender Höhe ungünstiger werdenden Schnurkomponente, die Geschwindigkeit auf 250 km/h zu steigern.

Wie erreicht man diese allmähliche Reduzierung des Auftriebsbeiwertes? Verschiedene Wege sind denkbar:

- timergesteuertes Korrigieren der Höhenleitwerksstellung
- Ausnützung aeroelastischer Effekte
- Ausnützung der Nachlaufdelle

Das gewünschte Nachdrücken kann durch eine geschickte Kombination von Aeroelastik (Höhenleitwerk) und Ausnützung der Nachlaufdelle nach ausgiebigen Versuchen auf dem Flugfeld, kombiniert mit Änderungen am Modell, erreicht werden. Dazu ist auch eine Vergrößerung des Flügelanstellwinkels beim Modell notwendig, um die Nachlaufdelle ins Spiel zu bringen. Wer bei einem renommierten Hersteller einen Flügel kauft, sollte sich dazu auch gleich den Rumpf und das Höhenleitwerk beschaffen, um von den Erfahrungen des oder der Entwickler zu profitieren. Die bei den Bunthöhen ermöglichte größere Höhe wird meist durch eine schlechtere Längsstabilität und limitiertere Thermikeigenschaften erkaufte, weil sich die Nachlaufdelle im Gleitflug ungünstig auswirkt. Beim senkrechten

Hochschießen funktioniert das Regelsystem sowieso nicht. Das Modell wird vom Timer gesteuert, was zulässig ist, da diese Phase nur kurze Zeit dauert – „zulässig“ im Sinne, dass eine Abweichung noch gering bleibt.

## F1B-Modelle

Wakefieldmodelle durchlaufen beim Steigflug (entsprechend der Dehncharakteristik des Gummis) bei den Auftriebskoeffizienten den Bereich von 0 bis 0,95. Wollte man die Beeinflussung des Höhenleitwerks durch die Nachlaufdelle vermeiden, müsste der Flügel mit einem negativen Winkel von  $-4,5^\circ$ , (bezogen zur Rumpflängsachse) eingebaut werden. Vergleicht man Dreiseitenansichten erfolgreicher Modelle, so können zwei verschiedene Trends festgestellt werden: Flügelseinstellungen von  $2,5^\circ$  bis  $3^\circ$  und solche zwischen  $0^\circ$  und  $1^\circ$ , wobei heute klar die letzteren dominieren. Da das Regelsystem nur bei Horizontalabweichungen zwischen  $+70^\circ$  und  $-70^\circ$  funktioniert, macht es Sinn, die Nachlaufdelle in den Bereich zu legen, bei dem das Modell im nahezu senkrechten Steigflug gesteuert wird (VIT, SLW). Bei der  $2,5^\circ$  bis  $3^\circ$  Variante macht sich die Nachlaufdelle in der ohnehin schwierigen Übergangsphase vom Burst zum Cruise bemerkbar. Beim Cruise profitieren Modelle von einem hohen Stabilitätsmaß. Der „Lindner Trimm“ (Ref. 4) hilft, dass sich dies beim Gleitflug nicht negativ auswirkt. Im Gleitflug liegt das Höhenleitwerk klar außerhalb des Einflussbereichs der Nachlaufdelle.

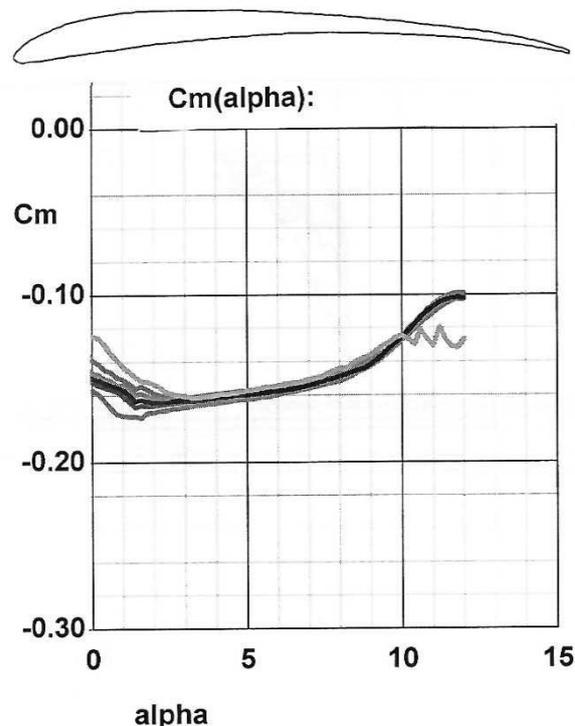
## F1C-Modelle

Hier gilt prinzipiell das Gleiche wie bei F1B. Der senkrechte Steigflug ist gesteuert und beim Gleitflug besteht bei den üblichen Auslegungen keine Gefahr, dass sich die Nachlaufdelle bemerkbar macht. Noch eine Bemerkung zum Rumpfwiderstand: Windkanalversuche lassen den Schluss zu, dass im praktikablen Anstellwinkelbereich der Rumpfwiderstand nahezu konstant bleibt. Es ergibt daher keinen Sinn, zur Widerstandsminderung den Rumpf in die Strömungsrichtung zu stellen und sich damit Probleme mit der Nachlaufdelle einzuhandeln.

## F1E-Modelle

Punkto Längsstabilität ist F1E die schwierigste Kategorie. Hier besteht keine Möglichkeit den Kurvenflug als Stabilisierungshilfe ins System einzubeziehen. Daher müssen alle bekannten Maßnahmen zur Realisierung einer guten Längsstabilisierung verwirklicht werden: optimales Stabilitätsmaß, saubere lineare Höhenleitwerkspolare, Vermeidung der Nachlaufdelle, günstiges Flügelprofil. Wie das optimale Stabilitätsmaß gefunden wird, ist schon oft beschrieben worden (z.B. Ref. 5). Der Irrweg, die Probleme der Thermikbremse mit überdimensionierten Höhenleitwerken zu lösen (was der Forderung des optimalen Stabilitätsmaßes diametral entgegensteht) hat sich erledigt, seit Dämpfer in den Auslösestrang zum Höhenleitwerk eingebaut werden.

Eine lineare Höhenleitwerkspolare erreicht man am besten mit der Profilierung einer „Ebenen Platte“, einem Turbulator bei den üblichen Höhenleitwerksprofilen oder einer Verwindung/Verzug. (Damit wird die Unstetigkeitsstelle der Polare geglättet, allerdings auf Kosten des Arbeitsbereichs.) Der Einbauwinkel des Flügels zur Rumpflängsachse sollte  $2^\circ$  nicht überschreiten



**Bild 7. Günstiger Verlauf der Momentenbeiwerte bei einem F1E Profil bei verschiedenen Reynoldszahlen.**

um sicherzustellen, dass die Nachlaufdelle vermieden wird. Ein Flügelprofil, das auch für die Längsstabilität günstig ist, zeigt einen linearen Verlauf des Momentenbeiwertes über den benützten Anstellwinkelbereich (Bild 7). Falls nicht alle dieser Voraussetzungen erfüllt sind, muss das Modell schneller getrimmt werden, was nicht immer vorteilhaft ist.

## F1D-Modelle

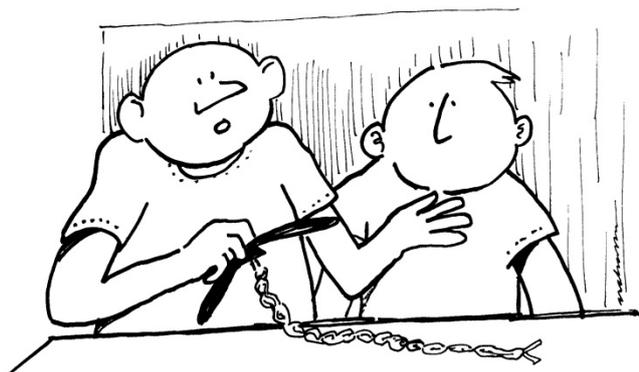
Bisher wurde nur ein Teilaspekt des Abwindfeldes (vertikale Komponente in Rumpfnähe) benötigt. Bei Saalflugmodellen ist dies anders. Wegen der Dämpfung der schwachen Luftbewegungen kann all das theoretische und praktische Wissen über Abwindfelder bestenfalls als vager Hinweis der zu erwartenden Effekte verwendet werden. Wie bereits erwähnt wurde, sind normalerweise tragende Höhenleitwerke für Leistungsmodelle ungeeignet. Bei F1A-C sowieso, weil Fläche viel nutzbringender im Flügel investiert wird, dazu kommt der beträchtliche Zusatzwiderstand des im Flügelabwind operierenden Höhenleitwerks. F1E-Modelle haben keine Flächenvorschriften (abgesehen von den praxisfernen  $1,5$  Quadratmetern als oberes Limit). Würde versucht, ein großes Höhenleitwerk bei einem adäquaten Stabili-

tätsmaß zu realisieren, wäre zudem die ungünstige Windfahnenwirkung ein weiterer Nachteil. Experimente, um Informationen über das Abwindfeld bei F1D zu finden, sind nur ansatzweise unternommen worden. Hin- gegen zeigen die evolutionär entwickelten F1D-Modelle anhand der Winkel von Flügel und Höhenleitwerk, dass der Abwind stark, aber nicht vollständig gedämpft wird. Bei guten Bedingungen sind die tragenden Höhenleit- werke wegen des viel geringeren Zusatzwiderstands im stark gedämpften Flügelabwind günstiger, was aller- dings im Zusammenhang mit einer rigiden Reglemen- tierung (Maximalspannweite und Tiefe für Flügel und Höhenleitwerk vorgeschrieben), zu einer Art Einheits- modell geführt hat. Versuche mit einem kleinen Höhen- leitwerk von diesem Trend abzuweichen, zeigten nur bei turbulenten Bedingungen bessere Ergebnisse. Es gibt einige Hinweise, dass sowohl eine vertikale wie auch horizontale Staffelung von Flügel und Höhenleit- werk leistungsmäßig gewisse Vorteile bringt, weil dadurch der schädliche Abwindeinfluss weiter reduziert wird. Auf Grund dieser geometrischen Voraussetzungen (Staffelung) ist trotz der Unsicherheit bezüglich dem Abwindfeld zu erwarten, dass sich die Nachlaufdelle bei F1D-Modellen nicht ungünstig auswirkt. Es wäre eine interessante Aufgabe, mit Hilfe von beleuchteten Ara- midfilamenten am Ende von dünnen Stäben, bei einem fliegenden Modell Informationen zum Abwindfeld zu finden.

Zum Schluss möchte ich mich als Gelegenheits-F1A- Flieger noch bei Stefan Rumpp und Christoph Bach- mann für die praktischen Hinweise bei der Erstellung des F1A Teils bedanken.

## Referenzliste

- Ref.1: Fritz Dubs: Aerodynamik der reinen Unter- schallströmung, Birkhäuser Verlag Basel Stutt- gart 1966
- Ref.2: Stefano Duranti: Profili 2.30a Pro [www.profil2.com](http://www.profil2.com)
- Ref.3: Per Findahl: THE EVOLUTION OF F1A LAUN- CHING TECHNIQUES, NFFS Symposium 2020 (siehe auch THERMIKSENSE 4/2020)
- Ref.4: Dieter Siebenmann, Lindner Trim, THERMIKSEN- SE 2/2020
- Ref.5: Arthur Schäffler: Die Entwicklung von A-1 Hochleistungsmodellen, Mechanikus 1966



## Hansheiri Thomann

Fortsetzung von Seite 12

Wasserhahnen die pfeifen und im Wind umlaufende Seilbahn-Sessel. Sportler werden im Windkanal ange- blasen und Anzüge für Skisportler und Bobfahrer getes- tet.

Als Ausgleich zu seiner fordernden beruflichen Tätigkeit verbringt Hansheiri viel Zeit in der freien Natur. Er liebt anstrengende körperliche Belastungen. Im Sommer Bergtouren, im Winter Langlauf. 44 mal bestreitet er den berühmten Engadin Skimarathon. Bei zahllosen Waldläufen entstehen in seinem Kopf Vorträge und Be- richte.

### Im Ruhestand



**Hansheiri mit einer Enkelin am Klettersteig**

Nun plötzlich frei - auch seine Angehö- rigen lieben die Berge. Ei- ne besondere Attraktion ist die „Fiamma“, eine glatte Granitnadel hoch über dem Bergell, die der Groß- vater jeweils im Vorstieg meistern muss. Dane- ben lockt der

Klettersteig „La Resgia“ bei Pontresina. Wenn bei einem Besuch der folgende Tag geplant wird, heißt es meistens: Klettersteig. Hansheiri hofft, dass er es auch im kommenden Jahr noch schafft.

Hansheiri hat auf unsern Wunsch seine hochinteres- sante Lebensgeschichte mit viel Aufwand auf den Compu- ter gesprochen und an diesem Beitrag mitgearbeitet. Er hat dem Freiflugsport viel geschenkt. Wir danken ihm und wünschen, dass er in bester Gesundheit noch viel Zeit in seinem Feriendomizil Samedan in der geliebten Bündner Bergwelt verbringen darf. Walter Eggimann

„Nun, es gibt die Entwicklung der Zelle und es gibt die Entwicklung der Antriebstechnik. Hier haben wir den Antrieb.“