



[Startseite](#) - [Technik](#)

# Statische Längsstabilität

von der Steinzeit bis Felix Rühle

veröffentlicht im DHV-Info 107

Bernd Schmidler führt seit mehr als 10 Jahren die flugmechanischen Messungen des DHV durch. Er hat über 1000 verschiedene Hängegleiter und nahezu alle zugelassenen Trikeflächen untersucht. Im nachfolgenden Artikel beschreibt er die Geschichte der "Grundlage der Fliegekunst", der sogenannten statischen Längsstabilität.

## Vor der Erfindung der Fliegerei

Es geschah in der Altsteinzeit, wahrscheinlich ehe der Mensch gelernt hatte, das Feuer zu beherrschen. Irgend ein Jäger und Sammler schaute neidisch den Vögeln nach und fasste als erster Homo Sapiens den Gedanken, der mir jeden Tag kurz nach dem Aufstehen durch den Kopf geht: "Fliegen möchte ich".

Wir wissen nicht, ob dieser oder ein anderer Zeitgenosse des Paläolithikums als erster versucht hat, die Idee in die Tat umzusetzen. Wir wissen aber, wie dieser Versuch endete. Der Urvater aller Flieger lag mit der Schnauze im Dreck.

Was dann passiert ist kann sich jeder ausmalen. Unser Aeronautiker schlich sich an einen Storch heran und zog dem Vogel seinen Faustkeil über den Scheitel. Dem Geheimnis des Fliegens kam er damit keinen Millimeter näher. Ein toter Vogel kann so wenig fliegen wie ein toter Hund laufen kann.

Wie immer, wenn irgendwas den Leuten unerklärlich ist, kamen Gurus und Schamanen. Sie taten so, als wüssten sie alles, banden sich Federwisch ins Kreuz, hüpfen auf dem rechten Fuß linksrum ums Lagerfeuer und murmelten Akrakadabra. Jeder, der danach nicht kapiert hatte, wie das mit dem Fliegen in Gang zu bringen ist, war selber schuld. Wenigstens behaupteten die Gurus das.

Der Zustand war für alle Piloten denkbar unbefriedigend, dennoch hielt er lange an. Der Mensch erfand Ackerbau und Viehzucht, baute Pyramiden und konstruierte das erste Rad. Das Fliegen blieb im Reich der Fabeln und Mythen. Pythagoras erkannte seinen Lehrsatz und Euler bewies mit der Infinitesimalrechnung, dass der Verstand des Menschen die Unendlichkeit bezwingen kann. Nur mit dem Fliegen haperte es, da kamen die Leute nicht über die Goldengel in den Barockkirchen hinaus. Selbst einem Leonardo da Vinci blieb die Lösung versagt, er resignierte mit der Prophezeiung "Es wird seinen ersten Flug nehmen der große Vogel vom Rücken des Hügels aus, das Universum mit Verblüffung, alle Schriften mit seinem Ruhm füllend".

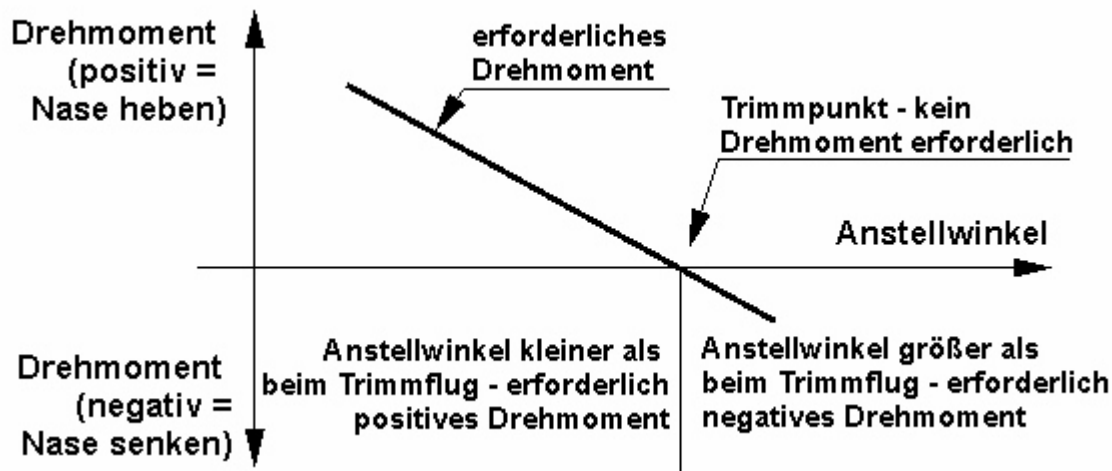
Vorerst hüpfen nur die Gurus weiter.

## Die Erfindung der Fliegerei

Erst Ende des 19. Jahrhunderts betrat der Held die Weltbühne, der mit der Kraft seines Verstandes das Rätsel der Fliegerei lösen sollte. Kein Hollywoodschreiber könnte die Geschichte phantastischer erfinden als sie tatsächlich geschehen ist. Unser Siegfried hieß Otto.

Otto Lilienthal erkannte, dass Flugzeuge in der Luft "umfallen" können. Kippen sie nach vorne, werden sie

sehr schnell sehr schnell. Kippen sie nach hinten, reißt die Strömung ab und das Ding fliegt nicht mehr. Grundlage der Fliegekunst ist die Stabilität, schloss er richtig. Wenn das Flugzeug nach vorne kippt (der Anstellwinkel wird kleiner und die Fluggeschwindigkeit wird höher) muss eine aufrichtendes Drehmoment her. Je weiter das Gerät umgekippt ist, desto stärker sollte das aufrichtende Moment sein. Kippt der Gleiter nach hinten, muss das gleiche geschehen, aber jetzt sollte das Drehmoment die Nase nach unten drücken. Graphisch aufgezeichnet ist dieser Zusammenhang in nachstehender Skizze.

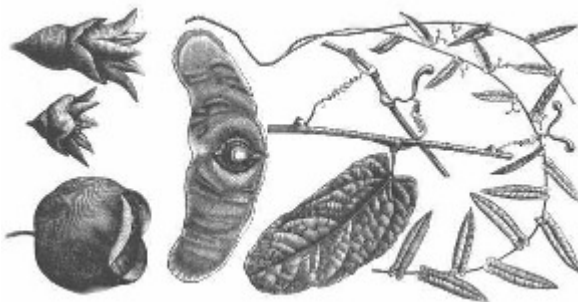


Mathematiker bezeichnen eine Schräglage, wie sie die fürs Fliegen erforderliche Drehmomentlinie aufweist, als "negative Steigung". So eine negative Steigung der Momentenkurve ist für's Fliegen recht positiv. Fluggeräte mit solchen Eigenschaften sind "statisch stabil".

Vögel bringen das richtige Drehmoment durch ständige Korrekturbewegungen mit ihren Muskeln und Federn zustande. Das funktioniert nicht mehr, sobald der Vogel tot ist. Deshalb kann ein toter Vogel nicht fliegen.

Für die Entwicklung der erforderlichen Nerven und Reflexe hat die Evolution einige Millionen Jahre gebraucht. Solange wollte Otto nicht warten, er erfand das Höhenleitwerk. In der Natur gibt es hierfür (soweit ich weiß) nur ein Vorbild, den Samen der Zanoniapflanze. Lilienthal hätte dieses Muster nachbauen können, aber er wusste nichts von Zanonias. Die kürbisähnliche Pflanze wächst in Java und Lilienthal lebte in Berlin. Zuweilen ist Mutter Natur ganz schön hinterfotzig 1).

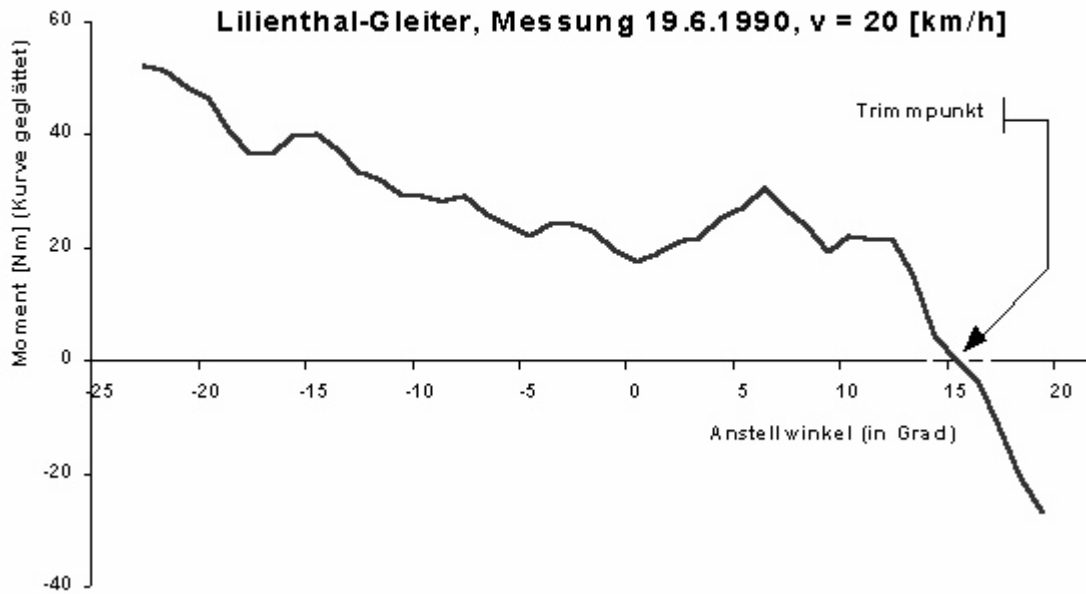
(Wie auf allen unseren Seiten lassen sich die Bilder durch Anklicken vergrößern)



Mit dem Einbau des Höhenleitwerks hatten die Gleiter von Otto eine Momentenkurve mit negativer Steigung, die Dinge flogen. Der große Vogel nahm vom Rücken des Hügels seinen ersten Flug. Na endlich, nach tausenden von Jahren voller Fehlschläge war es ja wirklich an der Zeit.

Die Gurus und Propheten verkündigten, sie hätten es ja schon immer gewusst und außerdem sei Lilienthal letztlich sogar abgestürzt.

Ich hatte 1990 das Glück, an einem Nachbau des "Lilienthalschen Normalflugapparates" eine flugmechanische Messung durchführen zu können. Da stand auf dem Schreiber im DHV-Testfahrzeug plötzlich die erste "richtige" Momentenkurve der Menschheitsgeschichte. Mir war ganz feierlich zumute. Wenige Sekunden später zerbrach eine Böe das teure Museumsstück. Die Sache war schlagartig nicht mehr feierlich, sondern peinlich.



Lilienthals wird seit seiner genialen Pioniertat von allen Flugzeugbauern kopiert. Von den Gebrüdern Wright bis zum Tornado wurde die negative Steigung der Momentenkurve zum Evangelium der Flugzeugbauer 2).

Solange, bis die Drachenflieger anrückten.

## Statische Längsstabilität und die Drachenflieger

In den 70er Jahren tauchten die ersten Drachenflieger auf. Sie kümmerten sich nicht um Stabilität oder Drehmoment, die Drachen flogen, Fliegen macht Spaß und nur das zählte.

Manchmal flogen die Dinger allerdings ganz anders, als wir das wollten. Die Biester jagten mit einem Flugbahnwinkel von  $45^\circ$  und einer Geschwindigkeit von über 100 km/h zur Erdoberfläche. Für den Piloten war der Aufschlag gewöhnlich tödlich. Bei dem rasanten Sturzflug flatterte das Segel fürchterlich, daher bekam der ungemütliche Zustand den Namen Flattersturz.

Ich war in mehrfacher Hinsicht betroffen. Tief betroffen war ich, weil ich mehrere Freunde verlor. Spätestens als ich bei einem Flug vom Wallberg in wenigen Sekunden einige hundert Höhenmeter weggebuttert hatte war mir klar, dass ich auch recht existentiell betroffen war. Das infernalisch knatternde Segel trieb im ganzen Tal die Menschen aus den Häusern.

Wie immer, wenn irgendwas den Leuten unerklärlich ist, kamen Gurus und Schamanen. Sie taten so, als wüssten sie alles, klemmten sich die Feder nicht mehr ins Kreuz, sondern zwischen die Finger und schrieben über den Flattersturz. Die zuweilen recht verworrenen Theorien standen mit der gleichen Regelmäßigkeit im Drachenfliegermagazin wie Robert Lembke mit "Was bin ich" im Fernsehen.

Hei, was wurde (und wird) da aller ausgetüfelt. Abwurfversuch und T-Punkt, Druckpunktwanderung und "negativer Reflex" im Kielrohr, Deflexor und Körperverschiebungsdiagramm, Bremsfallschirme am Turm und "restricted areas" im Pitch-Diagramm wurden (und werden) erfunden. Ich reihte mich in die Schlange der Schamanen ein und forcierte den ziemlich sinnlosen Abwurfversuch.

Auf dem richtigen Weg war der exzellente Stuttgarter Drachenbauer Ali Schmid. Er entwickelte, zuerst auf eigene Initiative, später in Verbindung mit dem DHV, ein Testfahrzeug zur Messung der Drehmomentwerte. Es ist eine Ironie des Schicksals, dass er 1982 mit einem instabilen UL tödlich verunglückte. Drehmomentwerte messen war mit seinem Fahrzeug (in recht primitiver Form) möglich, es gab aber keine verbindlichen Grenzwerte, welche Geräte noch akzeptabel sind.

Der Physik war das ganze Theater sowieso ziemlich egal, die Drachen flatterten trotz Abwurfversuch und Körperverschiebungsdiagramm munter weiter.

Mitte 1988 beauftragte mich die Kommission des DHV mit einer Überarbeitung des etwas heruntergekommenen DHV-Testfahrzeuges, mit dem Einbau einer Echtzeitmessung und mit der Ausarbeitung von Vorschlägen für Pitch-Grenzwerte zur Gerätezulassung.

Die Überarbeitung des Testfahrzeuges und die Entwicklung der Echtzeitmessung <sup>3)</sup> war eine sehr umfangreiche und zeitaufwendige, aber interessante Konstruktions- und Programmierarbeit. Die Entwicklungen waren Anfang 1990 abgeschlossen.



Fies war die Sache mit den Grenzwerten. Nach einigen Tagen in der Bibliothek des Deutschen Museums war mir klar, an Lilienthals negativer Steigung der Momentenkurve führt kein Weg vorbei. Wer lesen kann ist eben schwer im Vorteil.

Aber da waren noch 3 zusätzliche Gemeinheiten in der

Flugmechanik der Hängegleiter.

- Hängegleiter sind flexibel.
- Sie haben aufgrund der Schwerkraftsteuerung einen variablen Schwerpunkt.
- Viele Hängegleiter fliegen flattersturzfrei, obwohl sie in gewissen Bereichen eine positive Steigung der Momentenkurve haben.

Für die Aufstellung von Grenzwerten war dies nicht gerade hilfreich.

## Die Flexibilität

Die richtige Antwort auf die Flexibilität hatte schon Ali Schmid gefunden. Wenn sich das Gerät bei verschiedener Geschwindigkeit unterschiedlich verbiegt, so muss die Momentenmessung eben bei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Früher wurden die Messungen immer nur bis 80 km/h gefahren. Für Drachen mit Spitzengeschwindigkeiten von über 80 km/h war das einfach zu wenig.

100 km/h mit rund 15 Quadratmeter Segel 6 Meter über dem Auto sind bei einer nur 800 m langen Piste nicht einfach zu erreichen und auch nicht ganz ungefährlich. Wir nahmen das flaue Gefühl im Magen in Kauf und gaben Gas. Nach einiger Zeit waren die 100 km/h Routine. Allerdings sind einige Hersteller, nachdem sie die erste "Hunderter" erlebt hatten, ausgestiegen und nie mehr mitgefahren.

## Zur Schwerpunktlage

Am meisten Brimborium gab (und gibt) es um die variable Schwerpunktlage. Dabei ist diese Sache ganz einfach.

Jeder Drachenpilot weiß, die Kisten fliegen am stabilsten, solange die Flossen an der Basis bleiben. Mit losgelassenem Bügel reagiert der Vogel auf jede Böe wie ein besoffener Dackel. Für den Bereich zwischen dem normalen Trimmflug und dem senkrechten Sturzflug lässt sich auch rechnerisch nachweisen, dass der losgelassene Steuerbügel stabilitätsmäßig der ungünstigste Fall ist. Dieser dümmste aller denkbaren Fälle kann in der Praxis auftreten. Er muss deshalb bei der Bewertung eines Drachens zur Grundlage genommen werden.

So übel dies ist, es hat auch eine gute Seite. Für den Spezialfall "frei hängender Pilot" ergeben sich (bei

positivem Anstellwinkel) recht simple Schwerpunktverhältnisse. Der Flugzustand ist zwar wackelig, aber bezüglich der statischen Längsstabilität viel unkomplizierter zu berechnen als ein mehr oder weniger elastisch mit dem Trapez verbundener Pilot.

## Fliegar trotz instabiler Pitchkurve

Herkömmliche Flugzeuge fliegen stabil, wenn eine negative Steigung der Pitch-Kurve vorliegt. Bei (im Flug erreichbaren) Anstellwinkelbereichen mit positiver Steigung haben die Dinger katastrophale Flugeigenschaften. Hängegleiter mit negative Steigung der Pitch-Kurve fliegen stabil – aber auch bei einem kleinen Stückchen mit der "falschen" positiven Steigung sind sie (unter bestimmten Voraussetzungen) noch ganz gut fliegar 4).

Die Pitch-Grenzwerte für Hängegleiter ergaben sich damit fast von selbst:

- Die Steigung der Momentenkurve sollte, wie bei jedem Flugzeug, negativ sein.
- In den Anstellwinkelbereichen, in denen dies nicht der Fall ist, braucht der Gleiter kräftige Reserven. Festgelegt wurden 50 Nm bei 40 km/h, 100 Nm bei 60 km/h, 150 Nm bei 80 km/h und 200 Nm bei 100 km/h.

Wohlgemerkt, diese Werte wurden nur bei den Anstellwinkeln gefordert, bei denen der Gleiter ohnehin "krank" ist. Als Segelflugzeug würde der Kübel trotz dieser Pitch-Reserven niemals eine Zulassung bekommen.

Mit der Einführung der Grenzwerte etwa 1990 trat etwas ein, was ich fast nicht zu hoffen gewagt hatte. Mit der üblen Flatterei war's mit einem Schlag vorbei.

Einige Hersteller kreischten fürchterlich über die angeblich zu hoch angesetzten Werte. Die wirklichen Profis unter den Drachenbauer haben sehr schnell erkannt, daß mit diesen Grenzdaten sichere Geräte mit hohem Leistungspotential konstruiert werden können. Sie haben mir bei der Durchsetzung der damals neuen Grenzwerte viel geholfen. An dieser Stelle ein herzliches Dankeschön an Jos Guggenmos, Bill Moyes, Thomas Pellici und all die anderen 5).

Inzwischen gibt es die sogenannten starren Flügel (maßgeblich entwickelt von Felix Rühle). Eine Ergänzung der alten flugmechanischen Forderungen könnte bei solchen Geräten erforderlich werden.



## Und was ist mit dem Tuck?

Jedes Fluggerät mit einer Schwerpunktlage weit unter dem sogenannten "Aerodynamic Centerpoint" neigt zu der Flugfigur, die wir beim Drachenfliegen als "Tuck" bezeichnen.

Auch die Zulassungsprüfungen für Hängegleiter können einen Tuck niemals völlig ausschließen. Sie können aber die Wahrscheinlichkeit eines Tucks auf ein vernünftiges Restrisiko reduzieren. Dies ist mit den 1990 eingeführten Grenzwerten geschehen.

Gerne würde ich mir die Reduzierung der Tuckwahrscheinlichkeit als geniale geistige Leistung anrechnen lassen. Ehrlich gesagt, die Versuchung ist groß über aerodynamische Dämpfung, polares Trägheitsmoment,

## Horizontwinkel, Steuerkraftdiagramm und Akrakadabra zu palavern.

Die Wahrheit ist einfacher. Mit den 1990 eingeführten Pitchforderungen hat sich die Tuckwahrscheinlichkeit auf ein erträgliches Maß reduziert weil – es ist mir ja recht peinlich, aber es ist wirklich so – weil wir Dussel hatten.

Vollständig habe ich den aerodynamischen Hintergrund des Tucks erst später begriffen – aber das ist eine andere Geschichte.

### Fußnoten

1 - Mit letzter Sicherheit läßt sich nicht beweisen, daß Lilienthal den Zanoniasamen nicht kannte. Zu seinen Lebzeiten befand sich ein Zanoniasamen im Archiv eines Berliner Museums, jedoch nicht in den Ausstellungsräumen. Lilienthal beschreibt in seinen Veröffentlichungen alle ihm bekannten Vorbilder der Natur immer sehr ausführlich. Den Zanoniasamen erwähnte er nie.

2 - Erst in den letzten Jahren tauchen vorsichtige Versuche auf, Flugzeuge teilweise oder ausschließlich mittels Elektronik zu stabilisieren.

3 - Im DHV-Sprachgebrauch war hierfür der Ausdruck "Direktauswertung" üblich.

4 - Alle Aerodynamiker, die diesen Satz lesen, werden mich für verrückt erklären. Ich wiederhole den Satz deshalb hier noch einmal unmissverständlich: schwerkraftgesteuerte Fluggeräte können auch dann stabil fliegen, wenn im erfliegbaren Bereich positives  $dM/d\alpha$  vorliegt. Jawohl, auch wenn ihr es nicht glaubt!

5 - Thomas hat als erster Anfängerdrachen gebaut, die den (angeblich für Anfängerdrachen unerfüllbaren) Pitchforderungen entsprach.

## Ergänzungen:

### Warum hier immer vom Drehmoment und nicht vom $cM$ die Rede ist

Normalerweise werden alle Kräfte und Moment auf die sogenannten Beiwerte umgerechnet. Kein Aerodynamiker spricht bei einem "normalen" Flugzeug von Auftrieb, Widerstand oder Moment, angegeben werden die Werte  $c_A$ ,  $c_W$  oder  $c_M$ . Der Vorteil der Beiwerte ist die problemlose Umrechnung von Meßwerten auf andere Tragflächengrößen und auf andere Geschwindigkeiten.

Leider klappt das beim Drachen nicht. Drachen sind weitgehend flexibel. Wird ein Hängegleiter mit einer anderen Geschwindigkeit vermessen oder wird er maßstäblich verkleinert, so ergeben sich andere Deformationen als bei der ursprünglichen Messung. Durch diese anderen Deformationen ergeben sich Änderungen bei den Kräften und Momenten, die nicht rechnerisch erfaßt werden können. Die Beiwerte  $c_A$ ,  $c_W$ ,  $c_M$  usw. sind damit für Hängegleiter sinnlos.

Sie klingen aber so schön kompetent und werden deshalb immer noch von vielen "Experten" verwendet.

### Warum schwerkraftgesteuerte Luftfahrzeuge im Gegensatz zu herkömmlichen Flugzeugen auch bei positiver Steigung der Momentenkurve (meistens) sicher fliegen können:

Eine stabiler Flugzustand ist auf der Momentenkurve gekennzeichnet durch einen Nulldurchgang bei negativer Steigung. Bei Hängegleitern hat die Kurve auf Grund der Flexibilität zwar häufig eine sogenannte "Fluttersturzstelle", es muss aber nicht zu einem zweiten Nulldurchgang der Kurve kommen.

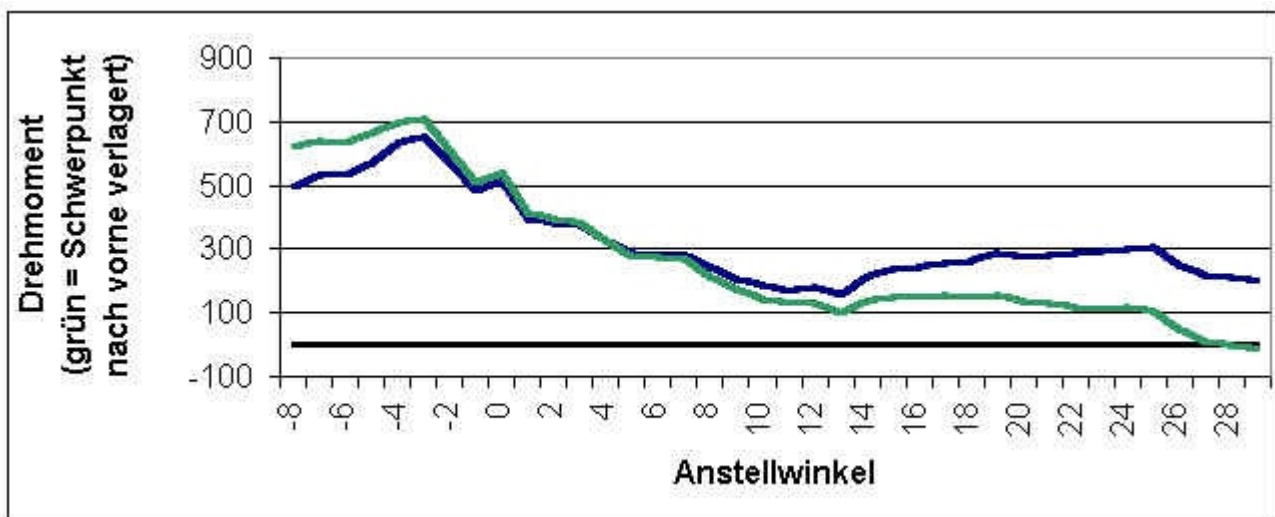
Die nachstehende Grafik zeigt das Nickmoment an einem Hängegleiter bei 60 km/h, gemessen auf dem DHV-Flugmechanik-Testfahrzeug. Es wurde absichtlich eine sehr "eckige" Messung ausgesucht (es war beim Messen recht bockig). Damit lassen sich im folgenden die einzelnen Punkte der Kurve gut verfolgen. Der Schwerpunkt ist bei der ersten Grafik so eingerechnet, als ob der Pilot den Bügel neutral hält, also weder drückt noch zieht. Deutlich ist bei etwa 12 Grad Anstellwinkel die "Fluttersturzstelle" erkennbar.





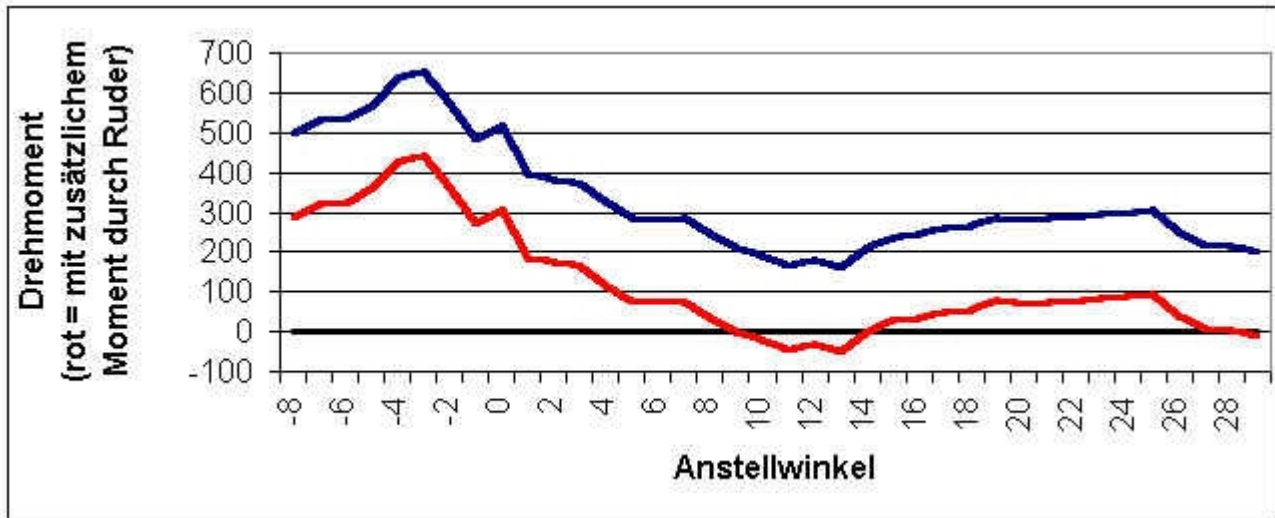
Wie es sich gehört ergibt sich bei jedem Anstellwinkel ein positives Drehmoment. Ohne Ziehen oder Drücken soll das Gerät mit seiner Trimmgeschwindigkeit fliegen und die ist geringer als die Meßgeschwindigkeit von 60 km/h. Der Vogel muß also hier bei jedem Anstellwinkel die Nase heben, um wieder zu seiner Trimmgeschwindigkeit zurückzufinden. Aus der Kurve ist ersichtlich, daß er das tut.

Im nächsten Diagramm ist die gleiche Kurve gezeichnet wie oben, aber zusätzlich wurde eine zweite Linie grün eingezeichnet. Diese zweite Linie entspricht dem Flugzustand "ziehen", also einem nach vorne verlagerten Schwerpunkt.



Dabei ist erkennbar, dass sich hier ein stabiler Flugzustand (bei etwa 28 Grad Anstellwinkel) ergibt. Die Kurve wurde durch die Schwerpunktverlagerung im wesentlichen nur gedreht (um einen Punkt bei ca. 4 Grad Anstellwinkel). Die "Beule nach unten", die die ursprüngliche Grafik bei etwa 12 Grad Anstellwinkel hat, führt nicht zu einem zweiten Schnittpunkt zwischen der Null-Linie und der Pitchkurve - es gibt keinen zweiten stabilen Flugzustand, obwohl die ursprüngliche Grafik im Bereich von etwa 12 bis 25 Grad Anstellwinkel eine positive Steigung aufweist.

Ganz anders sieht die Sache aus, wenn die gleiche Kurve durch ein Höhenruder zu einem Schnittpunkt mit der Null-Linie gebracht wird, also das gleiche Gerät durch ein Höhenruder gesteuert wird. Ein solches Höhenruder bewirkt (weitgehend) unabhängig vom Anstellwinkel ein konstantes Drehmoment. Eine solche konstante Drehmomentverschiebung ist in der nächsten Grafik aufgezeichnet.



Auch bei dieser Verschiebung der Pitchkurve durch ein Höhenruder ergibt sich bei etwa 28 Grad Anstellwinkel ein Schnittpunkt mit der Nulllinie. Bei einer Steuerung durch Höhenruder würde also hier genau wie bei der Schwerpunktverschiebung ein stabiler Flugzustand erreicht. Allerdings gibt es bei etwa 9 Grad Anstellwinkel einen zweiten Schnittpunkt mit negativer Steigung der Momentenkurve. Dies bedeutet einen zweiten stabilen Flugzustand. Dieser zweite stabile Flugzustand entspricht einem steilen Sturzflug und damit dem, was beim Drachenfliegen als Flattersturz bezeichnet wird.

Gottseidank gibt es solche Pitchkurven bei Segelflugzeugen nicht. Segelflugzeuge sind weitgehend steif gebaut. Eine "Beule" oder "Flattersturzdelte", wie sie in der gezeigten Messung im Anstellwinkelbereich von etwa 12 Grad auftritt, ist eine typische Erscheinung von flexiblen Tragflächen.

## Nochmal zu Lilienthal

1889 veröffentlichte Lilienthal sein Buch "Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst". In diesem Buch beschreibt er ausführlich die am Flügel auftretenden Kräfte. Der Begriff des Drehmomentes war ihm, der seinen Lebensunterhalt mit einer kleinen Maschinenfabrik zur Herstellung von Dampfmaschinen verdiente, mit Sicherheit bekannt. Trotzdem fehlt in dem Buch jeder Hinweis zum Drehmoment an Tragflächen.

1890 begann er mit dem Bau seiner Gleiter. Seine ersten Flüge führte er 1891 durch. Spätestens zu diesem Zeitpunkt hatte er das erforderliche Wissen über den "richtigen" Momentenverlauf. Eine mit "Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst" vergleichbare Zusammenfassung dieser Erkenntnisse hat er nie veröffentlicht. 1896 ist er tödlich abgestürzt.

Nahezu alle Lilienthal-Biographien lobpreisen seine Erkenntnisse zur gewölbten Fläche. So schlau war aber sicherlich schon unser steinzeitlicher Mochtgergnflieger. Die Wölbung der Fläche ist selbst an einer gebratenen Ente noch deutlich erkennbar. Otto baute das erste Serienflugzeug (den "Normalflugapparat"), er betrieb die erste Flugschule und exportierte als erster Fluggeräte ins Ausland. Mit seinen Erkenntnissen zur statischen Längsstabilität hat er das Fliegen erfunden. Er hat nur einen furchtbaren Fehler gemacht. Er hat es versäumt, dies lautstark zu verkünden.

[Startseite](#)

[Technik](#)

Ultraleichtflug Schmidtler, D 80801 München, Wilhelmstr. 14  
 Tel. 0049-(0)89-392817, Fax 0049-(0)89-390755  
 mail UL@schmidtler.de  
 Weitere Informationen über uns finden Sie  
 hier