

Konstruktions-Merkmale und Flugeigenschaften Flexibler

Erläuterungen zur gleichnamigen Grafik.
Bernhard Wienand

Hamburg, Juli 2014

Inhalt	Seite
1 Wesentliche Flugeigenschaften.....	1
2 Elemente der Grafik	1
3 Nick-Stabilität	2
4 Gleitzahl	5
5 Geringes Sinken.....	7
6 Geschwindigkeit	7
7 Kurvenhandling bzw. Wendigkeit: Kurve ein- und ausleiten, Kurve halten.....	8

1 Wesentliche Flugeigenschaften

Die wesentlichen (in der Zeichnung dargestellten) Flugeigenschaften eines Drachens sind:

- Die Nick-Stabilität,
ausgedrückt durch das Stabilitätsmaß,
das Verhältnis (Lage Neutralpunkt – Schwerpunkt)/Bezugsflügelteufe in %, bei der Musterprüfung von Drachen gemessen am Nick-Moment-Verlauf.
- Die Gleitleistung,
ausgedrückt durch die Gleitzahl, die erreichte Gleitstrecke pro Abflughöhe,
 - die maximale Gleitzahl und
 - die Gleitzahl für maximale Horizontalgeschwindigkeit.
- Das Sinken in m/s,
 - das minimale Sinken,
 - das Sinken bei maximaler Gleitzahl, und ggf.
 - das maximale Sinken.
- Die Geschwindigkeit in km/h,
 - die Minimal-Geschwindigkeit,
 - die Geschwindigkeit bei minimalem Sinken,
 - die Geschwindigkeit bei maximaler Gleitzahl, und
 - die Maximal-Geschwindigkeit.
- Das Kurvenhandling bzw. die Wendigkeit, bestehend aus
 - dem Einleiten und Ausleiten der Kurve,
gemessen an den Rollzeiten und den Steuerkräften,
 - dem Halten der Kurve,
gemessen an den Steuerkräften.

2 Elemente der Grafik

Die Grafik zeigt, durch welche konstruktiven Merkmale, hellblau eingerahmte Texte, über welche Kenngrößen, schwarz eingerahmte Texte, diese Flugeigenschaften, grün eingerahmte Texte, wie beeinflusst werden:

- Ein grüner Verbindungspfeil bedeutet einen proportionalen Zusammenhang: Eine stärkere (geringere) Ausprägung einer Einflussgröße (konstruktives Merkmal, Kenngröße oder Flugeigenschaft) erhöht (mindert) die abhängige Größe (Kenngröße oder Flugeigenschaft). So erhöht z.B. mehr Spannweite (konstruktives Merkmal) bei gleicher Fläche die Streckung (Kenngröße), und mehr Streckung verbessert die Gleitzahl.

- Ein roter Verbindungspfeil bedeutet einen umgekehrt proportionalen Zusammenhang: Eine stärkere (geringere) Ausprägung einer Einflussgröße (konstruktives Merkmal, Kenngröße oder Flugeigenschaft) mindert (erhöht) die abhängige Größe (Kenngröße oder Flugeigenschaft). So verringert z.B. mehr Fläche (konstruktives Merkmal) bei gleicher Spannweite die Streckung.
 - Die Stärke des Einflusses wird durch die Liniendicke des Verbindungspfeils ausgedrückt.
 - Bedingte Einflüsse sind gestrichelt dargestellt.
- Trimbare Merkmale sind tintenblau eingerahmt.

Das Geflecht der Grafik zeigt, wie komplex die Zusammenhänge bei einem Flexiblen (im Vergleich zum Starren) sind, auch bereits ohne Details wie etwa die Ausführung der Segellatten (Alu, Carbon etc.), Stoffrippen, die Gestaltung der Flügelenden (Randbogen, Spreizlatte etc.), die Wahl der Lattenspannung, der Segelschnitt und die Verteilung der Segelspannung etc. Natürlich wirken sich auch viele Merkmale sowohl positiv als auch negativ auf verschiedene Flugeigenschaften aus. So lässt sich z.B. durch ein biegesteiferes Flügelrohr und ein festeres Tuch das Segel stärker spannen, was zu einer geringeren Schränkung und somit zu einer höheren Gleitzahl führt, andererseits aber das Einleiten einer Kurve erschwert, da sich auch geringere Unterschiede in der Wölbung über der Spannweite (Tunnel) bzw. Anstellung zwischen dem kurvenäußeren und dem kurveninneren Halbflügel ergeben. So ist für die gewünschten Flugeigenschaften stets ein optimaler Kompromiss bei der Konstruktion zu finden.

Wodurch und wie die o.g. Flugeigenschaften im Einzelnen beeinflusst werden, wird in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

3 Nick-Stabilität

Nick-Stabilität ist gegeben, wenn ein rückstellendes Nick-Moment entsteht, sobald der Drachen im Flug vom Anstellwinkel des Trimmflugs abweicht, sei es durch eine Änderung der Luftrömung oder einen Eingriff des Piloten. Der Pilot spürt dieses Moment in Form des Bügeldrucks. Nimmt er die Hände von der Basis, hält der Drachen von sich den Trimmflug bei bzw. kehrt nach einer Störung zum Trimmflug zurück.

Nick-Stabilität ist damit die Grundvoraussetzung für sicheres Fliegen bzw. ein sicheres Gerät. Kein noch so versierter Pilot kann fehlende Eigenstabilität um die Querachse durch seine Wahrnehmung und Steuerung ausgleichen.

Nick-Stabilität im Gleitflug entsteht durch ein Zusammenspiel von Schwerpunktvorlage und Nick-Moment bzw. Pitch up.

- Schwerpunktvorlage, Stabilitätsmaß:

Nick-Stabilität entsteht dadurch, dass der Schwerpunkt vor dem Neutralpunkt, dem Angriffspunkt der Luftkräfte, liegt. Durch diese Schwerpunktvorlage wird ein Gleiter von der Schwerkraft per Frontantrieb durch die Luft gezogen. Er kann nicht ausbrechen (umschlagen) oder ins Taumeln (Trudeln) geraten.

Das Stabilitätsmaß σ bezieht die Schwerpunktvorlage noch auf die Größe des Flugzeugs, standardmäßig ausgedrückt durch die Bezugsflügeltiefe t_B (in der Literatur meist mit l_u bezeichnet), die je nach Zuspitzung des Flügels etwas über der mittleren Flügeltiefe liegt. Bei gleichem Stabilitätsmaß liegt der Schwerpunkt eines halb so großen Flugzeugs damit auch nur halb so weit vor dem Neutralpunkt.

Bei der Musterprüfung von Drachen wird allerdings nicht dieses Stabilitätsmaß ermittelt, sondern das Nick-Moment im Schwerpunkt $M_S(\alpha)$ in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α .

Zwischen dem Stabilitätsmaß σ , dem Gesamtgewicht G und dem entscheidenden Nick-Moment bei null Auftrieb bzw. beim Anstellwinkel $\alpha_{A=0}$, $M(\alpha_{A=0}) = M_{A=0}$, besteht der Zusammenhang

- $\sigma = (x_N - x_S)/t_B \approx M_{A=0}(v_{trim})/(G * t_B) > 0 [-]$.

Aus z.B. $M_{A=0,40 \text{ km/h}} = 50 \text{ Nm}$ bei einer Trimmgeschwindigkeit von 40 km/h, $G = 1.250 \text{ N}$ und $t_B = 1 \text{ m}$ ergibt sich $\sigma = 4 \%$ bzw. eine Schwerpunktvorlage $x_N - x_S = 4 \text{ cm}$.
Tatsächlich liegt der Schwerpunkt im Trimmflug bei Flexiblen weiter vorne, da im Trimmflug die Schränkung größer ist als im Null-Auftrieb-Bereich, siehe unten.
Die Schwerpunktvorlage kann konstruktiv frei gewählt werden und dient dem Trimm um die Querachse. Ein Drachen wird um die Querachse durch die Verschiebung des Schwerpunkts gesteuert. Dies hat Einfluss auf die Nick-Stabilität.

- Nick-Moment, Pitch up:

Damit die Schwerpunktvorlage nicht zu einem Sturzflug führt, muss ein Gleiter in Längsrichtung so geformt sein, dass aus der Umströmung ein aufrichtendes Nick-Moment (Pitch up) entsteht und zu einem flachen Gleitflug führt. Im Trimmflug gleichen sich das kopflastige Moment aus der Schwerpunktvorlage und das aufrichtende Moment genau aus.

Für den Beiwert des Null-Auftrieb-Moments, bezogen auf die mittlere Flügeltiefe t_m , gilt

- $C_{M,A=0} \approx C_{MP,A=0} + dc_{AP}(\alpha)/d\alpha \cdot \cos(\varphi) \cdot \text{Str}/(\text{Str}+2) \cdot \text{Str}/2 \cdot \tan(\varphi) \cdot 1/3 \cdot (r_v - r_v^2) \cdot (\varepsilon_W - \varepsilon_S)$,
mit
 - $C_{MP,A=0} \approx -0,025$ bis $-0,050$, Beiwert des Null-Auftrieb-Momentes des Profils,
 - $dc_{AP}(\alpha)/d\alpha \approx 0,1$, Auftriebs-Gradient eines Profils,
 - φ = Pfeilwinkel, bezogen auf die t/4-Linie,
 - $\text{Str} = \text{Streckung} = Sp^2/F = Sp \cdot t_m$, Sp = Spannweite,
 - $r_v = F_v/F = (1 + 1/(1 - Z_{sp}/2))/4$ = Relation vordere Fläche F_v zu Gesamtfläche F , mit der Zuspitzung $Z_{sp} = (t_w - t_s)/t_w$ aus den Flügeltiefen t_w (Wurzel) und t_s (Spitze),
 - $\varepsilon_W - \varepsilon_S$ = Schränkung aus den Einstellwinkeln ε_W (Flügelwurzel) und ε_S (Spitze).

Im Folgenden wird ausgeführt, wodurch diese Größen das Nick-Moment beeinflussen.

- Pfeilung und Mindestschränkung (Mind.schrank.):

Bei einem gepfeilten Nurflügel entsteht ein aufrichtendes Nick-Moment (Pitch up) aus der Umströmung hauptsächlich durch die Pfeilung in Verbindung mit einer negativen Schränkung des Flügels. Bei negativer Schränkung nimmt der Anstellwinkel des Flügels nach außen ab.

Durch Pfeilung ergeben sich hinten liegende Leitflächen, entsprechend dem Höhenleitwerk eines Rumpfflugzeugs. Die Schränkung entspricht der Einstellwinkel-Differenz (EWD) zwischen Tragfläche und Leitfläche bzw. Höhenleitwerk.

Die Schränkung eines Flexiblen ist nicht konstant, wie bei einem starren Flügel, sondern von der Belastung abhängig, insbesondere von der Belastung quer zum Segel bzw. quer zur Anströmung, also vom Auftrieb bzw. Abtrieb. Maßgeblich für die Nick-Stabilität eines Flexiblen ist seine Mindestschränkung im Null-Auftrieb-Bereich (Sturzflug), wenn der Außenflügel durch Abtrieb belastet ist. Auf den Einfluss der gewünschten Geringen Schränkung im Trimmflug auf das Nick-Moment wird in Verbindung mit der Gleitzahl eingegangen.

Im Folgenden wird ausgeführt, welche Größen die Mindestschränkung wie beeinflussen.

- Srogwinkel, Lufflinehöhe und Gestutze Latten (Gest. Latten):

Für die notwendige Mindestschränkung bei kleinem und negativem Auftrieb, also in einer Sturzflug- und Ruckenfluglage, sorgen negativ angestellte Sprogs (Schrankungsanschlage) und/oder Lufflines (Segelabspannung bei Turmgeraten), die möglichst viele Segellatten gegen Abtrieb stützen und die Segelhinterkante genügend hoch halten.

Die notwendige Höhe der Hinterkante und die notwendigen Srogwinkel, um das geforderte Nick-Moment für das DHV-Gütesiegel zu erreichen, sind im DHV-Datenblatt eines Drachens angegeben.

Durch drehsteife und durch das Segel stark vorgespannte Gestelle kommt man bei heutigen Hochleistern von ca. 13,5 m² bei voll gespannter VG mit Sprogwinkeln von – 8 Grad außen und – 5,5 Grad innen aus (das negative Vorzeichen wird im DHV-Datenblatt weggelassen). Beim Spectrum Bullet SP-12 von Guggenmos, einem Hochleister von 1989 mit ca. 13,5 m² und 12 m Spannweite, ist der äußere Sprog noch mit – 18 Grad angestellt, trotz Turm und Lufflines, allerdings stark zugespitztem Flügel.

Da man bei hoher Drehsteifigkeit mit geringeren Sprogwinkeln auskommt und drehsteife Gestelle auch ein Zeichen für biegesteife Gestelle sind, die eine höhere Segelspannung und damit eine geringere Schränkung im Trimmflug ermöglichen, was zu einer besseren Gleitleistung führt, siehe unten, lassen Sprogwinkel bedingt auch Schlüsse auf die Gleitleistung zu.

- Sprog-Kompensation (Spr.-K.):

Über die Sprog-Kompensation werden die inneren Sprogs beim Spannen der VG analog zum flacher gezogenen Segel abgesenkt, beim Icaro-Hochleister Laminar auch die äußeren Sprogs. Dadurch wird das Spiel des Segels beim Kurven nicht durch die Sprogs behindert, das Kurvenhandling also nicht beeinträchtigt, und im Schnellflug entsteht weniger Bügeldruck.

- Dreh-Steifigkeit:

Im Null-Auftrieb-Bereich entsteht am Außenflügel Abtrieb, der dort mit dem Segel die Sprogs nach unten drückt, so dass sich die Schränkung gegenüber dem unbelasteten Zustand verringert, jedoch umso weniger, je drehsteifer die Struktur ist. Für eine drehsteife Struktur sorgen steife Rohre (ggf. Carbon) und drehsteife Gelenke, insbesondere drehsteife Flügelrohr-Querrohr-Gelenke. Eine große Spannweite und Pfeilung reduzieren die Dreh-Steifigkeit.

Die Wirkung der vom Turm ausgehenden Abspannung des Segels (Lufflines) ist von der Dreh-Steifigkeit der Struktur unabhängig.

- Negative V-Form:

Negative V-Form bedeutet, dass sich die Flügel nach außen hin nach unten neigen. Die tiefere Vorderkante erhöht die Schränkung, wenn die Hinterkante durch Lufflines oben gehalten wird.

Da für Nick-Stabilität die Schränkung im Null-Auftrieb-Bereich entscheidend ist, ist die V-Form bei belasteter Oberverspannung maßgeblich, wenn der Außenflügel Abtrieb erzeugt.

- Latten- und Profilwölbung, Latten-S-Schlag, Doppelsegel:

Die Umströmung eines nach oben gewölbten Profils erzeugt ein kopflastiges Moment, der Flügel will sich auf den Rücken drehen. Ein S-Schlag reduziert das kopflastige Moment, da er etwas Abtrieb vor der Hinterkante des Flügels erzeugt.

Das Flügelprofil ergibt sich im wesentlichen durch die Segellatten. Ein Doppelsegel reduziert die Wölbung, da mit einem Untersegel die Skelettlinie (Profil-Mittellinie) flacher verläuft.

Der Sog auf der Oberseite des Flügels erhöht die Wölbung. Steife Latten (Carbon) und Stoffrippen zwischen Ober- und Untersegel wirken dem entgegen.

- Streckung und Zuspitzung:

Da das aufrichtende Moment aus den hinten liegenden Leitflächen kommt, ist es umso höher, je weiter diese Flächen hinten liegen (längerer Hebel), je größer also Pfeilung

und Spannweite bzw. Streckung sind. Winglets etc. erhöhen die aerodynamisch effektive Spannweite ein wenig.
Zuspitzung wirkt sich negativ auf das Nick-Moment aus, da sie die hinten liegenden Leitflächen verkleinert.

4 Gleitzahl

Die Gleitleistung eines Gleiters wird durch seine maximal Gleitzahl $Gl_{z_{max}}$ ausgedrückt, die maximal erreichte Gleitstrecke bezogen auf die Abflughöhe.

Geringe Schränkung und eine hohe Streckung bzw. Spannweite erhöhen die Gleitzahl, Pfeilung und ein S-Schlag im Profil verschlechtern sie.

- Geringe Schränkung:

Je geringer die Schränkung, desto geringer können die Abweichungen von der optimalen Anströmung über die Spannweite sein. Eine besondere Situation ergibt sich nur für die Umströmung des Flügelendes (Randwirbel).

Leider ist beim Flexiblen im Trimmflug, wenn das Gewicht fast ausschließlich vom Auftrieb (und nicht mit vom Widerstand) getragen wird, $A \approx G$, die Querbelastung des Segels, und damit die Schränkung durch Wölbung und Torsion am größten. Diese hohe Schränkung führt zu einem hohen aufrichtenden Moment, das durch einen weit genug vorne liegenden Schwerpunkt bzw. Aufhängepunkt des Piloten auszugleichen ist. Ein weiter vorne liegender Schwerpunkt erhöht zwar die Nick-Stabilität, die aufrichtende Schränkung nimmt jedoch mit kleinerem Anstellwinkel bzw. kleinerem Auftrieb bis zur Mindestschränkung im Null-Auftrieb-Bereich ab.

Im wesentlichen ist die Schränkung von der Segelspannung und der Flächenbelastung abhängig. Mehr Spannung reduziert sie, eine stärkere Belastung erhöht sie. Auch durch Zuspitzung lässt sich die Schränkung etwas vermindern.

(Hohe) Sprogs und Lufflines können eine geringe Schränkung im Trimmflug verhindern.

- Segelspannung:

Ein stärker gespanntes Segel, z.B. durch Spannen der VG (Variable Geometrie), wölbt sich unter Last weniger. Die Schränkung im Trimmflug ist geringer, und damit auch das aufrichtende Moment aus der Umströmung. Der Pilot muss sich etwas nach hinten drücken, die Nick-Stabilität nimmt entsprechend ab.

Die mögliche Spannung des Segels nimmt mit der Biege-Steifigkeit des Gestells und der Festigkeit bzw. Dehnungsarmut des Segeltuches zu.

- Biege-Steifigkeit (Biege-Steifigk.):

Durch die Segelspannung werden die Flügelrohre auf Biegung und Knick belastet. Die Querrohre sind nur einer Knicklast ausgesetzt. Die maximale Biegebelastung erfährt das Flügelrohr im Bereich seines Querrohrgelenks. Sie hängt auch von der Spannweite ab.

Für die nötige Biegesteifigkeit muss das Flügelrohr, sein Durchmesser und seine Wandstärke, entsprechend dimensioniert sein, was den Nasenradius erhöht und Gewicht kostet. Bei Hochleistern bzw. Wettkampfgeräten kommen daher immer mehr Carbonrohre zum Einsatz.

- Festes Tuch:

Die Spannung im Segel kann durch Zug (Spreizen der Flügelrohre (VG)) nur in dem Maße erhöht werden, in dem das Tuch nicht nachgibt.

In den letzten Jahren sind von der Textilindustrie noch festere und dehnungsärmere Fasern und Tuche auf den Markt gekommen. Auch hierdurch konnte die Schränkung bei Flexiblen noch weiter reduziert werden.

- Flächenbelastung (Flächenbelast. G/F):

Die Flächenbelastung ist das Verhältnis von Gesamtgewicht zu Flügelfläche, G/F. Das Gewicht ergibt sich zu etwa 1/4 aus dem Gewicht des Gerätes und zu etwa 3/4 aus dem Gewicht des Piloten mit Gurtzeug und Rettung.

Schwere Piloten haben daher bei Flexiblen das Handikap einer stärkeren Schränkung, die sich negativ auf die Gleitleistung auswirkt.

- Zuspitzung:

Durch eine außen geringere Flügeltiefe (Zuspitzung), wird der Flügel außen weniger gewölbt und verdreht, da der Auftrieb dichter am Flügelrohr angreift, so dass der Hebel zum Anheben des Segels kleiner ist (mehr Flügeltiefe außen führt dementsprechend zu mehr Wölbung bzw. Verdrehung).

Am Innenflügel hält das Kielrohr die Segelhinterkante unten, nach außen abnehmend.

- Srogwinkel, Lufflinehöhe:

Das Segel kann nicht flacher gezogen werden, als es die Sprogs und Lufflines zulassen. Außerdem muss das Segel über den Sprogs bzw. an der Hinterkante noch für die Veränderung der Wölbung beim Kurven genügend Spiel haben, siehe das Kapitel zum Kurvenhandling.

Aber erst die Segel heutiger Hochleister lassen sich dank neuer Materialien (hochfestes Tuch, Carbon) so flach ziehen, dass im Trimmflug die durch die Sprogs einzuhaltende Mindestschränkung erreicht wird. Dennoch habe ich im Internet bis heute (Juni 2014) kein Video gesehen, das dies belegt. Dagegen gibt es viele Videos, die zeigen, dass die Srogabspannungen auch im Schnellflug mit voller VG locker bleiben, die Segel also immer noch Spiel haben.

- Streckung:

Mehr Streckung Str bzw. Spannweite Sp, $Str = Sp^2/Fläche$, verbessert die Gleitzahl, weil bei mehr Spannweite der notwendige Auftrieb durch einen geringeren lokalen Druckunterschied zwischen dem Überdruck unter dem Flügel und dem Unterdruck über dem Flügel erreicht wird, und sich zudem das 'Leck' am Flügelende, über das ein Druckausgleich stattfindet, etwas verkleinert. Der Flügel muss weniger angestellt werden, so dass weniger Widerstand entsteht. Winglets etc. erhöhen die aerodynamisch effektive Spannweite.

- Pfeilung:

Durch Pfeilung sind die Profilschnitte in Strömungsrichtung versetzt. Dadurch wird die Druck- bzw. Auftriebsverteilung über der Flügeltiefe geschwächt. Der Flügel muss für den notwendigen Auftrieb stärker angestellt werden, so dass mehr Widerstand entsteht.

- Zuspitzung:

Über die Zuspitzung kann zusammen mit der Flügeltiefe die Auftriebsverteilung über der Spannweite beeinflusst werden. Für eine elliptische Auftriebsverteilung wäre wegen der hohen Schränkung Flexibler (> 10 Grad) eine geringe Zuspitzung vorteilhaft. Eine höhere Flügeltiefe außen erhöht aber wiederum die Schränkung des Segels, siehe oben.

Eine kleine Flügeltiefe ganz außen (Randbogen) führt zu einem günstigeren Randwirbel.

- Latten-S-Schlag:

Ein S-Schlag im Profil durch entsprechend gebogene Segellatten erzeugt bei anliegender Strömung vor der Hinterkante des Flügels etwas Abtrieb. Der Flügel muss für den notwendigen Auftrieb stärker angestellt werden, so dass mehr Widerstand entsteht.

Andere Profilvermerkmale haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Gleitleistung. Die günstigste Profildicke für normale Flugeigenschaften/Fluggeschwindigkeit liegt bei etwa 12%, bezogen auf die Profiltiefe, bei Drachen eher etwas darunter. Die Wölbung liegt bei 4%, und die Dicken- und Wölbungsrücklage bei 25-30%, bei Drachen eher darunter.

5 Geringes Sinken

Für das Sinken v_S im stationären Gleitflug gilt

- $v_S = v/(1 + Glz^2)^{1/2}$, für hohe Gleitzahlen (≥ 10) gilt näherungsweise $v_S \approx v/Glz$, mit v = Geschwindigkeit und Glz = Gleitzahl.

Geringes Sinken erreicht man also durch eine geringe Geschwindigkeit v , siehe unten, und eine hohe Gleitzahl Glz . Allerdings wird die maximal mögliche Gleitzahl Glz_{max} nicht bei der minimal möglichen Geschwindigkeit v_{min} erreicht.

Durch die lastbedingte Zunahme der Schrägung, die zu einer kleineren Gleitzahl führt, und durch eine höhere Geschwindigkeit bei höherer Flächenbelastung, siehe unten, sind schwere Piloten hinsichtlich geringem Sinken doppelt benachteiligt.

6 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit v_{trim} im stationären Gleitflug mit $A \approx G$ und dem Anstellwinkel α_{trim} ergibt sich aus der Gleichung

- $v_{trim} \approx (G/F * 2/\rho * 1/c_A(\alpha_{trim}))^{1/2}$ [m/s], mit G/F = Flächenbelastung [N/m^2] und ρ = Luftdichte [kg/m^3].

Der Auftriebsbeiwert $c_A(\alpha_{trim})$ ergibt sich aus

- $c_A(\alpha_{trim}) = dc_A(\alpha)/d\alpha * (\alpha_{trim} - \alpha_{A=0})$, mit $dc_A(\alpha)/d\alpha$ = Gradient des Auftriebsbeiwertes, für einen Flexiblen $dc_A(\alpha)/d\alpha \approx 0,07$, und $\alpha_{A=0}$ = Anstellwinkel, bei dem der Auftrieb null ist [Grad].

Im Trimmflug, wenn das Nick-Moment im Schwerpunkt null ist, $M_S = 0$, gilt für den Anstellwinkel

- $\alpha_{trim} = \alpha_{S,M=0}$, so dass $c_A(\alpha_{trim}) = dc_A(\alpha)/d\alpha * (\alpha_{S,M=0} - \alpha_{A=0})$.

Diese Anstellwinkel-Differenz $\alpha_{S,M=0} - \alpha_{A=0}$ erhält man näherungsweise aus der Formel

- $\alpha_{S,M=0} - \alpha_{A=0} \approx c_{M,A=0}/(\sigma * dc_A(\alpha)/d\alpha)$, mit $c_{M,A=0}$ = Beiwert des Null-Auftrieb-Moments, siehe oben, und σ = Stabilitätsmaß = $(x_N - x_S)/t_B$, mit der Schwerpunktvorlage $x_N - x_S$ und der Bezugsflügeltiefe t_B , siehe oben.

Damit wird

- $c_A(\alpha_{trim}) \approx c_{M,A=0}/\sigma = c_{M,A=0} * t_B/(x_N - x_S) \approx c_{M,A=0} * t_m/(x_N - x_S)$, da $t_B \approx t_m$ = mittlere Flügeltiefe,

so dass schließlich

- $v_{trim} \approx (G/F * 2/\rho * \sigma/c_{M,A=0})^{1/2}$ [m/s],

Die Geschwindigkeit erhöht sich also mit der Flächenbelastung G/F und dem Stabilitätsmaß σ bzw. der Schwerpunktvorlage $x_N - x_S = \sigma * t_m$, und nimmt mit dem 'Pitch up', dem aufrichtenden Null-Auftrieb-Moment bzw. seinem Beiwert $c_{M,A=0}$, ab.

Bei einem höheren Gewicht G_+ erhöht sich die Geschwindigkeit im Trimmflug gegenüber G mit v_{trim} bei gleichem Stabilitätsmaß σ und gleichem Pitch up $c_{M,A=0}$ auf

- $v_{+trim} \approx v_{trim} (G_+/G)^{1/2}$ [m/s].

Aufgrund der Beziehung

- $\alpha_{S,M=0} - \alpha_{A=0} \approx c_{M,A=0} / (\sigma * dc_A(\alpha)/d\alpha)$

sind das Stabilitätsmaß σ aus der Schwerpunktvorlage und das Pitch up bzw. $c_{M,A=0}$, vor allem aus der Schränkung, so miteinander abzustimmen, dass sich im Trimmflug der optimale Anstellwinkel α_{opt} (maximales Gleiten oder geringstes Sinken) einstellt,

- $\alpha_{S,M=0} = \alpha_{opt}$.

Hieraus ergibt sich dann die optimale Fluggeschwindigkeit $v_{trim} = v_{opt} = v(\alpha_{opt})$.

Für geringes Sinken im Kurven- bzw. Kreisflug und für Starten und Landen kommt es darauf an, wie langsam ein Gleiter fliegen kann. Es gibt aber auch Situationen, z.B. bei Gegenwind, wo es auf hohe Geschwindigkeit ankommt.

Einen geringen negativen Einfluss auf die Geschwindigkeit messe ich auch der Profildröbung aufgrund eines höheren Formwiderstands bei, zumal Profildröbung auf der anderen Seite das Pitch up reduziert und damit über einen kleineren Anstellwinkel die Geschwindigkeit erhöht.

7 Kurvenhandlung bzw. Wendigkeit: Kurve ein- und ausleiten, Kurve halten

Das Kurvenhandlung bzw. die Wendigkeit wird daran gemessen, wie leicht (Steuerkraft) und schnell (Rollzeit) sich eine Kurve ein- und ausleiten lässt, und wie leicht und sicher sich ein Flugzeug in einer Kurve bzw. im Kreisflug halten lässt.

Prinzip der Kurvensteuerung beim Flexiblen:

Die Kurvensteuerung des Flexiblen basiert auf dem Gewicht, besser gesagt, auf der Masse des Piloten und deren Beschleunigung durch die Erdanziehung und durch die Steuerbewegungen:

- Verlagert der Pilot sein Gewicht in die beabsichtigte Kurve, entsteht mit der Auslenkung als Hebel ein Roll-Moment in die Kurve.
- Stößt sich der Pilot in die beabsichtigte Kurve, und so den Steuerbügel gegenüber seiner trägen Masse nach außen, entsteht temporär ebenfalls ein Roll-Moment in die Kurve.
- Am kurvenäußeren Flügel verringert sich beim Einleiten einer Kurve die Wölbung bzw. Schränkung (am kurveninneren Flügel nimmt sie zu), und zwar
 - durch die dort geringere Flächenbelastung bei seitlich in die Kurve verschobenem Piloten,
 - durch eine dort höhere Segelspannung aufgrund einer zusätzlichen Zugkraft über ein Schwimmendes Kielrohr und
 - durch Entlastung des kurvenäußeren Flügels bei einer Rollbewegung durch einen seitlichen Stoß bzw. Steuerimpuls.

Die Effekte addieren sich dabei weitgehend, wobei durch den Steuerimpuls zur seitlichen Auslenkung des Piloten zunächst ein temporäres Rollmoment entsteht.

Aus einer bleibenden Auslenkung des Piloten ergibt sich anschließend ein Gewichtsmoment als Rollmoment um die Längsachs.

Die Auslenkung des Piloten führt zudem zu einer asymmetrischen Flächenbelastung, was eine asymmetrische Wölbung und Verdrehung bewirkt, die ein zusätzliches Rollmoment erzeugt.

Bei einem Schwimmenden Kielrohr entsteht durch die seitliche Auslenkung zudem ein seitlicher Zug auf das Segel, was die asymmetrische Wölbung und Verdrehung erhöht und das sich daraus ergebende Rollmoment verstärkt.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Effekte zum Einleiten einer Kurve näher eingegangen.

Beim Halten und Ausleiten einer Kurve kommt zur Schwerkraft noch die Fliehkraft hinzu.

Beim Halten einer Kurve ist ein leichtes Gegensteuern erforderlich, da beim Kurven der kurvenäußere Flügel eine etwas höhere Bahngeschwindigkeit hat als der kurveninnere Flügel, und dadurch mehr Auftrieb erzeugt, was zum Einzirkeln führen würde. Drückt sich der Pilot dazu nach außen, muss er sich wegen der Schräglage auch etwas hoch stemmen (highsiden).

Eine seitlich in die gewollte Kurve verlagerte Masse des Piloten führt primär zu einer höheren Flächenbelastung des kurveninneren Flügels bzw. einem 'kleineren' Innenflügel und einer geringeren Flächenbelastung des kurvenäußeren Flügels bzw. einem 'größeren' Außenflügel. Schon hieraus entsteht folgendes Gewichtsmoment bzw. Rollmoment $M_{G,x}$ um die Längsachse x bzw. das Kielrohr, unabhängig von der Segelspannung und von Veränderungen der Wölbung:

- $M_{G,x} = G_P * y_P$, mit G_P = Gewicht des Piloten, y_P = Auslenkung des Piloten als Hebel.

Bei z.B. einem Pilotengewicht $G_P = 90$ kp und einer seitlichen Auslenkung von $y_P = 20$ cm entsteht ein Rollmoment $M_{G,x} = 18$ kp*m.

Für die seitliche Verlagerung y_P seiner Masse G_P gegenüber der Gewichtskraft, muss der Pilot folgende seitliche Steuerkraft $K_{St,y}$ am Steuerbügel aufbringen:

- $K_{St,y} = G_P * y_P / (z_P^2 - y_P^2)^{1/2}$, mit z_P = Länge der Pilotenaufhängung.

Bei z.B. einem Pilotengewicht $G_P = 90$ kp und einer Aufhängung der Länge $z_P = 140$ cm braucht eine seitliche Auslenkung $y_P = 20$ cm eine Steuerkraft von 13 kp.

Hinzu kommt, dass sich der höher belastete Kurven-Innenflügel stärker wölbt, da seine entsprechend höhere Segelspannung sein Flügelrohr mehr biegt und das Segeltuch stärker dehnt, wogegen die Wölbung des weniger belasteten Kurven-Außenflügels abnimmt. Der Anstellwinkel α des Außenflügels nimmt dadurch etwas zu, und damit auch sein Auftrieb $A(\alpha)$, während Anstellwinkel und Auftrieb des Innenflügels etwas abnehmen. Dadurch wird das Rollmoment noch erhöht. Eine solche Erhöhung $M_{A,x}$ lässt sich in ihrer Größenordnung anhand folgender Formel abschätzen:

- $M_{A,x} = dA(\alpha)/d\alpha * d\alpha/d(G_P, y_P) * y_A$ [Nm], mit
 $dA(\alpha)/d\alpha = \rho/2 * v^2 * F * dc_A(\alpha)/d\alpha$, mit
 ρ = Luftdichte $\approx 1,225$ [kg*m/s²],
 v = Geschwindigkeit [m/s],
 F = Flügelfläche [m²],
 $dc_A(\alpha)/d\alpha$ = Gradient des Auftriebsbeiwertes $\approx 0,07$ [1/Grad] bei Flexiblen,
 $d\alpha/d(G_P, y_P)$ = Gegensinnige Veränderung des Anstellwinkels je Halbflügel durch eine seitliche Verschiebung y_P des Pilotengewichts G_P [Grad],
 y_A = Abstand des Angriffspunktes des Auftriebs eines Halbflügels von der Längsachse x bzw. vom Kielrohr [m].

Für z.B. eine Fläche $F = 14$ m², eine Geschwindigkeit $v = 40$ km/h, eine Veränderung des Anstellwinkels durch eine seitliche Verschiebung $y_P = 20$ cm eines Piloten mit $G_P = 90$ kp von $d\alpha/d(G_P, y_P) = 1$ Grad (≈ 2 cm höhere/tiefere Hinterkante in der Mitte des Segels) und einen seitlichen Angriffspunkt des Auftriebs $y_A = 2$ m (bei z.B. 5 m Halbspannweite) errechnet sich ein Rollmoment durch die seitliche Verschiebung der Auftriebsverteilung von $M_{A,x} = 15$ kp*m. Da der Höhenunterschied der Segelhinterkante je nach Segelspannung und Biege-Steifigkeit durchaus 10 cm betragen kann, dürfte der Beitrag zum Rollmoment aus der unterschiedlichen Segelwölbung bei etwa $M_{A,x} = 50$ bis 100 kp*m. Das entspricht etwa dem 4-fachen des primären Moments aus der seitlichen Gewichtsverlagerung $M_{G,x} = 18$ kp*m, siehe oben.

Eine gute Vorstellung über die Veränderung der Segelwölbung beim Kurven mit einem WillsWing Spectrum 144 vermittelt das Video <http://vimeo.com/77804817>. Das Schwimmende Kielrohr, siehe unten, ist zwar festgebunden, bleibt dennoch leicht beweglich, siehe unten.

Der Pilot schiebt seine Masse unter dem Flügel zum Einleiten einer Kurve aber nur dann wirklich zur Seite, wenn er den ganzen Körper seitlich herausdrückt. Er muss seine Beine mitnehmen, so dass der Körper parallel zum Kielrohr bleibt. Dies erfordert eine entsprechende Körperspannung. Ein schräg hängender Pilot hätte zudem einen höheren Luftwiderstand.

Fliegt man einen aufwärts gerichteten Bogen, so erhöhen sich die Kräfte aus der Masse des Piloten um die durch den Flugbogen entstehende Fliehkraft, was die Kurvensteuerung verbessert. Dies nutzt man zur Steuerung zäher Geräte, indem man den Drachen vor der Gewichtsverlagerung leicht runterzieht und nach erfolgter Gewichtsverlagerung wieder hochdrückt. Höhere Massenkräfte bestehen auch während des Kurven- bzw. Kreisflugs, was das Ausleiten einer Kurve erleichtert.

Mit zunehmender Belastung nimmt der Widerstand der Struktur und damit die Segelspannung zu, so dass die Unterschiede im Auftrieb aufgrund der Unterschiede in der Wölbung zwischen Kurven-Innen- und -Außenflügel durch eine seitliche Verschiebung des Pilotengewichts abnehmen. Der daraus resultierende Beitrag zum Rollmoment $M_{A,x}$ fällt geringer aus.

Aus jeder Verschiebung bzw. Beschleunigung der Pilotenmasse entstehen auch Trägheitskräfte, die zur Steuerung beitragen (dynamische Steuerung, Impulssteuerung). Stößt der Pilot aufgrund der trägen Masse seines Körpers den Steuerbügel zur Seite, verschiebt sich nicht nur sein Körper, sondern er neigt auch den Flügel ein wenig in die Kurve, wobei sogar noch ein positives statt negatives Wendemoment entstehen kann, siehe unten. Außerdem wird der kurvenäußere Flügel entlastet, der kurveninnere stärker belastet, was sich auch entsprechend auf die Wölbung auswirkt (außen weniger, innen mehr).

Ein Drehimpuls auf den Steuerbügel (Lenkersteuerung) dreht den Flügel ein wenig um die Hochachse in die Kurve, was ein positives Wendemoment erzeugt. Der kurvenäußere Flügel wird beschleunigt, der kurveninnere verzögert, so dass der Kurven-Außenflügel mehr Auftrieb erzeugt als der Innenflügel und ein Rollmoment in die Kurve entsteht.

Die Impulssteuerung eignet sich auch für den Winden- und UL-Schlepp, denn eine seitliche Auslenkung des Piloten zur Kurskorrektur verlagert leider auch den Angriffspunkt der Zugkraft am Piloten zur falschen Seite, so dass ein Giermoment entsteht, das den Drachen noch weiter aus der Bahn drehen will. Außerdem wird die Impulssteuerung nicht durch eine höhere Segelspannung, wie sie vor allem für den UL-Schlepp zu empfehlen ist, beeinträchtigt, siehe unten.

Aus den Momenten zum Einleiten einer Kurve entstehen folgende Gegenkräfte, die die Rollzeiten verlängern bzw. höhere Steuerkräfte erfordern:

- Die Roll-Dämpfung: Sie wirkt einer Rollbewegung entgegen und nimmt mit dem Quadrat der Roll-Geschwindigkeit und mit der Größe der Fläche und ihrer Spannweite, sowie bei Beginn der Rollbewegung auch ihrer Steifigkeit zu.
- Die Roll-Trägheit: Sie wirkt einer Roll-Beschleunigung (Impulssteuerung) entgegen und nimmt mit der Größe der Beschleunigung, der Masse der Fläche und ihrer Spannweite zu.
- Die Gier-Trägheit: Sie wirkt einer Gier-Beschleunigung (Lenkersteuerung) entgegen, und nimmt wie die Roll-Trägheit mit der Größe der Beschleunigung, der Masse der Fläche und ihrer Spannweite zu.

Die Gier-Dämpfung kann als Gegenkraft einer Gierbewegung vernachlässigt werden.

- Das Negative Wendemoment: Es ist ein Gier-Moment, das den Flügel aus der Kurve dreht, und entsteht bekanntlich bei der Querruder-Steuerung durch den höheren Widerstand am Kurven-Außenflügel gegenüber dem Innenflügel.

Auch beim Flexiblen erzeugt der stärker angestellte kurvenäußere Flügel (weniger Wölbung durch geringere Flächenbelastung durch Verlagerung des Pilotengewichts in die Kurve) gegenüber dem Innenflügel einen höheren Luftwiderstand, so dass der Flügel aus der Kurve dreht. Die Gewichtsverlagerung aus der Flügelmitte macht den Kurven-Außenflügel zudem 'größer', den Innenflügel 'kleiner', wodurch sich der Unterschied im Luftwiderstand noch erhöht und das Negative Wendemoment verstärkt.

Eine Rollbewegung aus einem seitlichen Steuerimpuls dagegen erhöht am kurveninneren Flügel den Anströmwinkel ein wenig und verringert ihn am Kurven-Außenflügel (sofern das Segel nicht nachgibt), was die Unterschiede im Luftwiderstand wieder ein wenig reduziert, und damit auch das Negative Wendemoment.

Segelspannung (Segelspan.):

Eine hohe Segelspannung führt zwar zu guter Gleitleistung, mindert jedoch den Unterschied in der Wölbung zwischen kurvenäußerem und -innerem Flügel, der durch eine asymmetrische Flächenbelastung und den Einfluss der seitlichen Zugkraft am Schwimmenden Kielrohr, siehe unten, bei einer seitlichen Auslenkung des Piloten entsteht. Dieser gegenseitige Ausschluss von Gleitleistung und Wendigkeit ist der heute wesentliche (verbliebene) Nachteil Flexibler gegenüber Starren,

Die gegensinnige Veränderung der Schränkung bzw. des Anstellwinkels der beiden Halbflügel fällt dadurch geringer aus, das Rollmoment in die Kurve aus einer seitlichen Verlagerung des Pilotengewichts wird somit weniger verstärkt. Dies betrifft nicht nur das Einleiten einer Kurve, sondern in etwas geringerem Maße auch das Ausleiten und Halten einer Kurve, denn in einer Kurve können durch die zusätzliche Fliehkraft höhere Steuer- und Stellkräfte eingesetzt werden. Die Wirkung der Impulssteuerung ist von der Segelspannung weitgehend unabhängig.

Kieltasche:

Eine Kieltasche ist eine lange Schlaufe aus Segeltuch unter der Mittelnaht der beiden Segel der Halbflügel, an der Segelhinterkante etwa 20 cm hoch, in der das von der Nasenplatte kommende Kielrohr hängt, siehe Bild "Wirkung' Kieltasche'. Das Kielrohr war dabei (zunächst) mit den Querrohren fest verbunden.

Heute nicht mehr gebaut, sollte sie die Unterschiede in der Wölbung aufgrund der Unterschiede in der Flächenbelastung bzw. Segelspannung zwischen den beiden Halbflügeln verstärken und damit das Rollmoment in die Kurve verbessern. Dabei hat man sich wohl vorgestellt, die höhere Segelspannung des kurveninneren Flügels zöge das kurvenäußere Segel, das schon wegen der geringeren Belastung weniger gewölbt ist, noch flacher, während sich das kurveninnere Segel durch die Verschiebung der Mittelnaht zwischen den Segeln noch weiter wölben könnte. Durch eine Kieltasche werden Unterschiede in der Segelspannung zwischen den beiden Halbflügeln jedoch größtenteils ausgeglichen, was die Unterschiede in der Wölbung eher aufhebt. Dass dies dennoch nicht geschieht liegt an der Verschiebung der Mittelnaht der beiden Segel in Richtung Kurve. Höhere Unterschiede in der Wölbung werden jedoch keinesfalls erreicht. Daher bietet die Kieltasche auch bei der Impulssteuerung keine Vorteile.

Eine Kieltasche bei einem Schwimmenden Kielrohr wirkt sich kontraproduktiv aus, siehe unten. Durch den Ausgleich der Segelspannung zwischen den Halbflügeln wird aber weitgehend vermieden, dass ungewollte Unterschiede in der Spannung dazu führen, dass das Gerät zur Seite zieht.

Das Spiel des Segels erhöht jedoch eine Anfälligkeit zum Aufschaukeln. Als stabilisierende Seitenflosse kann die Fläche der Kieltasche wegen ihres geringen Abstands zum Schwerpunkt nicht wirken.

Schwimmendes Kielrohr (Schwimm. Kielrohr):

Von einem Schwimmenden Kielrohr spricht man, wenn das Kielrohr nicht fest mit den Querrohren verschraubt, sondern nur mit einer losen Schlaufe verbunden ist. Dadurch lässt sich das Kielrohr gegenüber den Querrohren seitlich etwas bewegen und um die Nasenplatte etwas drehen. Ist das Segel eng mit dem Kielrohr verbunden, können so zum Einleiten einer Kurve durch eine seitliche Auslenkung des Piloten über die Pilotenaufhängung Unterschiede in der Segelspannung und folglich in der Segelwölbung und im Auftrieb zwischen den beiden Halbflügeln erzeugt werden.

Da die Flügel durch Seile von den Trapezecken zu den Enden der Querrohre oder der inneren Flügelrohre (seitliche Unterverspannung) gehalten werden, wird das Trapez bei einer seitlichen Bewegung des Kielrohrs gegen die Unterverspannung etwas gekippt, und gegenüber der gesamten Unterverspannung (einschließlich der vorderen und hinteren Unterverspannung, den Seilen nach vorne und hinten zum Kielrohr) etwas gedreht, wie im Bild 'Wirkung Schwimmendes Kielrohrs' stark übertrieben dargestellt. Durch Spiel im Trapezkopf wird eine Torsion des Kielrohrs beim Kippen des Trapezes vermieden.

Die Drehung gegen die Unterverspannung wird etwas erleichtert, wenn die hintere und vordere Unterverspannung nicht straff gespannt sind (keine Kielbiegung) und/oder die hintere Unterverspannung (und/oder die vordere) als Y-Seil ausgeführt ist, bei dem zunächst ein ca. 20 cm langes Seil vom Kielrohr ausgeht, von dem dann erst die beiden Seile zu den Trapezecken abzweigen. Für eine wenig straffe vordere und hintere Unterverspannung muss die seitliche Unterverspannung mit den Trapezecken auf einer Linie liegen. Der lose Halt durch die hintere Unterverspannung dürfte aber ohnehin nur einen geringen Einfluss haben, da die seitliche Auslenkung des Kielrohrs nur im Bereich von etwa 1 bis 2 cm liegt, siehe unten.

Auch ein Schwimmendes Kielrohr wird also mittig gehalten, allerdings nicht starr durch eine Verschraubung mit den Querrohren sondern elastisch durch die Unterverspannung. Diese Elastizität kann jedoch ein Aufschaukeln aus einem Gieren heraus begünstigen.

Wenn der Pilot die Trapezbasis zum Einleiten einer Kurve zur Seite drückt (Steuerkraft) entsteht über die Pilotenaufhängung als Gegenkraft ein seitwärts gerichteter Zug auf das Kielrohr. Bei einem Schwimmenden Kielrohr wird durch diesen seitlichen Zug (Stellkraft) das Segel des kurvenäußeren Flügels etwas stärker gespannt und dadurch flacher gezogen. Am kurveninneren Flügel wölbt sich das Segel dagegen mehr, weil seine Spannung nachlässt. Dies führt, wie bei der asymmetrischen Wölbung durch eine asymmetrische Flächenbelastung durch das seitlich verschobene Gewicht des Piloten, zu mehr Auftrieb am kurvenäußeren Flügel und weniger am kurveninneren Flügel, und somit zu einer weiteren Verstärkung des Rollmoments beim Einleiten einer Kurve. Auch die asymmetrische Flächenbelastung zieht das Kielrohr zur Seite, ähnlich wie das Segel bei der Kieltasche, wobei der seitliche Zug auf das Segel jedoch erhalten bleibt.

Von einem seitlichen Impuls des Piloten auf die Trapezbasis kommt am Kielrohr dagegen kaum etwas als seitliche Zugkraft an, denn ein Impuls wird hauptsächlich von der trägen Masse des Piloten aufgenommen und führt viel mehr zu der gewünschten Rollbewegung, siehe oben. Die Steuerkraft aus einer seitlichen Auslenkung wirkt sich allerdings auch nicht in voller Höhe als zusätzliche Zugkraft am Segel (Stellkraft) aus. Ein Teil der Steuerkraft wird verbraucht, um das Kielrohr gegen den Widerstand aus der Unterverspannung zu bewegen, und von der verbliebenen Querkraft erzeugt nur die Komponente in Richtung der Pfeilung eine zusätzliche Segelspannung. Außerdem ist diese zusätzliche Spannung in Relation zur Grundspannung des Segels zu setzen. Mit höherer Grundspannung des Segels nimmt der Einfluss der zusätzlichen Zugkraft über das Schwimmende Kielrohr ab, siehe oben.

Für eine Pilotenmasse von z.B. 90 kg beträgt die Steuerkraft für eine seitliche Auslenkung von 20 cm etwa 13 kp, siehe oben.

Für einen Halbflügel von 6 m Länge, gepfeilt mit ca. 5 m Spannweite, und einer Belastung von 60 kp errechnet sich anhand der Kräftegeometrie für eine kreisförmige Wölbung mit gut 22 cm Wölbhöhe der Hinterkante, was gut 14 Grad Schränkung auf Höhe des äußeren Sprogs 1 m vor der Flügelspitze entspricht, näherungsweise eine Segelspannung von ca. 140 kp.

Käme von den 13 kp Steuerkraft noch 10 kp als zusätzlicher Zug am Segel an, würde diese Veränderung der Segelspannung nach obigem Krätemodell zu einer Veränderung der Wölbhöhe um etwa 1,5 cm führen. Dies entspricht einer Veränderung der Schränkung, und damit des Anstellwinkels, von gut 1 Grad auf Höhe des äußeren Sprogs.

Welches Rollmoment sich aus einer asymmetrischen Wölbung ergibt ist bereits oben anhand einer Faustformel betrachtet worden.

Eine Kombination von Kieltasche und Schwimmendem Kielrohr wirkt sich nachteilig aus, da der seitliche Zug des Piloten am schwimmenden Kielrohr nicht direkt auf das dann höher stehende Segel übertragen wird, die Stellkraft also vermindert wird.

Für die 1,5 cm weniger Wölbhöhe des 6 m langen Halbflügels müsste das Kielrohr nur 1 Millimeter zur Seite gezogen werden, sofern kein Spiel zwischen Kielrohr und Segel besteht, sich durch die höhere Spannung die Flügelrohre nicht weiter biegen und sich das Tuch nicht weiter dehnt.

Tatsächlich bewegt sich ein Schwimmendes Kielrohr etwa 1 bis 2 cm zur Seite, wie eigene Aufnahmen vom Twister und folgendes Video <http://vimeo.com/77612358> zeigen. Dieses zusätzliche Schwimmen des Kielrohrs dürfte auf Spiel in der Verbindung Segel-Kielrohr, auf eine Biegung der Flügelrohre und durch die asymmetrische Wölbung aus der Verschiebung des Pilotengewichts zurückzuführen sein. Dehnung dürfte bei heutigem hochwertigem Segeltuch kaum eine Rolle spielen.

So wie das Einleiten einer Kurve erleichtert ein Schwimmendes Kielrohr auch das Ausleiten und das Halten einer Kurve. Denn durch die Fliehkraft kann über das Schwimmende Kielrohr das Segel des kurveninneren Flügels straffer und flacher gespannt werden, während sich der

kurvenäußere Flügel aufgrund geringerer Spannung mehr wölbt, so dass die Unterschiede in der Bahngeschwindigkeit durch Unterschiede im Anstellwinkel aufgewogen werden und eine ausgeglichene Auftriebsverteilung über der Spannweite entsteht.

Ein Vorteil des Schwimmenden Kielrohrs besteht auch darin, dass sich die Segelspannungen der beiden Halbflügel über die Spannweite (in ihrer Summe über die Flügeltiefe) größtenteils ausgleichen. Ein Ziehen des Gerätes zur Seite ist aus diesem Grunde daher kaum möglich. Ein Schwimmendes Kielrohr gehört zum Standard heutiger Intermediates und Hochleister.

Biege-Steifigkeit (Biege-Steifigk.):

Eine geringe Biege-Steifigkeit erhöht die Wölbung bei einer Belastung der Fläche. Dadurch werden die Unterschiede in der Wölbung zwischen kurveninnerem und –äußerem Flügel bei asymmetrischer Flächenbelastung (siehe oben) größer, was zu einem stärkeren Rollmoment führt.

Bei einem Schwimmenden Kielrohr werden durch die Biege-Steifigkeit jedoch die Unterschiede in der Segelspannung, die durch den seitlichen Zug am Segel (Stellkraft) erzeugt werden (siehe oben) etwas ausgeglichen, was die Wirkung der Kurvensteuerung über das Schwimmende Kielrohr abschwächt.

Gewicht Pilot (Gew. Pilot), Gewicht Gerät, Fläche, Spannweite:

Da die Kurvensteuerung eines Flexiblen auf der Masse des Piloten beruht, ist das Ein- und Ausleiten einer Kurve umso einfacher, je mehr der Pilot im Vergleich zum Flügel wiegt.

Ein schweres Gerät hat eine große Roll- und Gier-Trägheit, insbesondere wenn bei großer Spannweite die Massen einen großen Abstand von der Längsachse haben. Winglets etc. erhöhen so die Roll- und Gier-Trägheit.

Bei kleinerer Flügelfläche und vor allem kleinerer Spannweite fallen die einer Rollbewegung in eine Kurve entgegen wirkende Roll-Trägheit und Roll-Dämpfung wie auch das Negative Wendemoment geringer aus.

Negative V-Form:

Die negative V-Form reduziert das Negative Wendemoment, da durch sie bei einem aus der Kurve gedrehten Flügel der kurveninnere vorausseilende Halbflügel flacher angeströmt wird und dadurch weniger Widerstand und weniger Auftrieb erzeugt als der nacheilende, steiler angeströmte kurvenäußere Flügel, der entsprechend mehr Widerstand und mehr Auftrieb erzeugt. Die Unterschiede im Widerstand führen zu einem in die Kurve drehenden Giermoment, was das Negative Wendemoment (weitgehend) ausgleicht. Die Unterschiede im Auftrieb führen zu einem Rollmoment, das den Flügel in die Kurve neigt. Die Kurvensteuerung wird also durch eine Negative V-Form unterstützt, hauptsächlich das Einleiten einer Kurve.

Der Nachteil der Negativen V-Form ist eine leichte Roll-Instabilität, da ein angebobener Flügel etwas mehr Auftrieb erzeugt als der hängende Flügel, was eine Schräglage um die Längsachse noch verstärkt, sofern der Pilot nicht korrigierend eingreift. Dies birgt in Verbindung mit den Giermomenten das Risiko eines Aufschaukeln, insbesondere für Flexible mit ihrem elastischen Gestell. Winglets nach oben mindern eine negative V-Stellung und stabilisieren bei einem gepfeiten Flügel wie Seitenflossen um die Hochachse.

Eine Roll-Instabilität erschwert auch das Halten einer Kurve, zumal der höhere Auftrieb aufgrund einer höheren Bahngeschwindigkeit des kurvenäußeren Flügels gegenüber dem kurveninneren Flügel ohnehin schon ein leichtes Gegensteuern erfordert, siehe oben.

Turmaufhängung (Turmaufh.):

Bei einer Turmaufhängung des Piloten ist die Haupt-Aufhängeschlaufe nicht direkt um das Kielrohr gelegt, sondern einige Zentimeter oberhalb am Turm befestigt, bei Turmlosen an einer auf dem Kielrohr sitzenden Wippe, wie z.B. beim T2 und T2C von WillsWing. Damit ein seitliches Pendeln der Schlaufe nicht durch das Kielrohr begrenzt wird, ist die Schlaufe einige

Zentimeter unterhalb des Kielrohrs durch ein Spreizholz gespreizt. So entsteht ein Hebel für das Moment aus dem Gewicht des Piloten bereits durch eine Schräglage des Flügels. Die Auslenkung durch den Piloten für das Einleiten einer Kurve erfordert dadurch weniger Kraft am Steuerbügel bzw. die Auslenkung insgesamt kann erhöht werden.

Mit einer Turmaufhängung ist jedoch auch eine Kippneigung um die Längsachse verbunden, vergleichbar mit einer leichten Roll-Instabilität. Dies erschwert bei einer Tendenz zum Einzirkeln das Ausleiten und das Halten einer Kurve.

Geringe Schränkung, Zuspitzung:

In (engen) Kurven bzw. Kreisen wird ähnlich wie beim Langsamflug mit möglichst maximalem Auftriebsbeiwert $c_{A,max}(\alpha)$ bzw. dem entsprechenden Anstellwinkel $\alpha(c_{A,max})$ geflogen, also nicht weit von dem Anstellwinkel α_{krit} entfernt, bei dem die Strömung abreißt. Denn auch beim Kurbeln möchte man langsam fliegen, um die zusätzliche Fliehkraft $Z = m \cdot v^2/r$ aus der Masse m , der Geschwindigkeit v und dem Kurvenradius r möglichst gering zu halten, und damit das Eigensinken.

Durch Turbulenzen kann so leicht der kritische Anstellwinkel α_{krit} teilweise erreicht oder überschritten werden, so dass die Strömung stellenweise abreißt und der Flügel zu der hauptsächlich betroffenen Seite abkippt, was zu einem Spiralsturz führt. Besonders gefährlich ist es, wenn die Strömung am Flügelende abreißt, was dadurch kommen kann, dass das Flügelende durch den Aufwind des Randwirbels immer etwas steiler angeströmt wird.

Durch eine negative Schränkung (die Anstellung des Flügels nimmt nach außen ab) können solche gefährlichen Strömungsabriss am Flügelende vermieden werden. Auch richtig geformte und positionierte Winglets etc. tragen zum Anliegen der Strömung am Flügelende bei.

In Kurven ist der kurveninnere Flügel eher von Strömungsabriss betroffen, da dieser wegen der geringeren Bahngeschwindigkeit steiler angestellt sein muss. Eine geringe Schränkung erschwert somit das Halten einer Kurve. Hat der Pilot, um langsam zu fliegen, sein Gewicht nach hinten gedrückt, verringert sich auch noch die Nick-Stabilität, und dann kann aus einem einseitigen Strömungsabriss Flachtrudeln entstehen.

Siehe auch der Artikel von Marcus Huffmann-Guben 'Trudeln mit dem Starrflügler', DHV-Seite http://www.dhv.de/web/fileadmin/user_upload/monatsordner/dhvde1999/artikel/info114/artikel_sarre.pdf.

Die Strömung reißt dann an einer Stelle y eines Halbflügels ab, wenn dort der kritische örtliche Auftriebsbeiwert des Profilschnitts $c_{AP,krit}(y) = c_{AP,krit}(\alpha(y))$ bzw. der kritische Anstellwinkel $\alpha_{krit}(y)$ erreicht oder überschritten wird.

Der Auftrieb eines Halbflügels ergibt sich aus dem Flächenintegral $A_H = \int_{y=0}^b (c_{AP}(y) \cdot t(y)) dy$ über die Halbspannweite b mit der örtlichen Flächentiefe $t(y)$. Die Funktion $\gamma(y) = c_{AP}(y) \cdot t(y)$ für $y = 0$ bis b wird als Auftriebsverteilung (über der Halbspannweite b) bezeichnet. Eine gewünschte Auftriebsverteilung $\gamma(y)$ lässt sich also durch einen entsprechenden Verlauf des Beiwerts $c_{AP}(y)$ bzw. des Anstellwinkels $\alpha(y)$ und/oder der Flügeltiefe $t(y)$ erreichen. Aus einer nach außen abnehmenden Flügeltiefe, also durch Zuspitzung, kann sich so eine Forderung nach größeren Beiwerten $c_{AP}(y)$, die nur noch wenig vom kritischen Wert $c_{AP,krit}(y)$ sein können, ergeben.

Beim gepfeilten Nurflügel ist es allerdings so, dass schon Nick-Stabilität eine gewisse negative Schränkung verlangt (bei Flexiblen > 10 Grad), und schon dadurch zur Flügelspitze hin kleinere Anstellwinkel und damit kleinere Beiwerte $c_{AP}(y)$ entstehen. Die Schränkung muss dabei umso größer sein, je geringer die Flügeltiefe der äußeren Fläche, die als Leitfläche dient, ausfällt. Eine größere Flügeltiefe außen, also weniger Zuspitzung, hätte demnach gleich zwei Vorteile: 1. Die Schränkung könnte kleiner sein, und/oder 2. einer gewünschten, z.B. elliptischen Auftriebsverteilung könnte man näher kommen.

Bei Flexiblen entsteht die Schränkung im Trimmflug jedoch je nach Belastung, Segelspannung und Verlauf der Segelspannung über die Flügeltiefe. Und außen, wo die den Auftrieb haltende Segelspannung am Ende des Flügelrohrs angreift und dadurch sehr weit vorne verläuft, führt eine größere Flügeltiefe, also weniger Zuspitzung, zu mehr Wölbung bzw. Schränkung, so dass dadurch nicht wie gewünscht, und wie bei einem starren Flügel möglich, außen eine höhere Auftriebsverteilung erreicht wird. Dafür bietet eine am kurveninneren Flügel außen erhöhte

Schränkung noch mehr Abkippsicherheit. Randbögen sollten daher einige Grade höher eingestellt sein als der äußere Sprog, damit die Schränkung an der Flügelspitze nicht abnimmt.

Bei einer Schränkung mit dem Einstellwinkel an der Flügelwurzel $\varepsilon_W = \varepsilon(y=0)$ und an der Flügelspitze $\varepsilon_S = \varepsilon(y=b)$ bei einer Halbspannweite b ergibt sich bei linearer Schränkung als laufender Einstellwinkel $\varepsilon(y) = (\varepsilon_S - \varepsilon_W)/b * y$, $y = 0$ bis b . Für den Anstellwinkel $\alpha(y)$ mit dem Anstellwinkel an der Flügelwurzel $\alpha_W = \alpha(y=0)$ gilt somit $\alpha(y) = \alpha_W + \varepsilon(y) = \alpha_W + (\varepsilon_S - \varepsilon_W)/b * y$. Beträgt der Anstellwinkel an der Flügelwurzel z.B. $\alpha_W = 15$ Grad, der dortige Einstellwinkel $\varepsilon_W = 0$ Grad und der Einstellwinkel an der Flügelspitze $\varepsilon_S = -10$ Grad, so ergibt sich für den Verlauf des Anstellwinkels $\alpha(y) = 15 - 10/b * y$. An der Flügelspitze mit $y = b$ beträgt der Anstellwinkel also $\alpha(b) = 5$ Grad. Wird an der Flügelwurzel der kritische Anstellwinkel von z.B. $\alpha_{krit}(y) = \alpha_{krit} = 25$ Grad erreicht, so liegt die Flügelspitze mit $\alpha(b) = 15$ Grad immer noch weit unter dem kritischen Wert. Ein Strömungsabriss kann daher am ehesten an der Flügelwurzel beginnen, so dass nur ein geringes Kipp-Moment entstehen kann und der Flügel viel mehr nach vorne abnickt und damit wieder einen sicheren Anstellwinkel einnimmt und Fahrt aufholt.

Sprogwinkel, Lufflinehöhe:

Da sich die Wölbung bzw. Schränkung beim Einleiten einer Kurve am kurvenäußeren Flügel verringert, und zwar, siehe oben,

- durch die dort geringere Flächenbelastung bei seitlich verschobenem Piloten,
 - durch eine höhere Segelspannung aufgrund einer zusätzlichen Zugkraft über ein Schwimmendes Kielrohr und
 - durch eine Flächenentlastung durch eine Rollbewegung bei Impulssteuerung,
- können sich hoch stehende Sprogs und Lufflines, die die Segelhinterkante für die nötige Nick-Stabilität hoch halten, störend auf das Kurvenhandling auswirken, da sie ein Absenken des Segels begrenzen.

Allerdings nehmen die Unterschiede in der Wölbung bzw. Schränkung zwischen Kurven-Innen- und -Außen-Flügel mit zunehmender Segelspannung ab. Andererseits steht das Segel im Trimmflug bei zunehmender Grundspannung aber auch schon dichter über den Sprogwinkeln, die Sprog-Abspannungen sind weniger lose.

Und so liest und hört man immer wieder mal, auch von namhaften Piloten, dass das Handling eines Gerätes deutlich besser war, nachdem man die Sprogs 'maßvoll' abgesenkt hatte.

Videos aus dem Internet zeigen bisher aber nur Beispiele, auch von Hochleistern mit namhaften Piloten, wie den WillsWing T2C mit Dustin Martin, <http://vimeo.com/3635942>, bei denen die Segel bzw. Sprog-Abspannungen immer noch genügend Spiel haben. Allerdings ist bei keinem Beispiel (amtlich) belegt, welche Ausstattungs-Version des Gerätes vorlag, wie die Sprogs eingestellt waren, wo das Querrohrgelenk stand (VG), wie schwer der Pilot war, welches Manöver mit welcher Geschwindigkeit geflogen wurde etc. Auch wird selten deutlich, was das Video aussagen soll. Überwiegender Tenor ist: Lasst das Absenken, es verbessert weder das Handling noch die Leistung sondern gefährdet nur die Nick-Stabilität. Man könnte aber auch folgern: Das Segel kann für hohe Leistung nicht flach genug gezogen werden.

Das einzige Video bei dem sich das Segel im Trimmflug so weit runterziehen ließ, dass sich die Abspannungen der mit -6 und -8 Grad eingestellten Sprogs strafften, hat mir bisher nur Harald Zimmer von Bautek nach einem Testflug mit dem Fizz im Frühjahr 2011 gezeigt. Ein anderer fachlich versierter Pilot hat mir versichert, dass es von einem Laminar Z9 entsprechende Videos gebe. Ohne (amtlich) belegte Daten können solche Aufnahmen aber positiv wie negativ interpretiert werden: Das flach zu ziehende Segel verspricht gute Gleitleistung, oder aber, die Sprogs müssen hoch stehen, weil das Gestell weich ist, und beeinträchtigen so das Handling. Hierzu muss man noch die Sprogwinkel aus dem Datenblatt der Musterprüfung kennen.