

Gibt es eine spezielle Trudelproblematik bei den Starrflügeln?

Im Rahmen meines zweiteiligen Artikels „Starrflügler contra Flexible“ (DHV-„Info“ Nr. 109 und Nr. 110) habe ich auf die spezielle Trudel-Charakteristik der Starrflügel und die daraus resultierenden Gefahren bereits aphoristisch hingewiesen. Alles, was ich dort gesagt habe, gilt uneingeschränkt auch weiterhin. Nur hat sich während der vergangenen Saison gezeigt, dass ein darüber hinausgehender, detaillierterer Informationsbedarf seitens der Pilotenschaft besteht. Und das nicht ohne eine gewisse Berechtigung. Im letzten Jahr haben sich mehrere Trudel-Fälle mit Starrflügeln ereignet, die grundsätzliche Fragen zu diesem Phänomen wachgerufen haben.

1 Kein Anfänger-Problem

Dass große Erfahrung im Fliegen von **flexiblen** Drachen nicht automatisch davor schützt, unfreiwillig Opfer von Trudeln mit dem Starrflügel zu werden, zeigt beispielsweise der tödliche Unfall des erfahrenen französischen Wettkampfpiloten Serge Tastet mit einem Top Secret im April vergangenen Jahres, der für Aufruhr in der Starrflügelszene gesorgt hatte (siehe: „The Oz Report“, Volume 5, 2001, Nr.78, Nr.86, Nr.100, Nr.101, Nr.102 und Nr.105 unter www.davisstraub.com/OZ/).

Die Trudelproblematik bei Starrflügeln ist also kein Problem, welches nur Drachenflug-Anfänger betrifft.

Die vom unfreiwilligen Trudeln betroffenen Piloten berichten übereinstimmend, dass die Trudel-Situation für ihr subjektives Erleben „wie aus heiterem Himmel“ aufgetreten sei. Der objektive Grund für dieses subjektive Erleben liegt aber in der Regel in einer mangelnden Sensibilität der jeweiligen Piloten für die Strömung an ihrem Flügel. So hart dies vielleicht klingen mag, muss ich es in dieser Klarheit doch gleich zu Beginn aussprechen. Das ändert allerdings nichts daran, dass die Trudelanfälligkeit von Starrflügeln durch konstruktive Maßnahmen entschärft werden kann.

2 Ziele

Gefahren kann nur dann bereits im Vorfeld wirksam begegnet werden, wenn diese nicht durch Ignoranz verdrängt, sondern durch Akzeptanz als solche ernst genommen werden. Um geeignete Abwehrstrategien gegen potentielle Gefahren entwickeln zu können, bedarf es einer realistischen Beurteilungsgrundlage der betreffenden Verhältnisse.

Die folgenden Ausführungen haben demnach einerseits zum Ziel, das Bewusstsein der Starrflügel-Pilotenschaft dahingehend zu schärfen, sich erstens ihrer Reaktionsmuster und instinktiven Reflexe klar zu werden, die sie beim Fliegen mit flexiblen Drachen zur Gewohnheit ausgebildet haben, und diese dann zweitens in der entsprechend notwendigen Weise zu ändern. Vorhandene Ängste hinsichtlich des Phänomens Trudeln lassen sich durch Einsicht in die physikalisch-aerodynamischen Vorgänge zugunsten einer wohlbegründeten Vorsicht und vorbeugenden Wachsamkeit abbauen.

Andererseits werden zu Beginn ausgewählte konstruktive Faktoren erläutert, welche eine prinzipielle Trudelanfälligkeit von Starrflügeln bewirken können. Dabei soll die Frage geklärt werden, ob bei Starrflügeln gegenüber flexiblen Drachen eine grundsätzlich größere, konstruktionsbedingte Trudelanfälligkeit besteht.

Ausdrücklich sollen also weder bestehende Ängste in bezug auf das Trudeln mit Starrflügeln geschürt, noch tatsächlich gegebene Probleme verharmlost werden!

3 Das Phänomen des Trudelns

Vom physikalisch-aerodynamischen Standpunkt aus ist das Trudeln mit dem Starrflügel ein extrem komplexer Vorgang, der als Gesamtphänomen mathematisch-physikalisch noch nicht exakt berechnet worden ist. Die Gesetze und Kräfte des Einleitvorgangs sind relativ klar und überschaubar sind, während die Kräftesituation im Trudeln und das Ausleiten desselben praktisch nicht berechenbar sind. Insofern zeigen die folgenden Ausführungen nur gewisse Tendenzen auf.

Das Gesamtphänomen des Trudelns setzt sich aus drei Phasen zusammen: 1. Einleiten, 2. eigentlicher Trudelzustand, 3. Ausleiten.

3.1 Das Einleiten

Wird ein Starrflügel mehr und mehr verlangsamt (sukzessive Anstellwinkelvergrößerung durch Drücken) und gleichzeitig ein deutlicher Steuerimpuls zu einer Seite gegeben (z.B. beim Kurbeln in der Thermik), so wird mehr oder weniger schnell ein Punkt erreicht, wo sich die Strömung einseitig am langsameren, kurveninneren Flügel abzulösen beginnt. Mit diesem einseitigen Strömungsabriss geht ein lokaler Auftriebseinbruch einher, so dass der kurveninnere Flügel durchsackt (Abkippen) und der Starrflügel in eine Fall-Drehbewegung übergeht. Befindet sich die Stelle, an dem die Strömungsablösung beginnt, **hinter** dem Schwerpunkt eines rückwärtsgepfeilten Nurflügels, so führt dieser Auftriebseinbruch und die nachfolgende Fall-Drehbewegung zu einem aufbäumenden Moment des durchsackenden Flügels. Dadurch kommt es zu einer zusätzlichen Anstellwinkelvergrößerung des gesamten Flügels, woraufhin sich die Strömungsablösung am kurveninneren Flügel noch mehr ausbreitet (**sich selbst verstärkender** Prozess). Am schnelleren Außenflügel liegt die Strömung weiterhin an und produziert Auftrieb. Bis zu diesem Stadium sind aerodynamische Kräfte und Wirkungen ausschlaggebend.

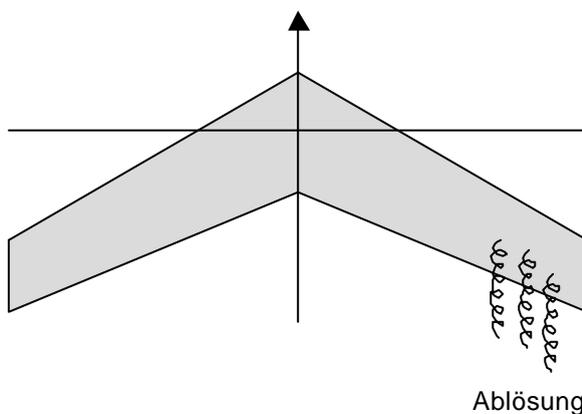


Abb. 1 Einseitige Strömungsablösung **hinter** dem Schwerpunkt eines rückwärtsgepfeilten Nurflügels...

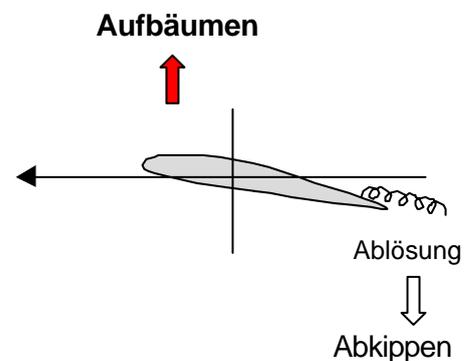
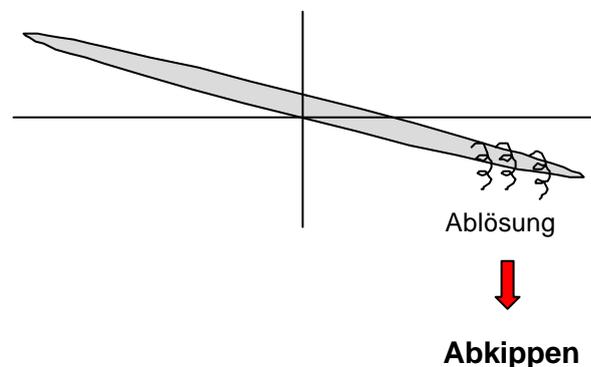


Abb. 2 / 3 ...führt zum Abkippen und Aufbäumen des Flügels

3.1.1 Fahrt ist nicht alles! - „Hoch“geschwindigkeits-Stall

Ein erhöhtes Bewusstsein für die Geschwindigkeit des Flügels wird in vielen Fällen dem ungewollten Einleiten von Trudeln weitgehend vorbeugen. Viele Piloten glauben aber, dass eine zusätzliche Fahrtreserve bei turbulenter oder böiger Luft in **jedem** Fall vor einem einseitigen Strömungsabriss und anschließendem Trudeln schützt. Dem ist leider **nicht** so! Selbst wenn man beispielsweise immer mit 60 km/h fliegen würde, um möglichst viel Fahrtreserve gegenüber der Geräte-Stallgeschwindigkeit von beispielsweise 30 km/h zu besitzen, so ist das noch keine Garantie dafür, dass man tatsächlich in jeder Situation vor ungewollten Stalls und damit beim Kurbeln vor ungewolltem Trudeln geschützt wäre. Denn:

! Strömungsabriss und damit Trudeln sind aerodynamisch gesehen keine Frage der Geschwindigkeit, sondern eine **Frage des Anstellwinkels!**

Nur insofern die Geschwindigkeitsänderung der um die Querachse gewichtskraftgesteuerten Starrflügel zugleich eine Anstellwinkeländerung bedeutet, ist Trudeln für die Flugpraxis zum Teil eine Frage der Geschwindigkeit.

Wenn man in turbulenter Luft z.B. mit 60 km/h kurbelt, und eine thermische oder sonstige Böe den Flügel einseitig mit den entsprechenden, genügend stark von unten wirkenden, vertikalen Kraftvektoren trifft, so kann selbst bei der relativ hohen Geschwindigkeit von 60 km/h der einseitig „getroffene“ Flügel stallen und das Gerät zum Trudeln führen. Die Anstellwinkelvergrößerung, welche durch die von unten wirkende Böe verursacht wird, kann so groß sein, dass die Strömung dem Profilverlauf des Flügels nicht mehr folgen kann und abreißt. Dadurch besteht die Gefahr des zunächst überraschend erscheinenden „Hoch“geschwindigkeits-Stalls, der trotz geringer Schwerpunktrücklage (d.h. ohne Drücken!) zustande kommen kann. Genügend Schutz bietet hier neben einem Böen-Zuschlag (Fahrtreserve, d.h. kleinerer Anstellwinkel) nur eine **ausreichend große Flügel-Schränkung!**

3.2 Eigentlicher Trudelzustand

Befindet man sich bereits **im** Trudeln, so wirken am Starrflügel keine für die Spoiler-Steuerung relevanten aerodynamischen Kräfte mehr! Im Gegensatz zum Vorgang des Einleitens wird daher die Trudel-Charakteristik selbst nicht durch Faktoren wie die Profilform, die Schränkung oder den Flügelgrundriss beeinflusst. Darüber hinaus lassen sich die Trudel-Größen, d.h. die Geschwindigkeit der Trudelumdrehungen, der Durchmesser der Trudel-„Kreise“ und die Trudel-Schräglage (Längs- und Querneigung) des Starrflügels durch bewusste Steuerimpulse **nicht** kontrollieren. Diese Größen werden vor allem durch die Massenverteilung des Gerätes beeinflusst. Pilot und Gerät sind im Trudeln also vor allem **Fliehkraft-** und **Kreiselgesetzen** unterworfen!

! Trudeln ist ein **nicht-steuerbarer** Flugzustand!

Dieser Umstand macht Trudeln mit Starrflügeln so **gefährlich!**

Der Starrflügel führt im Trudeln eine rotierende, korkenzieherartige Fall-Drehung um seine Hochachse aus, deren Drehzentrum meist (je nach Modell) knapp außerhalb des Flügels liegt, etwa im ersten Drittel bis in der Mitte der Halbspannweite vor der Anströmkannte. Die Fall-Drehbewegung ist mit großem Höhenverlust verbunden.

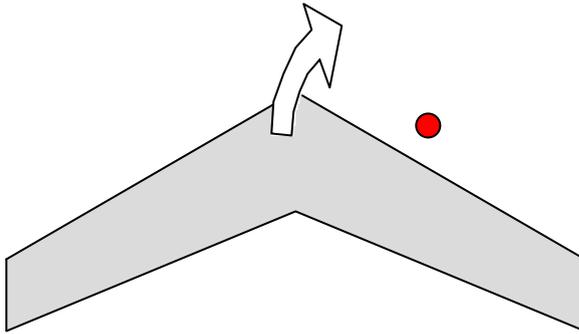


Abb. 4 Drehzentrum beim Rechts-Trudeln

Wurde das Trudeln gewollt eingeleitet und ist ein stationäres Trudeln beabsichtigt, so muss weiterhin sehr massiv voll gedrückt werden, um den Trudel-Zustand aufrechtzuerhalten. Ist man ungewollt ins Trudeln geraten und greift man nicht aktiv in die Bewegung ein, so wird der Starrflügel, abhängig vom Modell und vor allem von der Größe, nach $\frac{1}{2}$ Umdrehung bis $1\frac{1}{2}$ Umdrehungen eigenständig immer mehr die Nase nach unten nehmen (Anstellwinkel-Verkleinerung) und in eine Art Sturzflug übergehen. Damit wird die Trudel-Bewegung gestoppt und der Flügel bei hoher Fahrt (etwa 80 km/h) abgefangen. Der Höhenverlust durch den Abfangweg beträgt hierbei 50 - 80 m. Beim unfreiwilligen Trudeln in Bodennähe kann es also sehr schnell lebensgefährlich werden (siehe der tödliche Unfall von Serge Tastet)! Die mit dem Abfangen verbundenen Belastungen können sehr hoch sein und bis ans Limit der Struktur gehen (s.u.).

! Wegen des Höhenverlustes von etwa 50 – 80 m beim Abfangen sollte im Zweifelsfall beim Trudeln in Bodennähe **sofort** der Rettungsfallschirm gezogen werden!

3.3 Das Ausleiten

In den meisten Fällen kann Trudeln aktiv wieder ausgeleitet werden, sofern die gegebene Höhe dazu ausreicht. Um eine gewollte oder ungewollte Trudelbewegung zu beenden, sollte man schnell möglichst viel Fahrt aufnehmen (Anstellwinkelverkleinerung) und anschließend gegen die Drehrichtung steuern.

! Zum Ausleiten von Trudeln **Fahrt aufnehmen** und anschließend **gegen** die Drehrichtung steuern! Es reicht **nicht** aus, wie bei flexiblen Drachen nur etwas zu ziehen, sondern es muss in der Regel massiv gezogen werden!

Ein besonderes Problem des Starrflügels beim Ausleiten aus dem Trudeln hängt mit der speziellen Spoiler-Steuerung zusammen, deren Funktionsweise eine kombinierte „Querruder-Seitenruder“-Steuerung darstellt. Durch die zum Teil chaotischen Bewegungen des Starrflügels während des Trudeln kann der Flügel in Schiebeflugzuständen aus dem Trudeln herauskommen. Wegen der Ruderkombination in Form der Spoiler ist es jedoch nicht möglich, diese Schiebezustände zu kontrollieren, d.h. gezielt zu beenden. Schlimmstenfalls kann man durch bestimmte aerodynamische Effekt in der Ausleitphase unfreiwillig sogar auf den Rücken geworfen werden!

3.4 „Chaotische“ Vorgänge

Steuerbar und damit bis zu einem gewissen Maß kontrollierbar sind also das Einleiten und das Ausleiten des Trudeln, **nicht** aber das Verhalten des Gerätes im Trudeln selbst. Während des Trudeln ist man Spielball der rechnerisch nicht vorhersagbaren, zum Teil chaotischen Kräfte-Verhältnisse, die sich aus der Massenverteilung des Gerätes ergeben. Zur Wiederholung: dies macht Trudeln mit Starrflügeln so **gefährlich**! Unterstützt wird dieses weitgehende Ausgeliefertsein im Trudeln durch das Wackeltrapez der meisten Starrflügel,

das durch sein seitliches Spiel den wirkenden Flieh- und Kreiselkräften vollständig unterworfen ist (sowie der Pilot, der sich am Trapez festhält, s.u.).

! **Große Modelle** sind zunächst schwerer ins Trudeln zu bringen (geringere Anfälligkeit, einzuleiten, wegen Trapezstellung, mit der weniger leicht gestallt werden kann, s.u.), verhalten sich aber im Trudeln „giftiger“, d.h. chaotischer und unkontrollierbarer (da bei größeren Spannweiten weiter auseinanderliegende Massen und größere „Hebel“-Verhältnisse (relativ zum Schwerpunkt) vorliegen)!

Kleine Modelle sind leichter ins Trudeln zu bringen (größere Anfälligkeit, einzuleiten, wegen Trapezstellung, die leichteres Stellen ermöglicht), verhalten sich aber im Trudeln stationärer und kontrollierbarer (da weniger weit auseinanderliegende Massen und kleinere „Hebel“-Verhältnisse vorliegen (Konzentration der Massen mehr beim Schwerpunkt))!

4 Die c_a -Belastung des Flügels und ihre Bedeutung fürs Trudeln

Schränkung und Zuspitzung in Verbindung mit dem $c_{a\max}$ -Wert (örtlicher maximaler Auftriebsbeiwert) haben einen unmittelbaren, maßgeblichen Einfluss auf die sogenannte c_a -Belastung eines Flügels, insbesondere des Flügelendes, dem hinsichtlich des Trudelns besondere Bedeutung beikommt. Die c_a -Belastung des Außenflügels steht wiederum in direktem Zusammenhang mit der Trudel-Anfälligkeit eines Flügels.

4.1 Die Formel und ihre Interpretation

Der lokale Auftriebsbeiwert c_a am einzelnen Profil-Schnitt wird durch folgende Formel erklärt:

$c_a = A / q \cdot l$, wobei A der Auftrieb, q der Staudruck und l die lokale Profiltiefe sei. Der Auftriebsbeiwert an einer Stelle ist also der Auftrieb **in Relation** zum Staudruck und zur Profiltiefe an dieser Stelle.

Die c_a -Belastung eines Profils ergibt sich aus dem **Verhältnis** von örtlichem c_a -Wert zum $c_{a\max}$ -Wert des Profils an der gleichen Stelle des Flügels: **c_a -Belastung: $= c_a / c_{a\max}$** .

Wie aus den beiden Formeln ersichtlich ist, steigt die lokale c_a -Belastung am Profil umso mehr an, entweder je größer der Auftrieb A oder aber je kleiner der Staudruck q oder die örtliche Profiltiefe l ist (oder je kleiner der $c_{a\max}$ -Wert ist). Nun wächst der c_a -Wert an, wenn der Anstellwinkel und daraus resultierend der Auftrieb erhöht wird. Das bedeutet, dass im Langsamflug (größerer Anstellwinkel z.B. bei Start und Landung und zugleich niedrigerer Staudruck) prinzipiell die c_a -Belastung des Flügels größer ist als im Schnellflug (niedrigerer Anstellwinkel und zugleich größerer Staudruck).

4.2 Lokales Überschreiten des $c_{a\max}$ -Wertes und seine Bedeutung fürs Trudeln

Eine elliptische Profiltiefenverteilung des Flügel-Grundrisses (und daraus resultierend eine elliptische Auftriebsverteilung mit minimalem induzierten Widerstand) besitzt ein stärker c_a -belastetes Flügelende. Und eine hohe c_a -Belastung im Bereich kleiner Flügeltiefen bedeutet, dass in diesem Bereich des Flügels das Anstellwinkelfenster, innerhalb dem die Strömung am Flügel noch anliegt und nicht abreißt, kleiner ist, als bei geringerer c_a -Belastung in diesem Flügelabschnitt. Denn je höher die lokale c_a -Belastung eines

Flügelabschnitts durch seine konstruktive Formgebung bereits von vornherein ist, desto schneller wird durch eine Anstellwinkel-Vergrößerung (Verlangsamung des Starrflügels durch Drücken z.B. in der Thermik) der lokale $c_{a\max}$ -Wert erreicht, d.h. der lokal maximale Auftriebsbeiwert, nach dessen Überschreiten die Strömung an dieser Stelle abreißt. Liegt diese Stelle entsprechend nahe am Flügelende, so kann dadurch der Flügel zum Abkippen gebracht werden. Je höher also die c_a -Belastung im Außenflügel ist (und entsprechend niedrig der lokale $c_{a\max}$ -Wert der dort verwendeten Profile), desto weniger gutmütig ist der Flügel hinsichtlich seines Abrissverhaltens und desto trudelanfälliger ist er.

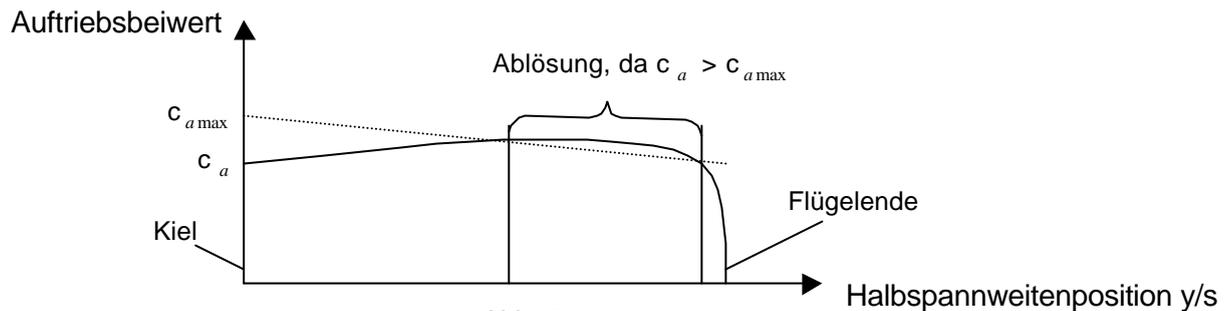


Abb. 5

5 Die Trudelanfälligkeit beeinflussende Faktoren

Die Gestalt der Auftriebsverteilung eines Starrflügels entscheidet nicht nur über die Geräteleistung, sondern vor allem über die Flugeigenschaften des Gerätes, insbesondere über seine Gutmütigkeit hinsichtlich des Abrissverhaltens und daraus resultierend über seine Trudelanfälligkeit. Die Form der Auftriebsverteilung eines Starrflügels wird bestimmt durch die Tragflügelgeometrie des Starrflügels. Die Tragflügelgeometrie ergibt sich aus einer Vielzahl sehr komplex zusammenwirkender Faktoren. Diese Faktoren sind unter anderem: die Flügel-Schränkung und ihr Verlauf entlang des Flügels (Schränkungsverteilung), der Flügel-Grundriss, die Flügel-Zuspitzung, die Flügelprofilverteilung, die Profiltiefenverteilung, die Pfeilung, die V-Form und die Streckung. Bei gepfeilten Nurlügeln hängt darüber hinaus die Schwerpunktlage (Lage des Massenmittelpunkts) des Flügels unmittelbar mit der Auftriebsverteilung zusammen.

Vier Hauptfaktoren, welche die Trudelanfälligkeit eines Starrflügels maßgeblich beeinflussen, also die Tendenz, das Trudeln einzuleiten, sind: 1. Flügel-Schränkung, 2. Flügel-Zuspitzung, 3. Trapezstellung, 4. Schwerpunktlage (Trimmung).

5.1 Schränkung und ihre Bedeutung fürs Trudeln

5.1.1 Momenten-Gleichgewicht

Statische Längsstabilität (s.u.) eines Starrflügels wird durch Schwerpunktvorlage erreicht, d.h. dadurch, dass der Schwerpunkt X_S vor dem Neutralpunkt X_N liegt. Da der Auftrieb A im Neutralpunkt hinter dem Schwerpunkt (Angriffspunkt der Gewichtskraft G) angreift, resultiert hieraus ein kopflastiges (negatives) Nickmoment $(X_N - X_S) \cdot A$. Der Flügel möchte also von sich aus auf die Nase gehen.

Desweiteren besitzen Starrflügel in der Regel Flügel-Profile mit kleiner Druckpunktwanderung und geringem negativen Profilmoment M_P .

Um nun für einen stationären Geradeausflug ein Momenten-Gleichgewicht zu erhalten, muss der Flügel mit einer negativen Flügelschränkung versehen werden, die ein positives Drehmoment M_S erzeugt, das die zwei negativen Momente $(X_N - X_S) \cdot A$ und M_P ausgleicht:

$$-(X_N - X_S) \cdot A - M_P + M_S = 0 \Leftrightarrow M_S = (X_N - X_S) \cdot A + M_P.$$

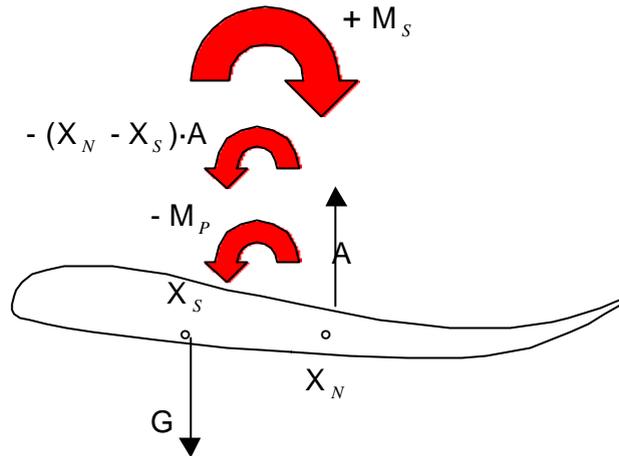


Abb. 6 Momenten-Gleichgewicht im stationären Geradeausflug

Als Ausgleich zu einem deutlichen negativen Profilmoment wäre wegen des fehlenden Höhenleitwerks von Starrflügeln eine sehr große, leistungsmindernde negative Schränkung notwendig. Für den stationären Geradeausflug reicht im Normalfall eine verhältnismäßig geringe Schränkung aus, um das geringe negative Profilmoment auszugleichen und dadurch ein Momenten-Gleichgewicht herzustellen. Für den Kurvenflug jedoch ist diese geringe Schränkung in Hinblick auf die Trudel-Gefahr **nicht** ausreichend!

5.1.2 Einfluss der Schränkung auf die Auftriebsverteilung und das Abrissverhalten

Durch die Realisierung einer möglichst elliptischen Auftriebsverteilung lässt sich der induzierte Widerstand minimieren. Wobei der induzierte Widerstand die überragende Rolle im Langsamflug spielt, hingegen im Schnellflug der Schädliche Widerstand (Rest-, Piloten- und Profilwiderstand). Eine mathematisch exakte elliptische Auftriebsverteilung mit minimalem induzierten Widerstand wird durch einen ungeschränkten und ungepfeilten Flügel mit elliptischem Grundriss erreicht. Diese optimale Auftriebsverteilung ist nicht mehr möglich, sobald außer dem Gesamt-Auftrieb noch weitere Größen wie Pfeilung und Schränkung vorgegeben werden. Wollten wir also nur geradeaus fliegen, so könnte das mit einem sehr wenig geschränkten Flügel mit minimiertem induzierten Widerstand geschehen.

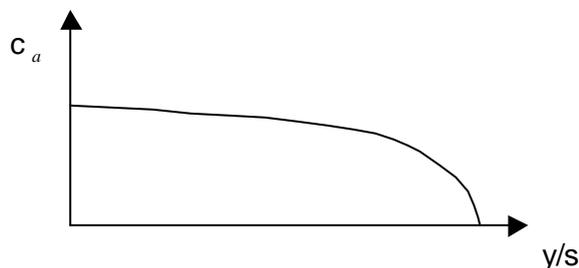


Abb. 7 Elliptische Auftriebsverteilung eines Flügels **ohne** Schränkung

Um aber gutmütige Flugeigenschaften insbesondere für den Kurvenflug zu erzielen, müssen bei der Auslegung der Tragflügelgeometrie rückwärtsgepfeilter Starrflügel Kompromisse in der aerodynamischen Güte der Auftriebsverteilung eingegangen werden. Dazu erhalten die Flügelenden eine ausreichende negative Schränkung von etwa -5° bis -7° .

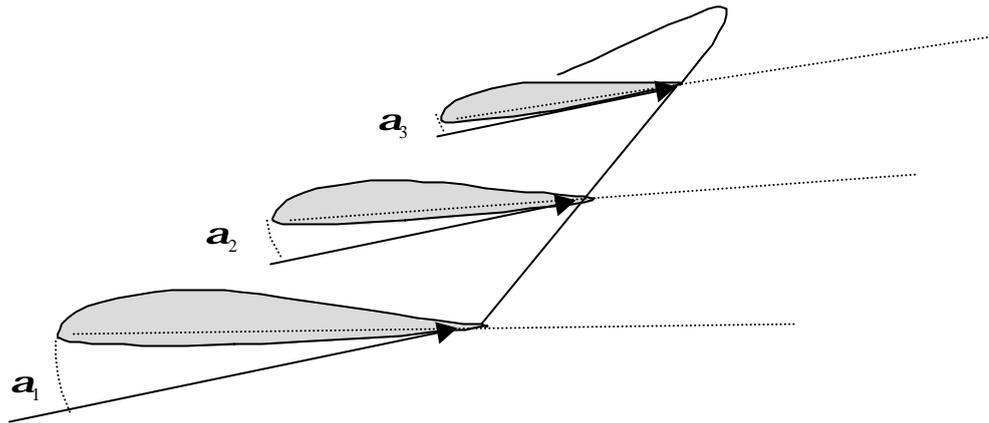


Abb. 8 Mit zunehmender negativer Schränkung zum Flügelende hin verringern sich die lokalen Anstellwinkel $\mathbf{a_1 - a_3}$

Schränkung im Außenflügel bewirkt lokal einen geringeren Anstellwinkel, der wiederum eine lokale Auftriebsverminderung verursacht und dadurch die lokale c_a -Belastung verringert. Daraus resultiert eine unterelliptische Auftriebsverteilung, die größeren induzierten Widerstand zur Folge hat.

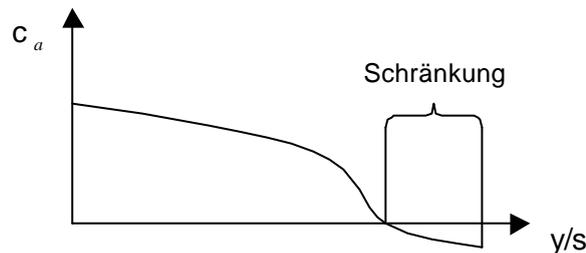


Abb. 9 Unterelliptische Auftriebsverteilung eines Flügels **mit** Schränkung

Die Schränkung am Flügelende soll verhindern, dass beim Überschreiten des kritischen Anstellwinkels die Strömungsablösung zuerst am Flügelende beginnt und sich damit die Abkipps- und Trudelneigung verstärkt. Um ein unkritisches Abrissverhalten zu erhalten, sollte die Strömung also zuerst etwa in der Mitte der Halbspannweite abreißen.

! Schränkung im Außenflügel macht den Flügel abkippsicherer und weniger trudelanfällig!

Die negative Auswirkung größerer Schränkung vor allem im Schnellflug ist der Grund, weshalb Wettkampfpiloten häufig ihre Geräte durch „Runterlassen“ tunen, d.h. durch bewusstes Verringern ihrer Schränkung. Kann ein Gerät im Endanflug bei weniger Bügelndruck sehr schnell geflogen werden, so bedeutet dies einfach mehr Komfort und Spielraum. Weniger Schränkung ergibt dadurch ein größeres Endanflug-Potential des Gerätes. Aber, ich möchte trotzdem **ausdrücklich** vor dieser Praxis warnen, denn:

! Zuviel „Runterlassen“ beeinflusst das Abrissverhalten des Flügels auf gefährliche Weise negativ und sollte deshalb **niemals** bis unter die Gütesiegel-Grenzwerte gehen!

Im übrigen ist es ein Trugschluss, von wenig Bügeldruck direkt auf eine bessere Geräteleistung zu schließen. Diese Gleichsetzung ist im Allgemeinen falsch.

5.2 Zuspitzung und ihre Bedeutung fürs Trudeln

Zuspitzung des Flügels (Verjüngung zum Flügelende hin durch kleiner werdende Profiltiefen) wirkt sich wegen des sogenannten Pfeilungseffekt gepfeilter Flügel bis zu einem gewissen Maß positiv auf die Geräteleistung aus. Geht man aber von einer optimalen (elliptischen) Auftriebsverteilung aus, so haben stark zugespitzte, rückwärtsgepfeilte Nurfügel in der Regel ein weniger gutmütiges Stallverhalten als Rechteckflügel. Dies wird verständlich, wenn man die Formel $c_a = A / q \cdot l$ betrachtet. Bei unverändertem Auftrieb A und Staudruck q aber kleiner werdenden Profiltiefen l muss c_a und damit auch $c_a / c_{a \max}$ größer werden. Mit zunehmender Zuspitzung wird also die c_a -Belastung der Profile des Außenflügels immer größer. Dadurch wird der Beginn des Strömungsabrisses nach außen zum Flügelende hin verschoben, was man jedoch wegen einer Überzieh- und Trudelsicherheit vermeiden möchte.

! Stark zugespitzte, gepfeilte Flügel mit optimaler Auftriebsverteilung sind abkipp- und damit trudelfreudiger als Rechteckflügel!

Für einen Flügel mit starker Zuspitzung kann ein gutmütiges Abkippverhalten nur durch entsprechend große Schränkung im Außenflügel in Verbindung mit großer Schwerpunktvorlage und passender Wahl von Flügelprofilen am Flügelende (Profile mit hohem lokalem $c_{a \max}$ -Wert) erreicht werden (allerdings auf Kosten der Flugleistung).

5.3 Trapezstellung und ihre Bedeutung fürs Trudeln

5.3.1 „Alarmbereitschafts-Armhaltung“ und statisches Längs-Stabilitätsmaß

Angenommen, ein Pilot fliegt mit seinem bei 40 km/h ausgetrimmten Starrflügel in thermische oder sonstige Turbulenzen hinein. Dann wird er durch reflexartige Einnahme seiner „Alarmbereitschafts“-Armhaltung, die ihm persönlich Sicherheit vermittelt, den Steuerbügel zurücknehmen und hierdurch die Fahrt auf beispielsweise 60 km/h erhöhen. Nun bedeutet das Erhöhen der Fahrt durch Ziehen am Steuerbügel nicht nur eine Anstellwinkelverkleinerung, sondern gleichzeitig, dass der Schwerpunkt weiter vor dem Neutralpunkt liegt als vor der Geschwindigkeitserhöhung.

Als statisches Längs-Stabilitätsmaß s von Nurfügeln dient aber gerade der Abstand des Schwerpunkts S vor dem Neutralpunkt N (Schwerpunktvorlage). Die statische Längsstabilität von Nurfügeln nimmt zu, je weiter der Schwerpunkt vor dem Neutralpunkt liegt. Das heißt, dass sich durch Beschleunigen das Stabilitätsmaß des Starrflügels vergrößert! Durch Verlangsamen mittels Drücken verkleinert sich hingegen grundsätzlich das Stabilitätsmaß!

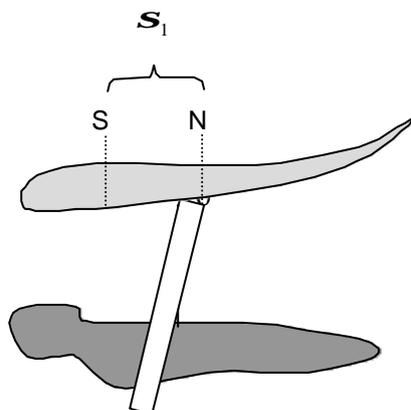


Abb. 10 Großes Stabilitätsmaß s_1 im Schnellflug

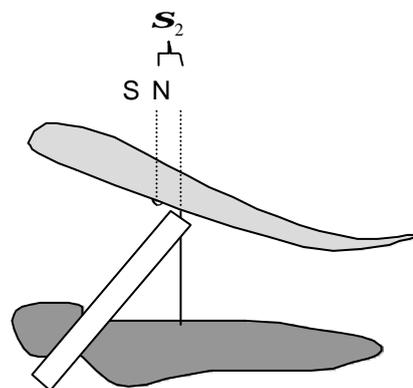


Abb. 11 Kleines Stabilitätsmaß s_2 im Langsamflug

Es ist wichtig, sich klarzumachen, dass diese „Alarmbereitschafts-Armhaltung“, die ein Pilot in turbulenter Luft instinktiv einnimmt, von der individuellen Armlänge des Piloten und seinem subjektiven Sicherheitsbedürfnis und -Empfinden abhängig ist. Das heißt, die persönliche „Alarmbereitschafts-Armhaltung“ wird immer **relativ** zum eigenen Körper eingenommen.

Nun sei angenommen, dass sich die Trapezbasis-Position zweier sonst baugleicher Starrflügel A und B (bei jeweils gleicher Trapezkopf-Position) um beispielsweise 8 cm voneinander unterscheiden. Das heißt, das Gerät A habe die Trapezbasis 8 cm weiter vorne positioniert als Gerät B. Der gleiche Pilot fliege nun einmal mit Gerät A und einmal mit Gerät B. Dabei nehme er beide Male die gleiche, persönliche „Alarmbereitschafts-Armhaltung“ ein (gleiche Armhaltung relativ zu seinem Körper). Da das Gerät A die Trapezbasis gegenüber Gerät B weiter vorne positioniert hat, fliegt der Pilot nach Einnahme seiner „Alarmbereitschafts-Armhaltung“ mit Gerät A automatisch mit einem **größeren** Stabilitätsmaß! Denn der Trapezbasis-Weg x von der Trimmposition (vordere Position) bis zur Position der „Alarmbereitschafts-Armhaltung“ (hintere Position) der weiter vorne positionierten Basis (Gerät A) ist länger als der Weg y der weiter hinten positionierten Basis (Gerät B). Dadurch wird bei Gerät A eine größere Anstellwinkelverkleinerung (d.h. mehr Geschwindigkeitszunahme und Schwerpunkt weiter nach vorne) vollzogen. In unserem Beispiel bedeutet der Unterschied von 8 cm etwa eine Differenz von $3-4^\circ$ im Anstellwinkel, die einen Geschwindigkeitsunterschied von etwa 5 km/h ausmacht, und ein mehr als doppelt so großes Stabilitätsmaß!

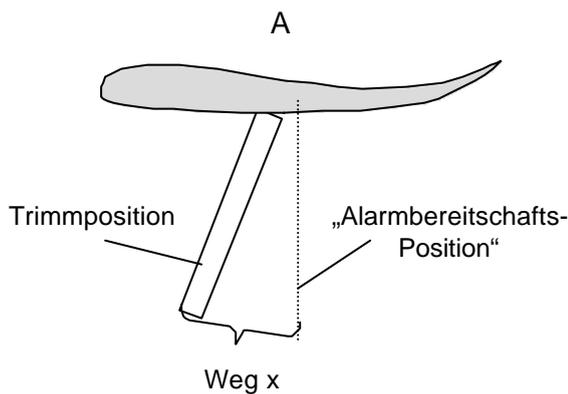


Abb. 12 Größeres Stabilitätsmaß bei Gerät A durch größeren Weg x

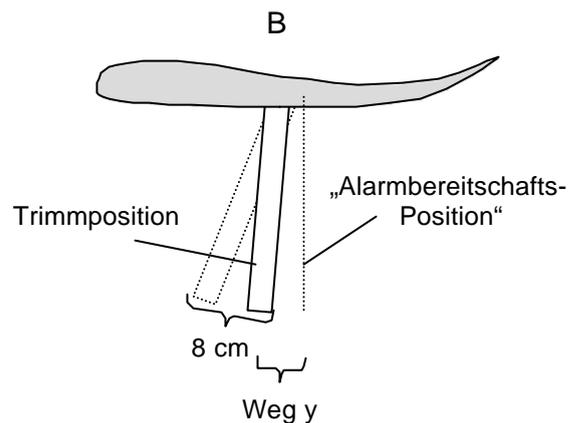


Abb. 13 Kleineres Stabilitätsmaß bei Gerät B durch kleineren Weg y

! Eine konstruktionsbedingt **möglichst weit vorne** positionierte Trapezbasis schützt durch ein größeres Stabilitätsmaß bei Einnahme der „Alarmbereitschafts-Armhaltung“ eher vor einseitigen Stalls und unfreiwilligem Trudeln in turbulenter Luft!

5.3.2 Baulicher Stall- und Trudelschutz

Darüber hinaus stellt eine relativ weit vorne positionierte Trapezbasis die einfache bauliche Maßnahme dar, die Gefahr, überhaupt ins Trudeln zu gelangen, deutlich zu verringern (Eingebauter Stall- und damit Trudelschutz hinsichtlich des **Einleitens**). Denn je weiter vorne die Trapezbasis in der Trimmposition bereits ist, desto schwerer kann man allein aufgrund der begrenzten Armlänge den Flügel durch Drücken (mit den Händen an der Basis) zum Stallen bringen. Die Landung in umgegriffener Armhaltung (Hände oben an den Steuerbügel-Seitenrohren) muss natürlich für eine durchschnittliche Armlänge immer gewährleistet bleiben.

! Eine **genügend weit vorne** positionierte Trapezbasis macht Stallen und unfreiwilliges Trudeln im normalen Flugbetrieb durch die begrenzte Armlänge fast unmöglich!

Die gleiche Wirkung wie eine weiter vorne positionierte Trapezbasis hätte ein Steuerbügel-Trapez mit längeren Steuerbügel-Seitenrohren, weil dadurch für die gleiche Anstellwinkeländerung ein größerer Steuerbügel-Ausschlag notwendig wäre. Außerdem wäre die Trimmposition der Trapezbasis von vorneherein weiter vorne. Dieser Effekt ist z.B. beim Tandem-Exxtacy Bi zu beobachten, der bei gleichem Flügel wie der Exxtacy 160 ein längeres Trapez besitzt.

5.4 Schwerpunktlage und ihre Bedeutung fürs Trudeln

Bei gepfeilten Nurfügeln beeinflusst die Form der Auftriebsverteilung unmittelbar die Schwerpunktlage des Flügels. Und die Flugeigenschaften von Nurfügeln, insbesondere deren Trudelanfälligkeit, hängen wesentlich von der Schwerpunktlage ab.

Eine Auftriebsverteilung, die im Bereich der Flügelenden entweder durch geringe Schränkung oder geringe Flügeltiefe (starke Zuspitzung) eine eher hohe c_a -Belastung gegenüber der Flügelwurzel aufweist, wird (durch Rückwärtspeilung) einen weit hinten liegenden Auftriebsmittelpunkt und damit auch Schwerpunkt besitzen. Das Umgekehrte ist der Fall bei einer niedrigen c_a -Belastung des Flügelendes durch lokal größere Schränkung und größere Flügeltiefe (geringere Zuspitzung). In diesem Fall werden Auftriebsmittelpunkt und Schwerpunkt weiter vorne liegen.

5.4.1 Trimmung

Flexible Drachen trimmt man normalerweise tendenziell eher zu langsam, weil dadurch die Kurbel-Charakteristik angenehmer ist: Ziehen in der Thermik ist einfach angenehmer als Drücken, und das Gefühl in der Thermik ist besser, wenn man nicht Drücken muss. Diese fürs Trimmen von flexiblen Drachen unkritische Angewohnheit sollte man **auf keinen Fall** für das Trimmen von Starrflügeln übernehmen! Zumindest nicht ohne Bewusstsein der möglichen negativen Folgen.

Bei einer Trimmung von Starrflügeln mit eher hinten liegendem Schwerpunkt kann Einfliegen in Thermik mit raschem Einkreisen zu einem Aufbäumen des Starren führen, das nicht genügend oder nicht schnell genug kontrolliert werden und unerwartet einseitiges Stallen und anschließendes Trudeln zur Folge haben kann. Außerdem ist bei einem langsam getrimmten Starrflügel die zum Stallen notwendige Kraft **geringer** als bei einem schneller getrimmten Gerät, so dass auch aus diesem Grund ein unfreiwilliges Stallen und eventuell anschließendes Trudeln leichter möglich ist!

Ein stark kopflastig getrimmter Starrflügel bedarf zum Momenten-Ausgleich einer entsprechend großen (negativen) Schränkung im Außenflügel. Umgekehrt kann man auch sagen, dass ein Flügel mit viel Schränkung entsprechend kopflastiger getrimmt werden muss, damit das Gerät trotz des schwanzlastigen Moments durch die Schränkung einen vernünftigen Bügeldruck aufweist. Durch einen weit vorne liegenden Schwerpunkt wird tendenziell eine geringere c_a -Belastung der Flügelenden bewirkt, wodurch sich die Abkippsicherheit vergrößert und die Trudelanfälligkeit des Flügels verringert (bei Leistungsverlust durch größere Schränkung). Große Schwerpunktrücklage (weniger Schränkung erforderlich) dagegen bewirkt tendenziell eine höhere c_a -Belastung der Flügelenden und vergrößert durch Abkippsneigung die Trudelanfälligkeit des Flügels.

! Eine **möglichst große** Schwerpunktvorlage verringert die Trudelanfälligkeit des Flügels, wohingegen eine schwanzlastige Trimmung Trudeln begünstigt!

Für die Flugpraxis ergeben sich gewisse Grenzen für die Schwerpunktvorlage dadurch, dass es erstens für die Landung möglich sein muss, den Flügel gegen die anwachsenden Steuerbügelkräfte zu stallen, und zweitens ein ständig notwendiges, deutliches Drücken beim Kurbeln das Gefühl für die Thermik erschwert.

5.4.2 Umtrimmen bei Änderung des Pilotengewichts

Angenommen, ein Pilot A mit einem Körpergewicht G_1 von 85 kg habe seinen Starrflügel für sich und sein Gewicht auf eine Trimmgeschwindigkeit v_1 (Geschwindigkeit beim freihändigen, stationären Geradeausflug) von 40 km/h getrimmt. Dann wird der Starrflügel von sich aus weder schneller noch langsamer werden. Die statische Längsstabilität des Starrflügels wird durch ein positives Stabilitätsmaß $s_1 > 0$ erreicht, d.h. der Schwerpunkt liegt um den positiven Betrag x vor dem Neutralpunkt (Schwerpunktvorlage).

Würde jetzt z.B. die Schränkung im Außenflügel konstruktiv (negativ) vergrößert werden, so würde hinsichtlich der Trimmgeschwindigkeit von 40 km/h ein Momenten-Ungleichgewicht entstehen und der Starrflügel würde sich im stationären Trimmflug auf eine neue Trimmgeschwindigkeit v_2 einpendeln, die kleiner als 40 km/h ist ($v_2 < v_1$). Um die ursprüngliche Trimmgeschwindigkeit $v_1 = 40$ km/h trotz der neuen, größeren Schränkung unverändert beizubehalten, müsste die mit der zusätzlichen Schränkung verbundene Tiefenruder-Wirkung (schwanzlastiges Moment) kompensiert werden entweder durch:

1. Erhöhen des Stabilitätsmaßes bei gleichem Gewicht G_1 (Pilotenaufhängung und damit Schwerpunkt weiter nach vorne, $s_2 = y > s_1 = x$) oder
2. Erhöhen des Einhängengewichts ($G_2 > G_1 = 85$ kg) bei gleichem Stabilitätsmaß s_1 .

Nun sei angenommen, dass ein Pilot B mit einem **geringeren** Körpergewicht als Pilot A den Starrflügel von Pilot A fliegen möchte (z.B. $G_3 = 65$ kg $<$ $G_1 = 85$ kg). Um nun keine kritische Trimmgeschwindigkeit unter 40 km/h zu erreichen (erhöhte Stall- und Trudelgefahr trotz verringerter Stallgeschwindigkeit durch die geringere Flächenbelastung!), sondern um $v_1 = 40$ km/h als sichere Trimmgeschwindigkeit beizubehalten, muss entweder:

1. die Schränkung verkleinert werden (weniger schwanzlastiges Moment bei gleicher Aufhängungsposition und gleichem Stabilitätsmaß) oder,
2. **unbedingt** die Pilotenaufhängung **nach vorne** gehängt werden (gleiche schränkungskompensierende Wirkung wie Pilot A trotz weniger Gewicht als Pilot A bei unveränderter Schränkung durch Erhöhung des Stabilitätsmaßes $s_3 > s_1 = x$)!

Abgesehen davon, dass eine bauliche Veränderung der Schränkung mit Arbeits- und Zeitaufwand verbunden ist, während sich die Pilotenaufhängung in zwei Minuten verschieben lässt, gilt:

! Schränkung aus Sicherheitsgründen **niemals** bis unter die Gütesiegel-Grenzwerte verringern!

! Möchte ein leichter Pilot den ausgetrimmten Starrflügel eines schwereren Piloten fliegen, so muss er die Aufhängung **unbedingt nach vorne** verschieben!

Auch wenn das Gerät statisch ausgewogen sein sollte, so dass sich die Pilotenaufhängung im Flügelschwerpunkt befindet und die Aufhängung bei einem Pilotenwechsel theoretisch nicht verändert werden müsste, sollte im Zweifelsfall auf die sich ergebende zusätzliche Sicherheit durch Nach-vorne-Versetzen der Aufhängung nicht verzichtet werden. Zumal in der Praxis nicht immer ohne weiteres klar ist, wie das Gerät getrimmt war. Mir sind zwei

Trudel-Fälle bekannt, deren Ursache vor allem darin lag, dass bei einem Pilotenwechsel vergessen wurde, die Aufhängung entsprechend nach vorne zu versetzen (siehe z.B. „The OZ Report“, Volume 4, 2000, Nr. 51 unter www.davisstraub.com/OZ/).

6 Problem bei den flexiblen Drachen

6.1 Schränkung

Flexible Hochleistungsdrachen besitzen je nach Typ bei völlig entspannter VG eine Schränkung von etwa -12° bis -18° . Wird die VG voll gespannt, so reduziert sich die Schränkung um etwa 5° auf eine Schränkung von etwa -7° bis -13° . Vom aerodynamischen Standpunkt aus hat man es im Falle entspannter oder gespannter VG also mit zwei ziemlich verschiedenen Drachen zu tun. Im Schnitt ist die Schränkung flexibler Drachen also mehr als **doppelt so groß** wie diejenige von Starrflügeln! Aus dieser Tatsache darf man aber nicht die falschen Schlüsse ziehen (s.u.).

6.2 Kurvensteuerung – eingebauter Stall- und Trudelschutz

Infolge der Gewichtskraft-Steuerung der flexiblen Drachen erfährt beim Kurvenflug der langsamere, kurveninnere Flügel eine höhere Flächenbelastung als der schnellere, kurvenäußere Flügel. Unter Einwirkung dieser größeren Belastung „macht“ das flexible Flügelende des kurveninneren Flügels „auf“, woraufhin sich die Schränkung am kurveninneren Flügelende erhöht. Lokal mehr Schränkung bedeutet aber lokal einen geringeren Anstellwinkel. Durch den geringeren Anstellwinkel wird weniger Auftrieb produziert, so dass hier lokal die c_a -Belastung sinkt. Beim flexiblen Drachen ist also für den Kurvenflug bis zu einem gewissen Maß eine Art Stall- und damit Trudelschutz „eingebaut“. Beim Starrflügel ist das wegen seiner mangelnden Verformbarkeit **nicht** der Fall.

6.3 Trudeln

Die grundsätzliche Möglichkeit von Trudeln mit flexiblen Drachen ist stark vom konkreten Drachentyp abhängig. So gibt es Drachentypen, die in jeder zugelassenen Konfiguration leicht zum Trudeln zu bringen sind. Dann gibt es Drachen, die nur bei voll gezogener VG (d.h. weniger Schränkung) zum Trudeln zu bewegen sind. Und schließlich gibt es Drachen, mit denen in keiner zugelassenen Konfiguration Trudeln möglich ist.

7 Problem bei den Starrflügeln

7.1 Spoiler und ihre Bedeutung fürs Trudeln - Aufbäumen infolge Abkippen

Durch einen Spoiler-Ausschlag wird nicht nur das für die Steuerung erwünschte Roll- und Giermoment erzeugt, sondern zusätzlich ein unerwünschtes schwanzlastiges (aufrichtendes) Moment, das **während** dem Ein- und Ausleiten einer Kurve (also nicht nur **vor** dem Ein- und Ausleiten der Kurve) vom Piloten durch Anstellwinkelverkleinerung (Ziehen des Steuerbügels) kompensiert werden muss. Denn der Spoiler-Ausschlag bewirkt einen lokalen Auftriebseinbruch am Flügelende (einseitiges Abkippen des Flügels), der wegen der Rückpfeilung hinter dem Schwerpunkt liegt, so dass der Flügel einseitig hinten durchsackt und sich insgesamt aufbäumt (Anstellwinkelvergrößerung durch schwanzlastiges Moment). Besonders deutlich ist dieser Effekt der Spoilersteuerung bei starken Kurvenwechseln mit hoher Geschwindigkeit festzustellen.



Während dem Ein- und Ausleiten einer Kurve muss vom Piloten **gezogen** werden!

Die Gefahr beim Aufbäumen infolge des Abkippen durch die Spoilersteuerung liegt darin, dass beim sehr langsamen Kurbeln in der Thermik (kurz vor der Stall-Geschwindigkeit) ein kurzes Nachzentrieren (Spoilerausschlag) mittels des kurveninneren Spoilers die Strömung

des kurveninneren Außenflügels schlagartig zum Abreißen und den Flügel abrupt ins Trudeln bringen kann!

7.2 Wölbklappen und ihre Bedeutung fürs Trudeln

7.2.1 Auftriebserhöhung

Der lokale Auftrieb A wird durch die Formel $A = c_a \cdot q \cdot l$ erklärt, wobei wieder c_a der lokale Auftriebsbeiwert, q der Staudruck und l die örtliche Profiltiefe sei.

Um einen Fußstart und eine Fußlandung zu ermöglichen, muss die Fluggeschwindigkeit in diesen Flugphasen möglichst gering sein. Das aerodynamische Problem bei Start und Landung besteht dann darin, dass mit hohen c_a -Werten geflogen wird. Denn in der Formel $c_a = A / q \cdot l$ wird der Staudruck q durch die geringe Geschwindigkeit kleiner, wohingegen Gewicht $G =$ Auftrieb A sowie die Profiltiefe l unverändert bleiben, so dass folglich c_a größer wird. Der $c_{a \max}$ -Wert der im Flügel verwendeten Profile muss also von vornherein genügend groß sein, damit die Profile bei großen Anstellwinkeln und damit großen c_a -Werten nicht stallen, weil der erforderliche c_a -Wert den gegebenen $c_{a \max}$ -Wert überschreitet.

Hier kommt nun die Funktion und Wirkung von Wölbklappen ins Spiel. Durch das positive Setzen von Wölbklappen (Ausschlag nach unten) erhöht sich die Profil-Wölbung der Profile in dem Flügelabschnitt, in welchem sich die Klappen befinden. Als direkte Folge verschiebt sich zunächst die Profilsehne und dadurch der Nullauftriebs-Anstellwinkel (Anstellwinkel bezogen auf die Profilsehne, bei dem das Profil keinen Auftrieb erzeugt) der Profile im betrachteten Flügelbereich in Richtung negativer Anstellwinkel. Weil sich dadurch der effektive Anstellwinkel vergrößert (bei unverändertem Gesamt-Flügel-Anstellwinkel bezogen auf die Profilsehne des Profils ohne Klappenausschlag), verschiebt sich die Profilpolare zu größeren c_a -Werten hin. Durch größere c_a -Werte vergrößert sich dann bei gleicher Fluggeschwindigkeit (und damit gleichem Staudruck q) und unveränderter Profiltiefe l der lokale Auftrieb $A = c_a \cdot q \cdot l$.

Außerdem ergibt sich durch das positive Setzen von Wölbklappen wegen der größeren Profil-Wölbung aus rein physikalischen Gründen eine Vergrößerung des $c_{a \max}$ -Wertes der betreffenden Profile. Dadurch kann dann beim Starten und Landen mit größeren Anstellwinkeln (also langsamer) und damit mit größeren c_a -Werten geflogen werden, ohne dass der Flügel stalt. Es verringert sich also wie gewünscht die Mindestgeschwindigkeit (s.u.).

7.2.2 Kopf- oder schwanzlastiges Moment

Das Setzen von Wölbklappen bei Starrflügeln kann je nach Modell ein kopf- oder schwanzlastiges Moment erzeugen. So bewirkt das Setzen der Wölbklappen ein kopflastiges Moment (Steuerbügel wandert eigenständig nach hinten) beim E7 (siehe Testbericht, „Fly & glide“, 7/1999, S.32), Atos, Atos S („Fly & glide“, 11/2000, S.38) und Star („Fly & glide“, S.56, 58). Beim Exxtacy und Ghostbuster hingegen ergibt das Setzen der Klappen ein schwanzlastiges Moment (Steuerbügel wandert eigenständig nach vorne).

Befindet sich der Auftriebsmittelpunkt des Zusatzauftriebs, der durch die gesetzten Klappen erzeugt wird, vor dem Auftriebsmittelpunkt bzw. Schwerpunkt des Flügels ohne gesetzte Klappen, so bewirken die gesetzten Klappen ein schwanzlastiges Moment. Liegt er jedoch dahinter, so resultiert aus dem Setzen der Klappen ein kopflastiges Moment. Je weiter die Klappen in Spannweitenrichtung reichen, desto eher haben sie beim Setzen eine kopflastige Wirkung. Denn bei längeren gesetzten Klappen fliegen mehr Profile mit einem höheren c_a -Wert, wodurch auch der Gesamtauftriebsbeiwert c_A des Flügels größer ist. Dadurch kann dann bei gleicher Geschwindigkeit mit einem geringeren Gesamt-Anstellwinkel geflogen werden (kopflastiges Moment) als mit einem Flügel mit kürzeren Klappen (schwanzlastiges Moment). Im einen Fall überwiegt das durch das Setzen der Klappen größer gewordene negative Profilmoment gegenüber dem positiven Schränkungsmoment des Flügels (kopflastiges Moment). Im anderen Fall überwiegt das

Schränkungsmoment gegenüber dem Profilmoment (schwanzlastiges Moment). Ideal wären natürlich momentenfreie Klappen.

Der hinsichtlich einer Trudel-Gefahr bestehende Nachteil von Wölbklappen mit kopflastiger Wirkung besteht darin, dass durch die nach hinten wandernde Trapezbasis mehr Weg entsteht, um die Basis aus der Trimmflugposition nach vorne zu drücken. Dadurch kann leichter gestallt werden, was die Gefahr unfreiwilligen Trudeln im Kurbeln erhöht (siehe z.B. der kleine Atos S mit zurückgesetzter Trapezbasis für kleine Piloten mit kürzeren Armen (Testbericht, „Fly & glide“, 11/2000, S.38)).

Der Vorteil von Wölbklappen mit schwanzlastiger Wirkung liegt darin, dass weniger Weg zum Drücken und ein größeres Stabilitätsmaß beim Einnehmen der „Alarmbereitschafts-Armhaltung“ entsteht.

In beiden Fällen ist es aber so, dass mit gesetzter Klappe die $c_{a\max}$ -Werte der Profile im Bereich der Klappen schon bei kleineren Anstellwinkeln erreicht werden. Je größer der Klappenausschlag ist, desto stärker macht sich dieser Effekt bemerkbar. Beim Kurbeln in der Thermik mit stark gesetzten Klappen besteht also die Gefahr, dass schon bei weniger großen Anstellwinkeln ungewollt gestallt wird.

! Zum Kurbeln in der Thermik die Wölbklappen **nicht mehr als 15°** setzen!

7.2.3 Reduzierung der Trimm- und Mindestgeschwindigkeit

Egal, ob durch die gesetzten Klappen ein kopf- oder schwanzlastiges Moment erzeugt wird, so resultiert in beiden Fällen aus der Erhöhung des c_a -Wertes und des $c_{a\max}$ -Wertes eine Reduzierung der Trimm- und Mindestgeschwindigkeit. Bei gleichem Auftrieb kann langsamer geflogen werden. Denn das Gewicht G bleibt unverändert, während der Auftriebsbeiwert c_a größer wird. Die Grundgleichung $A = G$, d. h. $A = c_a \cdot q \cdot l = G$ muss bei unverändertem l und größerem c_a -Wert weiterhin erfüllt sein, was sich durch Verkleinerung von q und damit durch Verringerung der Fluggeschwindigkeit ergibt. Diese Verringerung der Trimm- und Mindestgeschwindigkeit ist bei allen Starrflügeln praktisch messbar (siehe Testberichte, „Fly & glide“: Exxtacy (5/1998, S.38), Atos (7/1999, S.33), ESC (8/2000, S.48), Atos S (11/2000, S.37f.), Exxtacy Bi (9/2001, S.44), Star (7/2001, S.56, 58)).

7.3 Das Wackeltrapez und seine Bedeutung fürs Trudeln

Da das Wackeltrapez der Starrflügel nicht durch Unterverspannungen fixiert und gegen seitliche Bewegungen geschützt ist, werden im Trudeln Pilot und Trapez durch die wirkenden Flieh- und Kreiselkräfte in Richtung des Außenflügels geschleudert. Sofern sich der Pilot weiter am Trapez festhält, bewirkt er dadurch ungewollt und unkontrolliert einen Spoilerausschlag am Innenflügel. Dieser aufgestellte Spoiler erschwert zusätzlich, dass die fürs Ausleiten des Trudeln notwendige Strömung am Innenflügel wieder zum Anliegen gebracht wird. Entsprechend mehr muss fürs Ausleiten gezogen werden.

Durch ein zum Teil chaotisches Verhalten des Starrflügels, vor allem in der Ausleit-Phase, können sehr hohe Kräfte, insbesondere durch ungewollte Spoiler-Ausschläge verursachte Torsionskräfte, den Holm über sein strukturelles Limit hinaus belasten und diesen zum Brechen bringen (siehe z.B. den jüngsten Fall des sehr erfahrenen US-amerikanischen Wettkampfpiloten Bo Hagedwood, der mit einem großen Atos mutwillig Trudeln provoziert hatte, und dem beim anschließenden unkontrollierten Abfangen die Holme symmetrisch in der Mitte beider Flügel brachen („The Oz Report“, Volume 5, 2001, Nr.193 unter www.davisstraub.com/OZ/)!).

8 Fazit - Trudelanfälligkeit im Vergleich zu flexiblen Drachen

8.1 Unfreiwilliges Einleiten von Trudeln

Das Trudelverhalten von Starrflügeln kann prinzipiell nicht vollständig aus theoretischen Überlegungen geschlussfolgert werden. Bis heute ist es nicht möglich, die Trudel-Charakteristik eines Starrflügels zu berechnen und vorherzusagen. Diese Charakteristik muss also durch die praktischen Flugerfahrungen eines Testpilots erfolgen werden.

Das empirische Ergebnis einer von mir durchgeführten Umfrage unter sehr erfahrenen Starrflügel-Vielfliegern, sowie die Auswertung meiner eigenen, mehrjährigen flugpraktischen Erfahrungen als Testpilot verschiedener Hersteller veranlassen mich vor dem eben genannten Hintergrund zu der Feststellung:

! Für Starrflügel **im Gütesiegelzustand** besteht trotz der deutlich geringeren Schränkung gegenüber den flexiblen Drachen hinsichtlich des unfreiwilligen **Einleitens** von Trudeln **keine** grundsätzlich größere Anfälligkeit!

Dies scheint der vielleicht gegenwärtig herrschenden Stimmung in der Pilotenschaft zu widersprechen, zumal eben in der vergangenen Saison immer wieder von kritischen Trudel-Vorkommnissen mit Starrflügeln zu hören war. Dennoch ist es tatsächlich so, dass flexible Drachen zum Teil ohne voll gespannte VG ohne weiteres und unmittelbarer ins Trudeln gebracht werden können als jeder Starrflügel **in Gütesiegel-Konfiguration!** Der letzte Zusatz ist allerdings entscheidend:

! **Nur** in Gütesiegel-Konfiguration fliegen!

8.2 Kein freiwilliges Trudeln mit dem Starrflügel

Zeigen sich Starrflügel hinsichtlich des unfreiwilligen **Einleitens** von Trudeln gegenüber flexiblen Drachen nicht grundsätzlich als anfälliger und damit gefährlicher, so stellt sich die Situation doch deutlich anders dar, wenn man sich bereits **im** Zustand des Trudeln befindet! Durch die oben genannten Probleme, welche das Wackeltrapez und die zum Teil chaotischen Zustände von Starrflügeln während des Trudeln mit sich bringen, ist das Trudeln mit Starrflügeln mit deutlich größeren Gefahren verbunden als mit flexiblen Drachen! Deshalb:

! Verzichte **unbedingt** auf mutwilliges Trudeln mit dem Starrflügel!

9 Abhilfe

9.1 Abhilfe durch vorbeugende Maßnahmen

9.1.1 Konstruktive Maßnahmen am Flügelende: Profiltiefenvergrößerung oder Schränkungserhöhung

Sehr allgemein betrachtet gibt es konstruktiv unter anderem zwei Möglichkeiten (abgesehen von der Optimierung der $c_{a,max}$ -Verteilung eines Flügels und sonstigen Maßnahmen), um möglichst trudelsichere Flugeigenschaften eines Starrflügels zu erzielen:

1. bei geringerer Schränkung geringere Zuspitzung (Tiefenvergrößerung) oder
2. bei größerer Zuspitzung größere Schränkung.

Wo also Schränkung im Außenflügel fehlt, muss dort mehr Flügeltiefe für ein gutmütiges Abrissverhalten sorgen, und wo Flügeltiefe fehlt, bedarf es mehr Schränkung!

9.1.1.1 Profiltiefenvergrößerung

Je weiter außen am Flügel eine Strömungsablösung beginnt, desto größer ist das erzeugte Wirkungsmoment um die Hoch- und Längsachse des Flügels und damit entsprechend abrupter und heftiger das Einsetzen der Trudelbewegung. Um die Trudelanfälligkeit eines Flügels zu verringern, muss also der Bereich, in dem die Strömung bei Anstellwinkelvergrößerung als erstes abreißt, vom Flügelende möglichst weit ferngehalten werden. Ziel ist also die kontrollierte Vorherbestimmung und Festlegung der ersten Ablösung nach Überschreiten des kritischen Anstellwinkels. Durch eine Profiltiefenvergrößerung am Flügelende ist dort die c_a -Belastung kleiner als an den übrigen Stellen des Flügels, wodurch verhindert wird, dass sich die Strömung am Flügelende durch Überschreiten des lokalen $c_{a\max}$ -Wertes zuerst ablöst. Das Gegenteil (höhere c_a -Belastung am Flügelende) geschieht durch am Flügelende kleiner werdende Profiltiefen, also durch Zuspitzung. Ein Ziel der Starrflügel-Entwicklung sollte also in der **Vermeidung von Flügel-Zuspitzung** liegen!

9.1.1.2 Schränkungserhöhung

Andererseits ist eine größere c_a -Belastung am Flügelende durch geringere Schränkung gegeben. Denn geringere Schränkung bedeutet lokal einen größeren Anstellwinkel, der eine Erhöhung des Auftriebs und damit des c_a -Werts bewirkt (s.o.). Fliegt ein Flügelabschnitt nahe der Flügelwurzel (Kielbereich) bei großen Gesamt-Anstellwinkeln beinahe mit dem $c_{a\max}$ -Wert, so fliegt bei genügend großer Schränkung im Außenflügel das Flügelende mit deutlich kleinerem c_a -Wert. Schränkungsvergrößerung im Außenflügel reduziert also dort die c_a -Belastung, so dass sich Strömungsablösungen zunächst zur Flügelwurzel und erst mit deutlicher Anstellwinkelvergrößerung zum Flügelende hin ausbreiten, wodurch der Flügel abkippsicherer und weniger trudelanfällig ist.

Geringe absolute Schränkungswerte bewirken schon bei kleineren Anstellwinkelvergrößerungen im kritischen Geschwindigkeitsbereich ein schnelleres Ausbreiten von Strömungsablösungen über größere Bereiche des Flügels und damit ein schlagartigeres Einsetzen von Trudeln. Ein zweites Ziel der Starrflügel-Entwicklung sollten deshalb **größere absolute Schränkungswerte** als die heutzutage üblichen sein ($>5^\circ$).

! Durch starke Zuspitzung, geringe Schränkung und geringe $c_{a\max}$ -Werte des Profils am Flügelende wächst dort die c_a -Belastung und damit die Abkipp- und Trudelfreudigkeit des Flügels!

Größere Flügeltiefen im Außenflügel erlauben es, den für den Momenten-Ausgleich des Starrflügels notwendigen Abtrieb am Flügelende mit einer geringeren Schränkung zu erreichen als ein vergleichbarer zugespitzter Flügel. Dies ist möglich durch den größeren Hebelarm, mit dem die Schränkung wirksam wird, und durch die niedrigere c_a -Belastung am Flügelende.

9.1.2 Gewohnheits-Änderung des Piloten: Bewusstsein der eigenen Reflexe und bewusste Änderung dieser Reflexe

9.1.2.1 Bewusstsein der eigenen Reflexe

Durch das Fliegen von **flexiblen** Drachen bildet man Reflexe aus, die zur Gewohnheit werden und in bestimmten Situationen zu instinktiven Reaktionen führen. Dieser Reflexe muss man sich bewusst sein, um sie beim Fliegen von Starrflügeln nicht unreflektiert wirken zu lassen. Zu diesen häufig beobachtbaren unbewussten Reaktionen, die sich beim Fliegen von Starrflügeln als kritisch erweisen können, gehört unter anderem:

1. Landen aus einer langsamen Kurve heraus
2. Beim Landen knappes und langsames Umfliegen von Hindernissen
3. Beim Kurbeln „Hinhungern“ und impulsartiges Diagonal-Steuern („Herumwürgen“) hart am Strömungsabriss

9.1.2.2 Bewusste Änderung der Reflexe

Für das sichere Fliegen von Starrflügeln ist ein deutliches Bewusstsein für die Strömung am Flügel notwendig! Deshalb ist die bewusste Änderung der genannten Gewohnheiten und die Ausbildung entsprechend neuer, bewusster Gewohnheiten zur Vermeidung von Trudel-Vorfällen mit dem Starrflügel sehr wichtig.

! Das von flexiblen Drachen her gewohnte „Hinhungern“ und „Herumwürgen“ in der Thermik kann bei Starrflügeln zu ungewolltem Trudeln führen!

9.2 Abhilfe durch aktuelles, fliegerisches Verhalten im akuten Fall

Hier gilt das zu Beginn Gesagte im Zusammenhang mit dem Ausleiten von Trudeln (s.o.).

9.2.1 Stall-Warnsignale des Flügels

Bevor ein Starrflügel zu stallen beginnt, zeigt er Warnsignale, die mit der entsprechenden fliegerischen Sensibilität durchaus als solche wahrgenommen werden können. Mit zunehmendem Nach-vorne-Drücken der Trapezbasis aus der Trimmflugposition heraus:

1. steigt der Bügelndruck immer mehr an
2. nimmt die Sinkgeschwindigkeit zu
3. verschlechtert sich die Richtungsstabilität (Tendenz, zu einer Seite zu kippen)
4. wird die Steuerfähigkeit eingeschränkt (weniger Fahrt lässt die Spoiler weniger effizient wirken).

Es ist wichtig, sich für diese Anzeichen des beginnenden Strömungsabrisses zu sensibilisieren. Vor allem in turbulenter Luft fällt das anfangs nicht so leicht.

9.3 Ausblick

Ein Blick auf die Segelflugzeug-Entwicklung der letzten Jahre zeigt eine interessante und, wie ich denke, auch für die Starrflügel-Entwicklung zukunftsweisende konstruktive Richtung: bewusst wurde nicht versucht, die absoluten Gleitzahlen zu steigern, sondern, bei gleicher Flugleistung, ein gutmütigeres Flugverhalten zu erzielen!

Zur Realisierung der gleichen Entwicklungstendenz bei den Starrflügeln tragen unter anderem eine Profiltiefenvergrößerung und Schränkungserhöhung am Flügelende, sowie eine genügend weit vorne positionierte Trapezbasis bei.

Dipl.-Math. Marcus Hoffmann-Guben

Deutscher Starrflügel-Meister 2001, 2-jährige Tätigkeit als Starrflügel-Testpilot bei A.I.R, Testflüge Atos inkl. WM 99, Vor-EM 99, Vor-WM 00, EM 00, 2-jährige Tätigkeit als Starrflügel-Testpilot bei Flight Design, Testflüge Exxtacy 135, Testflüge Exxtacy Bi, Testflüge Ghostbuster inkl. WM 01, Testflüge Axxess, Axxess +.