

# Flugmechanik und Aerodynamik im Kunstflug

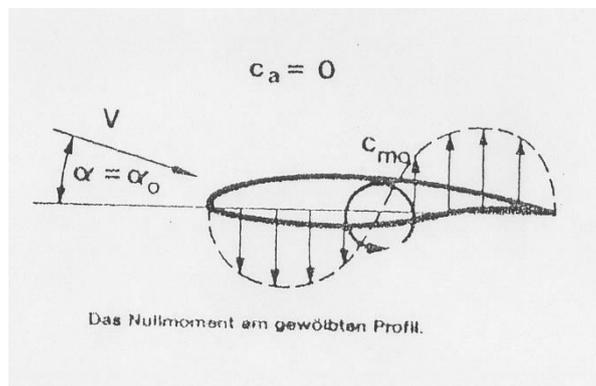
Im Kunstflug gehen wir regelmässig an die Grenzen des fliegerisch Möglichen heran. Um zu verstehen, was dabei am Flugzeug geschieht, ist es unumgänglich, sich mit den physikalischen Zusammenhängen in diesem Grenzbereich etwas näher zu befassen.

## 1 Schnellflug

Physikalische Grundlage des Segelkunstflugs ist die ständige Umsetzung von potenzieller Energie (Höhe) in kinetische Energie (Fahrt) und umgekehrt. Viele Kunstflugmanöver erfordern Eingangsgeschwindigkeiten weit oberhalb des normalen Geschwindigkeitsbereichs, bis nahe an die maximal zulässige Geschwindigkeit  $V_{NE}$ .

Was geschieht am Flugzeug bei Annäherung an die Höchstgeschwindigkeit?

Nahezu alle heute verwendeten Segelkunstflugzeuge haben unsymmetrische Flügelprofile. Wird beim unsymmetrischen Profil der Anstellwinkel in die Nähe des Nullauftriebs verkleinert, bildet sich unter der Flügelhinterkante eine starke Unterdruckblase und an der Obersei-



te verschiebt sich der Bereich des höchsten Auftriebs zur Flügelhinterkante.

Die offensichtliche Folge ist ein starkes Torsionsmoment, das den Flügel mit der Nase nach "unten" verdreht. Die Torsionsfestigkeit der Flügelstruktur im Schnellflug ist einer der Faktoren, welche die  $V_{NE}$  begrenzen.

Addieren sich nun beim Abfangen Biege und Torsionslasten am Flügel, wird die Festigkeitsgrenze früher erreicht. Kommt in diesem Fall ein Querruderausschlag hinzu, so wird der Flügel zusätzlich auf Torsion belastet. So erklärt sich die Faustregel, dass in der Nähe der Höchstgeschwindigkeit höchstens ein Drittel der maximalen Steuerausschläge zulässig ist.

Das weitaus grössere Risiko beim Schnellflug ist aber das Flattern. Durch Böen oder Steuerinputs können an der elastischen Flügelstruktur und den Querrudern Schwingungen angeregt werden. Unterhalb der Flattergrenze werden diese Schwingungen durch die Steifheit der Struktur gedämpft. Wird aber eine bestimmte Geschwindigkeit überschritten, ist die Energie gross genug, um eine ungedämpfte Schwingung anzufachen, deren Amplitude exponentiell ansteigt und die das Flugzeug innert Sekunden zerstören kann.

Der Konstrukteur eines Flugzeugs legt beim Entwurf eine Höchstgeschwindigkeit fest. In der geltenden Bauvorschrift für Segelflugzeuge, der EASA CS 22, heisst diese Geschwindigkeit "Design Speed" oder  $V_D$ . Im Flugversuch muss nachgewiesen werden, dass das Flugzeug bis zur  $V_D$  flatterfrei bleibt. Der Konstrukteur darf dann die zulässige Höchstgeschwindigkeit  $V_{NE}$  auf maximal 90% der  $V_D$  festlegen. Wer also glaubt, er habe bei der  $V_{NE}$  noch jede Menge Sicherheitsmarge, unterliegt einem möglicherweise fatalen Irrtum!

Flattern ist eine Funktion der korrigierten Eigengeschwindigkeit (EAS = Equivalent Airspeed) und nicht der angezeigten Geschwindigkeit (IAS). Weil mit der Höhe die IAS ab-

nimmt, ist in den meisten Flughandbüchern angegeben, bei welcher IAS in welcher Höhe die  $V_{NE}$  erreicht wird.

## 2. Langsamflug und Strömungsabriss

Jeder Flugschüler hat im Theorieunterricht gelernt und in der Schulung erlebt, was geschieht, wenn das Flugzeug an der Mindestgeschwindigkeit fliegt und die Mindestgeschwindigkeit unterschritten wird. In vielen Kunstflugmanövern gehen wir an die Mindestgeschwindigkeit heran oder unterschreiten sie. Im Kunstflug ist aber die Mindestgeschwindigkeit abhängig von der Querschleunigung im jeweiligen Manöver.

Um das Flugzeug in der Luft zu halten, muss der Auftrieb gleich dem Gewicht oder genauer der Masse mal der Beschleunigung sein. Der Auftrieb ist primär abhängig vom Auftriebsbeiwert und dem Quadrat der Fluggeschwindigkeit. Der Auftriebsbeiwert ist eine Funktion des Anstellwinkels und an einem bestimmten Flügelprofil reisst die Strömung immer ab, wenn der kritische Anstellwinkel überschritten wird, gleichgültig bei welcher Geschwindigkeit das geschieht.

Wird das Flugzeug in Richtung der Hochachse beschleunigt, ist das "Gewicht", welches durch den Auftrieb kompensiert werden muss um den Faktor der Beschleunigung grösser. Das heisst, bei +4G muss der Auftrieb viermal so gross sein wie im unbeschleunigten Geradeausflug. Dazu ist bei gleichem Auftriebsbeiwert eine doppelt so hohe Geschwindigkeit nötig. Fliegen wir am kritischen Anstellwinkel so ist die Geschwindigkeit bei der es zum Strömungsabriss kommt, doppelt so gross wie die Mindestgeschwindigkeit im unbeschleunigten Flug. Somit gehört zu jedem Beschleunigungswert eine Mindestgeschwindigkeit, bei welcher der kritische Anstellwinkel erreicht wird. Überschreiten wir die G-Limite für diese Geschwindigkeit, reisst die Strömung ab. Die Geschwindigkeit, bei der das sichere Lastvielfache des Flugzeugs gerade noch ohne Strömungsabriss erreicht wird, ist die Manövergeschwindigkeit  $V_A$ . Oberhalb der  $V_A$  kann ich keinen Strömungsabriss herbeiführen, ohne das Flugzeug zu überlasten.

Andererseits nimmt die Mindestgeschwindigkeit ab, wenn die Beschleunigung kleiner als 1 G wird, da ja das "Gewicht" des Flugzeugs kleiner wird. Im Extrem, bei +/- 0 G ist demnach auch die Mindestgeschwindigkeit 0 km/h!

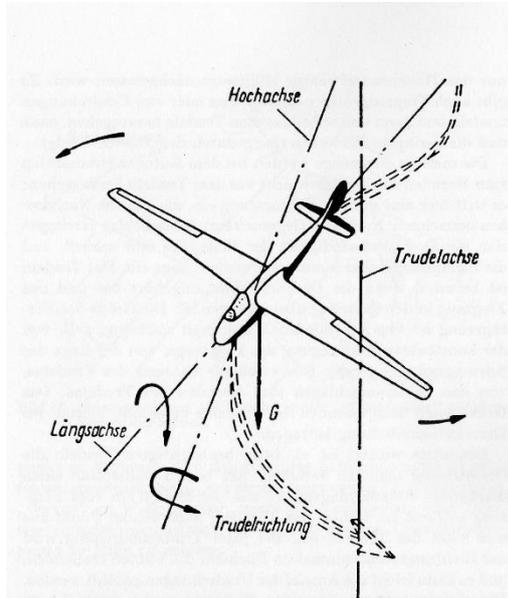
Jedes Flugzeugmuster zeigt ein anderes Verhalten beim Strömungsabriss. Das wird zum Einen bestimmt durch die Flügelgeometrie: Stark geschränkte Flügel z.B. ASK 21 haben generell keine Neigung, seitwärts abzukippen. Unterschiedliche Schwerpunktlagen können bei ein- und demselben Flugzeugtyp völlig unterschiedliches Verhalten beim Strömungsabriss zur Folge haben. Generell gilt: Je weiter rückwärts der Schwerpunkt, desto "kritischer" wird das Überziehverhalten. Weiterhin ist das Stall-Verhalten davon abhängig, wie rasch der Übergang vom Normalflug zum überzogenen Flugzustand erfolgt. Wird der Anstellwinkel allmählich bis zum kritischen Wert erhöht, gehen die meisten Flugzeuge einfach in den Sackflug. Wird dagegen rasch durchgezogen - "gerissen" - so bäumt sich das Flugzeug aufgrund seiner Massenträgheit auf und nimmt, je nach Eingangsgeschwindigkeit, einen hohen Anstellwinkel ein, aus dem praktisch immer ein Abkippen zur Seite erfolgt und, sofern der Pilot nichts dagegen tut, der Übergang ins Trudeln. Flügelschränkung und Form der Querruder bestimmen, ob die Querruderwirksamkeit beim Überziehen erhalten bleibt. Dies ist bei der ASK 21 aufgrund der starken Schränkung der Fall, beim Fox dank der speziellen Form der Querruder.

Genau so erfolgt der Strömungsabriss "negativ" wenn im Rückenflug der kritische Anstellwinkel überschritten wird. Bei einem unsymmetrischen Flügelprofil kann das Verhalten des Flugzeugs beim negativen Strömungsabriss völlig verschieden sein vom Strömungsabriss im Normalflug.

## 3. Abkippen, Autorotation und Trudeln

Ein Flugzeug kippt immer seitwärts ab, wenn beim Überziehen gleichzeitig ein Schiebeflug hinzukommt. Im Schiebeflug hat der "nachgezogene" Flügel einen grösseren effekti-

ven Anstellwinkel als der "Vorgeschobene" und deshalb reisst die Strömung am nachgezogenen Flügel zuerst ab. Das Flugzeug kippt zum nachgezogenen Flügel hin ab und da an diesem wegen der abgerissenen Strömung auch der Widerstand grösser ist, beginnt gleichzeitig eine Drehung um die Hochachse. Am äusseren Flügel, der beim Abkippen nach oben geht, wird der Anstellwinkel weiter verkleinert und die Strömung liegt dort - zumindest teilweise - weiterhin an. Durch die Widerstandsdifferenz zwischen Innen- und Aussenflügel wird die Rotation um die Hochachse weiter beschleunigt und sofern keine Reaktion des Piloten erfolgt, beginnt das Flugzeug zu trudeln.



Beim Trudeln (Vrille) beschreibt das Flugzeug eine Spiralbahn um eine vertikale Achse und rotiert dabei gleichzeitig um die Längs- und Hochachse. Die meisten modernen Segelflugzeuge pendeln während der ersten zwei bis drei Umgänge zusätzlich auch um die Querachse, wobei die Periode der Schwingung in etwa mit der Rotation um die Hochachse synchron ist. D.h. nach einem halben Umgang ist die Längsneigung am grössten und nach einem ganzen Umgang kann die Schnauze evtl. bis über den Horizont steigen. Nach etwa drei Umgängen klingen die Schwingungen um die Querachse ab und die Vrille wird, wie man sagt, stationär. Generell ist die Längsneigung des trudelnden Flugzeugs eine Funktion der Schwerpunktlage. Je weiter rückwärts, desto flacher trudelt das Flugzeug. Sollte der Schwerpunkt hinter der

rückwärtigen Grenze des zulässigen Bereichs liegen, kann das Flugzeug in ein nicht mehr beherrschbares Flachtrudeln gehen.

Wie sieht es mit der Ruderwirkung am trudelnden Flugzeug aus?

Das Höhenruder ist im Trudeln normalerweise voll gezogen und bei den meisten Flugzeugen ist die Strömung am Höhenleitwerk zumindest teilweise abgerissen. Generell kann mit dem Höhenruder die Längsneigung im Trudeln nur wenig beeinflusst werden. Demgegenüber bleibt das Seitenruder weitgehend wirksam und ist in jedem Fall das wichtigste Steuerorgan zum Ausleiten der Vrille.

Im Gegensatz zu den meisten Motorflugzeugen, bei denen in der Vrille die Strömung an beiden Flächen abgerissen ist, liegt bei Segelflugzeugen mit ihrer grösseren Spannweite und niedrigeren Flächenbelastung die Strömung am äusseren Teil des Aussenflügels meistens noch an. Das hat zur Folge, dass das trudeläussere Querruder noch wirksam ist. Da nun ein trudelndes Flugzeug auch ein Kreisel ist und den Kreiselgesetzen folgt, können Querruderausschläge sowohl beim Motor- als auch Segelflugzeug die Fluglage beeinflussen. Liegt die Strömung am äusseren Querruder an, wird durch einen drehsinnigen QR-Ausschlag der äussere Flügel angehoben. Nun kommt die Präzession ins Spiel. Die Präzessionskraft wirkt auf einen Kreisel in Drehrichtung um  $90^\circ$  versetzt. Das heisst, bei einem drehsinnigen QR-Ausschlag hebt die Präzession die Flugzeugschnauze an: Das Flugzeug trudelt flacher.

Beim Motorflugzeug ist es genau umgekehrt: Da an beiden Flügeln in der Regel die Strömung komplett abgerissen ist, wirkt bei QR-Ausschlägen nur die Widerstandsdifferenz zwischen aufwärts- und abwärtsgehendem Querruder. Wird das Querruder gegen die Drehrichtung ausgeschlagen, reduziert sich der Widerstand am äusseren, nach oben gehenden QR, während der Widerstand am inneren, nach unten gehenden QR grösser wird. Der Aussenflügel wird beschleunigt, der Innenflügel abgebremst und die Drehung wird schneller. Da der Flugzeugschwerpunkt vor der Drehachse liegt, wird er durch die

Fliehkraft angehoben; die Längsneigung ist eine Funktion der Winkelgeschwindigkeit. Wird also die Drehung schneller wird die Längsneigung flacher.

Im Gegensatz zum Flachtrudeln durch zu weit rückwärtige Schwerpunktlage ist dieses "dynamische" Flachtrudeln voll kontrolliert und kann durch Zurücknehmen der betreffenden Ruderausschläge jederzeit beendet werden. Der Trick mit dem drehsinnig ausgeschlagenen Querruder ist aber bei einigen Segelflugzeugen (z.B. Pilatus B4) die einzige Möglichkeit, das Flugzeug überhaupt in der Vrille zu halten. Wird beim B4 das Querruder auch nur ein wenig zurückgenommen, stoppt die Vrille sofort.

Für das korrekte Ausleiten einer Vrille ist in jedem Fall das im Flughandbuch beschriebene Verfahren massgeblich. Allgemein gilt, dass jedes lufttüchtige Segelflugzeug, bei richtiger Beladung mit dem im Flughandbuch angegebenen Verfahren problemlos aus der Vrille ausgeleitet werden kann.

Grundsätzlich wird als Erstes mit einem vollen Seitensteuerausschlag gegen die Drehrichtung die Rotation verlangsamt. Die auf den Schwerpunkt wirkende Fliehkraft nimmt ab und die Längsneigung wird steiler. Dadurch wird der Anstellwinkel an Flügel und Höhenleitwerk kleiner und das Höhenruder wird wieder wirksam. Bei fast allen Segelflugzeugen ist nach dem Gegenseitenruder eine kurze Pause vorgeschrieben, damit sich die verlangsamte Rotation auf die Längsneigung auswirken kann. Erst dann darf das gezogene Höhenruder nachgelassen oder je nach Flugzeugtyp gedrückt werden. Dadurch verkleinert sich der Anstellwinkel weiter und die Strömung kann sich an beiden Flächen wieder anlegen.

Trudelt ein Flugzeug flach, ist wie oben erläutert, die Drehgeschwindigkeit hoch und die Längsneigung  $< 45^\circ$ . Der Pilot hat den Eindruck, das Flugzeug rotiert nur noch um die Hochachse. Wegen der hohen Drehrate ist der Höhenverlust pro Umgang relativ klein. Zum Ausleiten von dynamischem Flachtrudeln wird zuerst das QR auf neutral zurückgenommen, worauf die Drehrate langsamer wird und sich die Längsneigung vergrössert. Mit vollem Gegenseitensteuer wird dann die Drehung weiter verlangsamt und das weitere Ausleitverfahren ist das selbe wie beim "normalen" Trudeln.

Es gibt aber auch Situationen, wo das Flugzeug selbständig aus der Vrille ausleitet, obwohl nach dem Einleiten Seiten- und Höhensteuer am Anschlag gehalten wurden. Dies kann z.B. durch übermässig kopflastige Schwerpunktlage verursacht sein. Mit den zum Einleiten der Vrille benutzten Steuerausschlägen wird das Flugzeug in eine Steilspirale übergehen, wobei Geschwindigkeit und Querbewegung kontinuierlich zunehmen.

Flugmechanisch ist die Steilspirale - auch Spiralsturz genannt - nichts anderes als eine Steilkurve mit übermässiger Längsneigung und wird genau so ausgeleitet wie jede Steilkurve. Das heisst Querlage neutralisieren und abfangen. Wegen der hohen Geschwindigkeit gibt es kein Querruder-Giermoment und Gegenseitensteuer ist überflüssig. Im Gegenteil, durch einen grossen Seitenruderausschlag bei hoher Geschwindigkeit, kann vor allem bei Flugzeugen mit T-Leitwerk die Rumpfröhre übermässig auf Torsion beansprucht werden.

#### Rückenvrillen:

Grundsätzlich kann jedes Segelflugzeug aus dem negativen Strömungsabriss in eine Rückenvrille gebracht werden. Erlaubt ist das allerdings nur, wenn das Manöver im Flughandbuch zugelassen ist.

Grundsätzlich wird die Rückenvrille aus dem Langsamflug auf dem Rücken mit vollem Seitensteuer gegen die gewünschte Drehrichtung und voll gestossenem Knüppel eingeleitet. Die meisten Segelflugzeuge drehen auf dem Rücken langsamer als in der Normalvrille und der Höhenverlust pro Umgang kann z.T. erheblich grösser sein. Ebenso ist bei den meisten Kunstflugzeugen die Längsneigung in der Rückenvrille sehr steil, so dass es dem Piloten auf den ersten Blick kaum auffällt, dass er sich in der Rückenlage befindet. Zumindest bei Swift und Fox kann aber auch mit Querruderausschlag gegen die Drehrichtung (wir sind ja im Rückenflug) eine Rücken-Flachvrille herbeigeführt werden.

Eines haben alle unsere Kunstflugsegler gemeinsam: Zum Ausleiten genügt es, alle Steuer auf neutral zu nehmen und die Rückenvrille stoppt praktisch sofort.

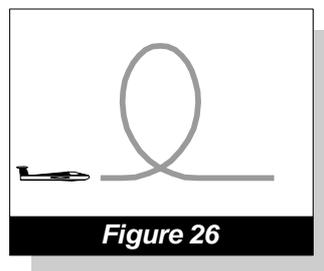
Wichtig ist es aber zu wissen, dass nahezu jedes Segelflugzeug auch aus dem Normalflug in eine Rückenvrille gebracht werden kann. Will man das absichtlich tun, leitet man zuerst eine Normalvrille ein und sobald das Flugzeug aus dem Normalflug abkippt, wird volles Gegenseitensteuer gegeben und gleichzeitig der Knüppel voll nach vorn gestossen. Betrachtet man diese Steuerausschläge, wird klar, warum in den meisten Flughandbüchern darauf hingewiesen wird, dass zum Ausleiten aus der Normalvrille das Höhensteuer nur nachgelassen oder wenig gestossen werden darf. Mit vollem Gegenseitenruder und voll gestossenem Knüppel können die meisten Segelflugzeuge übergangslos aus der Normal- in die Rückenvrille gehen. Nachdem ein unerfahrener Pilot kaum imstande ist, die Rückenvrille zu erkennen, liegt der Trugschluss nahe: Ich habe doch Gegenseitenruder und gestossen, warum leitet die Vrille denn nicht aus?

#### 4. Windeinfluss

Dieses Thema hat zwar nichts mit Flugmechanik zu tun, aber wie bei jeder Form der Fliegerei spielt auch im Kunstflug der Wind eine wichtige Rolle.

Der wettkampfmässige Kunstflug spielt sich in einer "Box" ab. Das heisst, wer es nicht schafft, in einem imaginären Würfel von 1 km Kantenlänge zu bleiben, kassiert Strafpunkte. Abhängig von der Windstärke wird jede Kunstflugfigur mehr oder weniger verzogen. Diesen Windeinfluss muss der Pilot nötigenfalls kompensieren, um einerseits die vorgeschriebene Geometrie der Figur beizubehalten und andererseits während des Programms in der Box zu bleiben.

Nehmen wir als einfachstes Beispiel den Loop: Unten im Ein- und Ausgang der Figur ist die Fahrt gross, oben im Scheitelpunkt ist die Geschwindigkeit gering. Der ideale Loop muss aber genau kreisförmig sein. Gegenwind hilft beim Einhalten der Kreisform. Da die meisten Piloten dazu neigen, den Loop-Bogen oben zu eng zu fliegen, schiebt der Gegenwind das Flugzeug im Scheitelpunkt des Loops etwas nach Lee und unterstützt so die Kreisform der Figur. Bei Rückenwind dagegen wird der Loop in der Länge zusammengeschoben und sieht dann so aus:



Um das zu kompensieren, muss der Pilot im Scheitelpunkt den Loop-Radius erweitern, indem er den Höhensteuerdruck bewusst nachlässt.

Senkrechte und 45° geneigte Linien werden grundsätzlich nicht windkompensiert. Die Punktrichter dürfen hier nur die Längsneigung des Flugzeugs bewerten und nicht die Flugbahn. Ebenso spielt der Windeinfluss bei Kurven und Kreisen keine Rolle für die Bewertung.

Um in der Box zu bleiben, muss der Pilot den Windeinfluss im Programm so berücksichtigen, dass er durch starken Gegenwind nicht nach Lee aus der Box geschoben wird und bei Seitenwind die Box nicht seitwärts verlässt. Bei Gegenwind muss nötigenfalls zwischen den Figuren bewusst nach Luv vorgezogen werden, um die nächste Rückenwind-Passagen an der Luv-Kante der Box zu beginnen.

Zur Kompensation von Seitenwind gibt es in einem gut konzipierten Programm eine Querpassage, die der Pilot in den Querwind fliegt, um seine Position zu korrigieren. Ist das nicht möglich, muss evtl. "gemogelt" werden: Damit ist gemeint, dass wir unseren Flugweg seitwärts versetzen, ohne dass es die Punktrichter merken.

Wie macht man das?

"Vorhalten" gegen den Seitenwind mit einem Luvwinkel wie beim Überlandflug geht offenbar nicht, weil dann ja eine Winkeldifferenz zwischen Flugzeuglängsachse und Boxachse erkennbar wäre. Wer aber gelernt hat, für ein Renversement "vorzuspannen" weiss, wie wir eine Glissade seitwärts fliegen können, ohne die Fläche hängen zu lassen oder mit der Flugzeuglängsachse von der Boxachse abzuweichen. Wenn wir uns ein kräftig "vorgespanntes" Renversement anschauen, sehen wir, wie stark das Flugzeug in der Senkrechten aufwärts seitlich versetzt wird. Also fliegen wir Renversements wo immer möglich gegen den Seitenwind. Aber auch bei den meisten anderen Figuren mit einem aufwärts-Loopbogen lässt sich diese Technik anwenden (aber natürlich nicht bei Männchen!) und so ohne sichtbare Winkelabweichung wirkungsvoll die Positionierung gegen den Seitenwind korrigieren.