

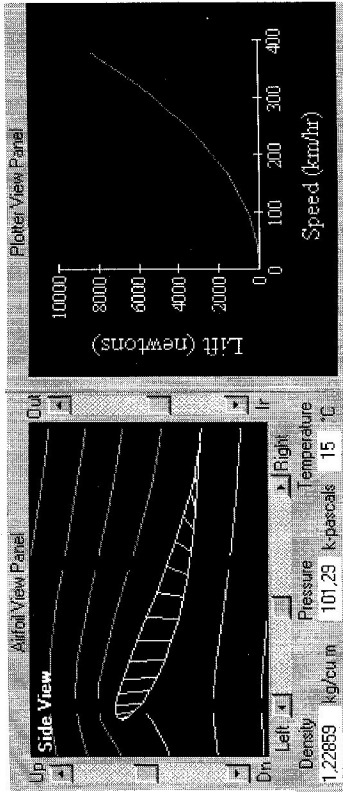
WALTER SCHILD

# **Fliegen am Limit**

SICHER FLIEGEN  
GEKONNT TRUDELN  
KUNSTFLUG  
FLIGHTREPORTS



AV T.O.P. MEDIA

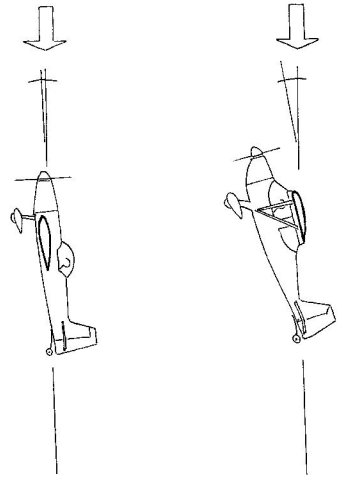


Auftrieb eines unsymmetrischen Flügels im Rückenflug

Drehen wir nun beide Flugzeuge auf den Rücken: Erwartungsgemäß ist der Auftrieb beim symmetrischen Profil in beiden Fluglagen gleich (dass es in der Praxis doch nicht so ist, davon später mehr). Um die nun nach unten gerichtete Auftriebskraft des unsymmetrischen gewölbten Flügels zu kompensieren, muss der Flügel auf rund 15 Grad angestellt werden (Knüppel nach vorn), damit der gleiche Auftrieb entsteht, wie bei einem positiven Anstellwinkel von 5 Grad.

Rückenflug ist also auch mit gewölbten Profilen möglich, sofern ein entsprechend großer Anstellwinkel eingenommen wird.

Der Rückenflug ist eine Frage des Anstellwinkels. Symmetrische Profile (oben) müssen weniger angestellt werden als unsymmetrische (unten)

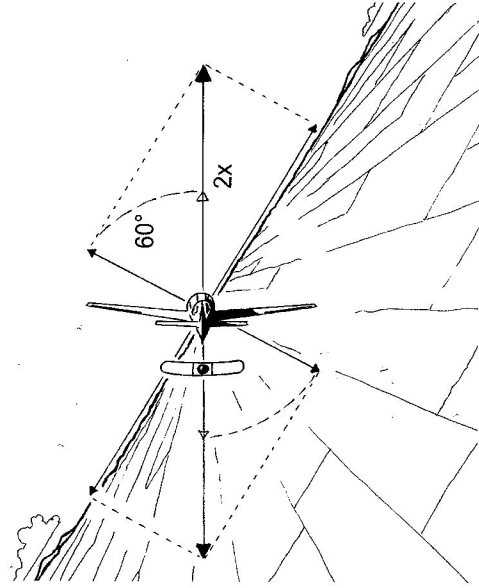


## Der beschleunigungs-bedingte Strömungsabriss

### Das Flugzeug im Kurvenflug

Der simple Kurvenflug ist eine Schlüsselfigur für gekonnten Kunstflug. Denn davon lassen sich viele Erkenntnisse ableiten, wie ein Flugzeug unter verschiedenen aerodynamischen Bedingungen reagieren wird. Kurvenflug bedeutet nicht Kurven mit 15 oder maximal 30 Grad Schräglage. Erst ab der Querlage von 60 Grad beginnt beispielsweise nach den amerikanischen Gesetzeskriterien und den CIVA-Regeln ein Kunstflug.

Betrachten wir also den Kurvenflug, genau genommen die horizontale Kurve ohne Höhengewinn und Höhenverlust, ein wenig näher.

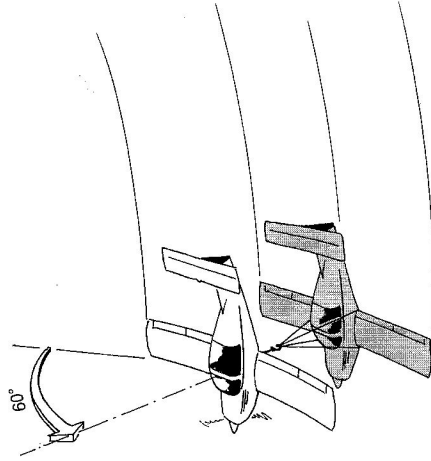


Beim Kurvenflug erhöht sich das Gewicht des Flugzeugs entsprechend der Querneigung.

Auf das Flugzeug wirken dabei die Beschleunigung die sich in zwei Kräfte zerlegen lässt: eine vertikale Komponente, die Masse unter dem Einfluss der

Erdbeschleunigung - das Gewicht - und eine horizontale Komponente, die Zentrifugalkraft

Beide Kräfte müssen durch entsprechende Auftriebskomponenten kompensiert werden, damit das Flugzeug im Horizontalflug bleibt. Dies macht der erfahrene Pilot automatisch: Er zieht am Höhenruder mit der Folge, dass die Flügel einen höheren Anstellwinkel bekommen und damit mehr Auftrieb produziert wird.



Bei 60 Grad Querneigung verdoppelt sich das Gewicht des Flugzeugs, es scheint ein zweites schleppen zu müssen. Die Flächenbelastung steigt und somit die Abreißgeschwindigkeit von beispielsweise 60 Knoten auf 85 kts.

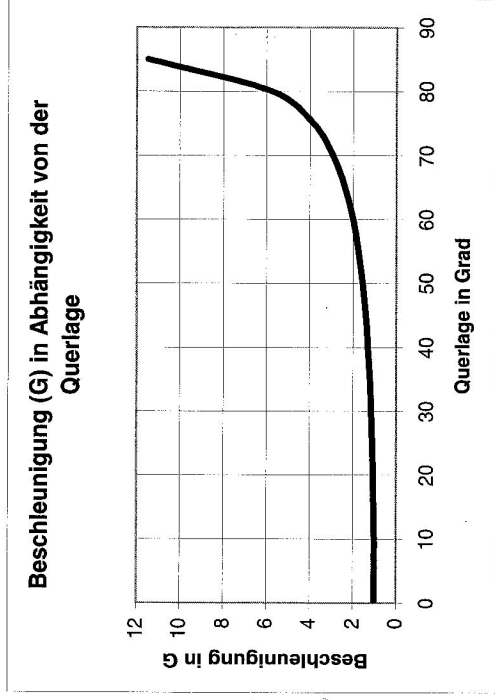
Die Addition beider Kräfte ergibt die Resultierende, also jene Beschleunigung, die Flugzeug und der darin sitzende Mensch spüren.

Solange die Querneigung gering ist, sind die resultierenden Kräfte ebenfalls klein. Bis 30° Neigung bleiben die Auswirkungen mit rund 15-prozentiger Erhöhung der Erdbeschleunigung weder für Mensch, noch für Maschine sonderlich bemerkenswert.

Selbst die für den Normalpiloten schon abenteuerlich wirkende 45° Querlage ist noch harmlos: Hier sind Zentrifugalkraft und Erdbeschleunigung gleich groß, die Resultierende ist - nach Pythagoras die Wurzel aus 2 also der 1,41-fache Wert der normalen Erdbeschleunigung. Aber nur 15 Grad weiter,

bei 60° Querneigung sind es schon 2 G und bei 80° kommen als Resultierende satte 5,75 G zusammen.

In der Praxis heißt dies, dass die Beschleunigungswerte bei hohen Querneigungen sehr stark nichtlinear ansteigen.



Ab rund 60 Grad Querlage steigt die Beschleunigung sehr schnell an.

Mit zunehmender Beschleunigung steigt aber auch die Abreißgeschwindigkeit der Luftströmung über dem Flügel. Also jener Punkt, an dem die laminare Strömung um den Flügel sich zu lösen beginnt und in turbulente Wirbel umschlägt. Auf die Stallspeed kommt es letztlich an: Dies ist nämlich genau der Punkt, an dem das Flugzeug Auftrieb verliert, also zu fliegen aufhört.

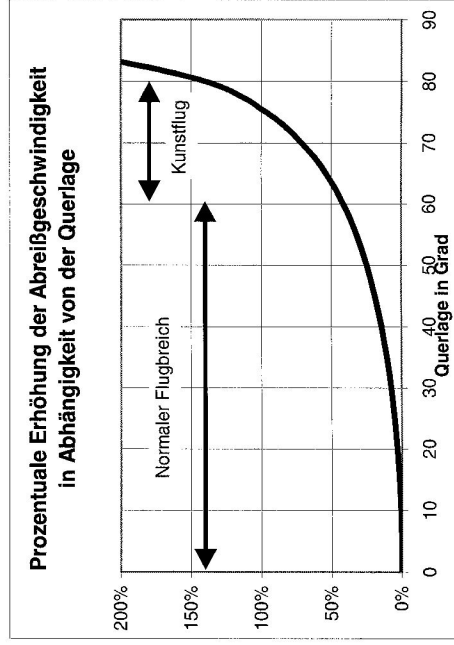
Die Stallspeed steigt proportional um den Faktor aus der Wurzel der Beschleunigung,

oder mathematisch ausgedrückt:  $V_s \approx \sqrt{G}$

Ein Beispiel: Angenommen die Stallspeed eines Flugzeugs ist 60 kts. Bei einem 60° Turn herrscht eine Gesamtbeschleunigung von 2 G. Die Wurzel aus 2 ist 1,41. Im 60° Kurvenflug steigt also die Stallspeed von 60 kts auf rund 85 kts!

Dass die Abreißgeschwindigkeit mit der Wurzel aus der Beschleunigung steigt, ist eher von akademischen Interesse. Ein Pilot fühlt die Beschleunigung mit seinem Allenwertesten. Er muss nur noch lernen, die Signale von seiner verlängerten Wirbelsäule in entsprechende Ruderausschläge umzusetzen, damit er das Flugzeug nicht überzieht. Das kann man aber nicht auf dem Papier erarbeiten, dazu sind viele Flugstunden nötig.

Es ist recht anschaulich den Zusammenhang zwischen der prozentualen Erhöhung der Stallspeed und der Beschleunigung in Diagrammform klar zu machen.



Das Diagramm zeigt die prozentuale Erhöhung der Stallspeed beim horizontalen Kurvenflug ohne Höhenverlust.

Je größer die Querlage (Kurvenflug), um so stärker steigt die Stallspeed. Probieren Sie einfach einmal in einem Kunstflugzeug enge Kurven zu fliegen, also Querlagen über 60 Grad einzunehmen: Sie werden überrascht sein, wie

oft die Stallwarnung pfeift, obwohl der Fahrmesser deutlich oberhalb der 100 kts Marke steht.

Solange genügend Luft unter den Flügeln ist, bleibt der Kurvenflug mit hoher Querlage harmlos, denn im Falle eines Falles bleibt genügend Zeit, das Flugzeug wieder unter Kontrolle zu bringen. Kritisch kann es aber im Endanflug werden. Beispielsweise, weil sich der Pilot beim Eindrehen ins Final verschätzt hat und er das Flugzeug „mit Gewalt“ auf den Richtigen Kurs biegt. Wer hier etwa unter Stress - weil man sich ja nicht vor den Zuschauern am Boden blamieren will - die Strömung abreißen lässt, hat wegen der geringen Höhe keine Chance mehr, das Flugzeug vor dem Bodenkontakt abzufangen! So trivial diese Erkenntnis, hat sie doch in der Vergangenheit einer Reihe von Piloten (darunter auch Kunstflugspezialisten) das Leben gekostet.

Merke:

Im Landeanflug keine abrupten Flugmanöver, die mit starken Veränderungen der Beschleunigung verbunden sind!

## Beschleunigung im Horizontalflug

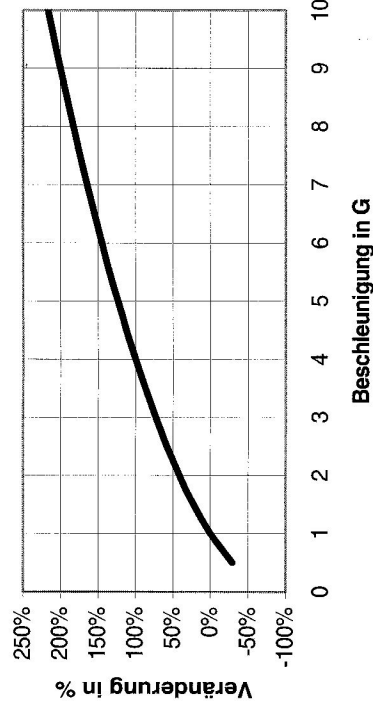
Auf die Beschleunigung kommt es also an. Sie tritt sowohl beim Kurvenflug auf, aber auch im Horizontalflug, wenn man beispielsweise das Flugzeug etwa aus dem Sturzflug abfängt. Die Erdbeschleunigung beträgt physikalisch gesehen  $9,81 \text{ m/s}^2$  oder 1 Kilopond. Das ist also die Kraft - bekannt als „Gewicht“ - mit der die Masse von 1 kg auf seine Unterlage wirkt. Ein Körper übt also im Ruhezustand die Kraft von 1 G (vom englischen „Gravity“=Erdbeschleunigung) aus.

Beschleunigungen gehören im Kunstflug zur täglichen Routine. Üblicherweise bewegt man sich in der Ausbildung bis maximal 5 G, in manchen Fällen werden es auch einmal 6 G sein. Das Diagramm zeigt, dass sich bei 4 G die Stallspeed verdoppelt. Von beispielsweise 60 kts also auf 120 kts! Bei den energiereichen Figuren der fortgeschrittenen Klassen wird man auch - das entsprechende Flugzeug vorausgesetzt - den G-Messer bei 9 G stehen sehen. Das heißt für die Praxis, dass die Abreißgeschwindigkeit bei 9 G um den Faktor 3 steigt. Statt 60 Knoten unseres Beispiels reißt die Strömung dann bei 180 Knoten ab, eine Geschwindigkeit die auch bei Kunstflugzeugen meist weit im gelben Bereich liegt.

Für die Praxis muss man sich also nur merken:

Der Strömungsabriss hat nichts mit der geflogenen Geschwindigkeit zu tun, sondern ist - neben dem Anstellwinkel - eine Funktion der auftretenden Beschleunigung.

## Prozentuale Veränderung der Abreißgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Beschleunigung



*Die Stallspeed ändert sich mit der anliegenden Beschleunigung. Schon bei 4 G hat sie sich verdoppelt, bei 9 G vervierfacht.*

Setzt man diesen Zusammenhang wieder in ein Diagramm, so erkennt man das unterschiedliche Verhalten des Strömungsabriss bei den verschiedenen Beschleunigungsbereichen. Im unteren Teil sind die Abhängigkeiten zwischen Beschleunigung und Strömungsabriss größer als im oberen Teil

Das Diagramm offenbart aber noch einen weiteren interessanten Aspekt: Nämlich den Bereich unterhalb 1 G, wenn man also weniger wiegt als normal. Beispielsweise im Scheitelpunkt eines sauber geflogenen Loops wird der Körper dank geringer Beschleunigungskräfte „leichter“. Aber nicht nur der Körper des Piloten, sondern das komplette Flugzeuggewicht. Auf die Flügel bezogen heißt dies, dass die Tragflächenbelastung (ausgedrückt in kg, die ein Quadratmeter zu tragen hat) geringer wird. Die Folge: die Luftströmung bleibt länger am Flügel anliegen; die Querruder funktionieren plötzlich noch in einem niedrigeren Geschwindigkeitsbereich, als man dies von der Normalfluglage her gewohnt ist. Das ist recht praktisch, wenn man im Scheitelpunkt Lagekorrekturen durchführen will. Der gleiche Effekt ist auch bei der „Lazy

Eight“ zu beobachten: Obwohl die Geschwindigkeit schon unter die Stallspeed gefallen ist, bleibt das Flugzeug im Scheitelpunkt der Flugkurve voll steuerbar!

Aus der Kurve lässt sich aber noch mehr ablesen: Bei kleinen Beschleunigungen genügen relativ geringe Änderungen, um die Stallspeed zu ändern. Zwischen einem und zwei G beträgt der Faktor 41%, zwischen fünf und sechs G aber nur 21%. Damit erklärt sich, dass ein Flugzeug im unteren Beschleunigungsbereich sofort unter Kontrolle kommt, wenn man den Knüppel etwa nur geringfügig nachlässt oder gar nachdrückt.

In der Praxis wird dieser Effekt beispielsweise beim Landeanflug bemerkbar: In dieser Phase sollten nur mehr geringe Ruderausschläge gemacht werden und somit bewegen sich die Beschleunigungswerte im Bereich um ein G. Positiv, wenn der Flugweg durch Ziehen am Höhenruder abgeflacht wird (etwa beim Abfangbogen kurz über der Landebahn), negativ, wenn mit dem Höhenruder nachgedrückt wird. Normalerweise wird man den Anflug durch das richtige Powersetting kontrollieren. In Kunstflugzeugen ohne geschwindigkeitsvermindernde Klappen fliegt man speziell bei kurzen Plätzen dabei stets am unteren Limit, denn selbst 500 Meter Landestrecke sind mit solchen Flugzeugen schnell zu Ende.

Es ist nicht selten, dass insbesondere im Short Final die Überziehwarnung ständig pfeift, um auf den geringen Abstand zum Strömungsabriss hinzuweisen. Besonders gefährlich sind in dieser Phase vertikale Böen, die durch Ablösungen kurz vor der Schwelle im Sommer oft zu beobachten sind. Die Kontrolle der Anfluggeschwindigkeit kann in diesem kritischen Geschwindigkeitsbereich nicht mehr durch Powersetting erfolgen, denn bis der Motor anspricht ist der Strömungsabriss längst da. Der richtige Reflex ist in diesem Fall Nachlassen des Höhenruders (bei leichter Trimmung nach vorn) oder gar Nachdrücken. Damit verringert sich der Anstellwinkel und die ins negative rutschende Beschleunigung verleiht die volle Kontrolle über das Flugzeug. Zwei Maßnahmen, die der Gesundheit dienen.

Aber auch der umgekehrte Fall gilt: Fliegt man das Flugzeug in einem steilen Winkel an und fängt es aus einer hohen Sinkrate ab, dann treten zwangsläufig höhere Beschleunigungskräfte auf. Solche Anflüge erfordern daher besondere Aufmerksamkeit des Piloten. Es kommt nicht selten vor, dass das Flugzeug kurz vor dem Aufsetzen abschmiert. Wenn es in „Ameisenkniehöhe“ abgefangen wurde, dann ächzt im besten Fall das Fahrwerk, wenige Zentimeter höher und die Energie reicht für kräftige Verformungen am Flugzeug aus.

Es ist daher eine gute Praxis, den Abfangbogen aus hohen Sinkgeschwindigkeiten mit einem Schuss Motorleistung zu kombinieren. Denn damit erhöht sich die Eigengeschwindigkeit und der Abstand zum beschleunigungsbedingten Strömungsabriss, der nun höher liegt, bleibt gewahrt. Abgesehen davon wird der Abfangbogen weicher, der Radius größer und damit die Beschleunigung geringer.

Kurz und gut:

Aus hohen Sinkraten behutsam abfangen!

Das Kapitel über den beschleunigungsbedingten Strömungsabriss ist länger ausgefallen, als er sonst in der Literatur dargestellt wird. Doch in seinem Verständnis liegt meiner Meinung nach der Schlüssel zum sauberen Kunstflug. Wenn man sich den Zusammenhang klar gemacht hat, wird man von den Strömungsabbrissen nicht mehr überrascht sein. Im Gegenteil, er ist Schlüssel für das Verständnis von Figuren, bei denen der (einseitige) Stall von Bedeutung ist.

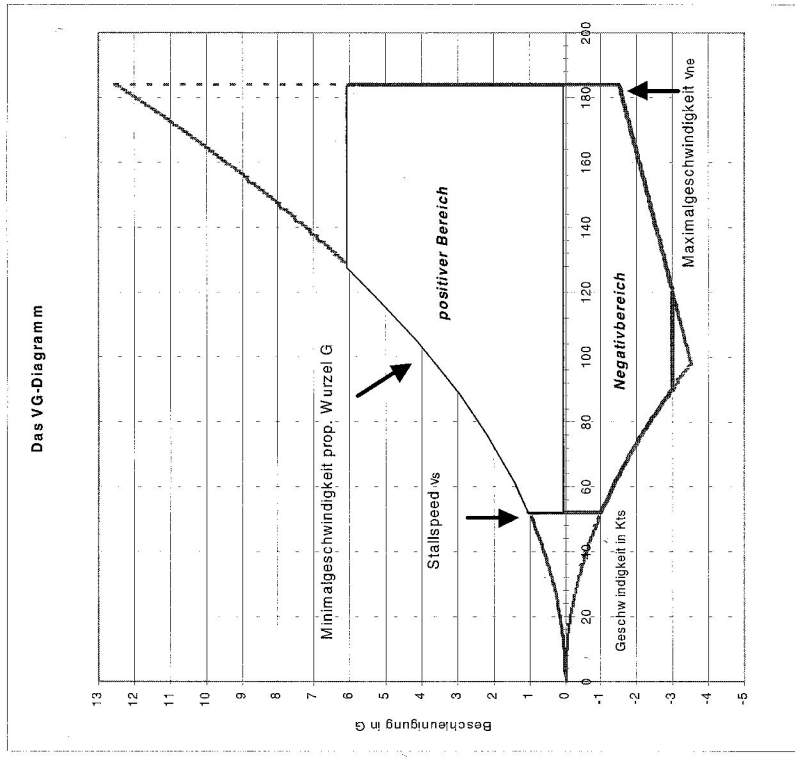
Beispielsweise bei der gerissenen Rolle. Man kann oft lange tüfteln, warum sie manchmal gelingt, manchmal daneben geht. Klar ist: Ein Flügel muss in den Stall. Dies erreicht man durch schiefes Anstellen des Flugzeugs. Anfänger haben oft die Schwierigkeit mit dem richtigen Timing. Wenn man aber weiß, dass die Beschleunigung eine wesentliche Rolle spielt wird klar: Ziehen am Höhenruder stellt nicht nur den Flügel an, sondern die damit

verbundene Beschleunigung verschiebt auch die Abreißgeschwindigkeit in höhere Geschwindigkeitsbereiche. Nun asymmetrischen Schub durch das Seitenruder herstellen und am nach hinten gehenden Trudeln Bewegung in Strömung ab; das Flugzeug rotiert mit einer perfekten Trudelnbewegung in horizontaler Flugrichtung. Das Timing von Anstellern und damit verbundener Beschleunigung erlaubt auch bei höheren Geschwindigkeiten perfekt mehrere gerissene Rollen am Stück.

Das Verständnis des beschleunigungsbedingten Stalls öffnet auch die Augen für das wichtigste Diagramm in Ihrem Flughandbuch: das VG-Diagramm.

## Das VG-Diagramm

Betrachten wir das VG-Diagramm etwas näher:



Das VG-Diagramm zeigt die aerodynamischen Grenzen des Flugzeugs auf. Nur innerhalb des dick umrandeten Bereichs fliegt ein Flugzeug. Dabei wird die Minimalgeschwindigkeit durch die Wurzel aus der Beschleunigung bestimmt; die maximale Geschwindigkeit legt der Konstrukteur fest.

Normalerweise ist im Flughandbuch lediglich der dick umrandete Teil des Diagramms abgebildet. Die gekrümmten Äste der Kurve kommen bekannt vor: Sie sind die unteren Grenzen im positiven wie im negativen Bereich, bei denen die Strömung abreißt. Der unterste Punkt bei 1 G ist die

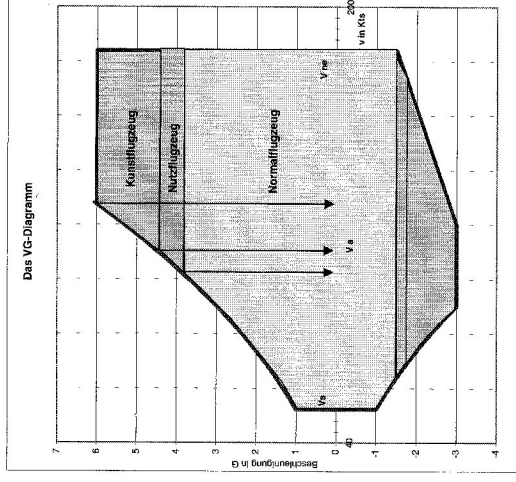
Minimalgeschwindigkeit (Stallspeed  $v_s$ ), bei der das Flugzeug gerade noch fliegt. Geht man nur geringfügig darunter, so bricht die Strömung aufgrund des hohen Anstellwinkels des Flügels zusammen.

Aus dem VG-Diagramm kann man auch ablesen, was beim Überschreiten der 6G-Grenze passiert: höhere Beschleunigungen sind nur mehr in hohen Geschwindigkeitsbereichen möglich, wobei der Bereich zwischen maximaler und minimaler Geschwindigkeit immer kleiner wird. Die Maximalgeschwindigkeit ( $v_{ne}$ ) wird durch den Konstrukteur vorgegeben. Wird sie überschritten, so kann Ruderflattern auftreten, das innerhalb kürzester Zeit die Steuerflächen abmontieren lässt. Die „never exceed speed“ ist auf dem Tacho mit einem roten Strich gekennzeichnet.

Ähnliches wie für den positiven Bereich, gilt auch für den negativen. Hier kann ein bestimmter maximaler Beschleunigungswert aufgrund der Flugzeugkonstruktion gar nicht überschritten werden. Bei vielen Kunstflugzeugen erkennt man auch eine reduzierte negative Belastbarkeit bei steigender Geschwindigkeit. Diese Begrenzung wurde den Konstrukteuren zugestanden und sollte beachtet werden. Die maximalen negativen Belastungen sind also nur in einem sehr engen Geschwindigkeitsbereich zulässig!

Die Festigkeit eines Flugzeugs ist durch das sogenannte Lastvielfache (entsprechen der G-Zahl) definiert. Je nachdem, in welche Kategorie es eingeordnet ist, gelten unterschiedlich hohe maximale positive und negative Lastvielfache.

Diese Lastvielfache wurden beispielsweise für Flugzeuge der Zulassungskategorie „Normalflugzeug“ als Faktor 3,8 für positive Manöver bestimmt. Die krumme Zahl kommt daher, weil man fordert dass eine vertikale Bö von 30 ft/s (rund 10 m/s) ohne Beschädigung an der Zelle durchfliegen werden kann. Für den Negativbereich sind  $-1,52$  G definiert.



Die zulässige Lastvielfache bestimmt, in welche Kategorie das Flugzeug eingeordnet wird. Normalflugzeuge sind bis 3,8 G belastbar, Nutzflugzeuge bis 4,4 G und Kunstflugzeuge bis 6 G

Da die damit verbundene vertikale Beschleunigung natürlich von der Geschwindigkeit abhängt, definiert dieser Wert ( $v_a$ ) auch gleichzeitig das Ende des grünen Geschwindigkeitsbereichs. Dahinter beginnt der Vorsichtsbereich, in dem bei Normalflugzeugen abrupte Ruderausschläge vermieden werden sollen. Bei Kunstflugzeugen sind die zulässigen Lastvielfachen höher, weshalb hier diese Begrenzung nicht gilt. Für die Kategorie „Nutzflugzeuge“ (Utility) gilt als positive Lastvielfache 4,4 G und 1,76 G für die negative Komponente. Die entsprechende  $v_a$  liegt daher entsprechend bei 4,4 G bzw. 6 G.

Solange die Geschwindigkeit unterhalb  $v_a$  bleibt, solange kann das Flugzeug selbst durch noch so heftige Ruderausschläge oder Böen Schaden nehmen. Die maximalen Beschleunigungswerte sind durch den oberen Kurvenzug gegeben. Eine Bö oder ein Ruderausschlag, der bei  $v_a$  ein Flugzeug der Kategorie Nutzflugzeuge auf mehr als 4,4 G beschleunigt ist bezüglich Überlastung wirkungslos, da die Strömung am Flügel abreißt. Anders wenn die Geschwindigkeit über der Manövergeschwindigkeit liegt. Dann steigen auch die Belastungen. Jeder Profi reduziert daher in böiger Luft die Geschwindigkeit auf die  $v_a$  des jeweiligen Flugzeugs. Interessant (und



nicht ganz erklärbar, außer von Marketingstrategen) ist die Tatsache, dass die Manövergeschwindigkeit in den Handbüchern oft höher angegeben ist, als sie laut VG-Diagramm sein dürften.

Bei einem Kunstflugzeug liegt die bei der Zulassung nachzuweisende Lastvielfache bei 6 G, also der sechsfachen Erdbeschleunigung. Bei einem Flugzeug mit 1000 kg schwerer Zelle, zerren dann also 6000 Kilopond an den Flügeln. Der negative Bereich ist mit  $-3$  G definiert.

Neben dieser nachzuweisenden Lastvielfachen (Limit Load Factor) haben die Konstrukteure natürlich Sicherheitsmargen in das Flugzeug eingebaut. Diese Sicherheitszuschläge sind je nach Einsatzzweck des Flugzeugs unterschiedlich.

In aller Regel sind Kunstflugzeuge mit dem Faktor 1,5 konstruiert. Ein Kunstflugzeug, das 6 G nachgewiesen hat, wurde also für 9 G (Ultimate Load Factor) gebaut. Allerdings sollte man sich hüten, die Designgrenze permanent zu überschreiten. Legende ist der Crash von Nil Williams in seiner Zlin Akrobat. Das Flugzeug war zwar voll akrotauglich, doch die ständige Überlastung der Zelle (Beobachter sprechen davon, dass 9 G keine Seitenheit waren) ließ den unteren Bolzen des linken Flügelbeschlags brechen. Die Folge war klar: der Flügel begann zum Erschrecken von Williams nach oben zu klappen der noch mit einem Reflex das Flugzeug auf den Rücken legen konnte und so den Flügel mit Getöse wieder in Normalposition zurückführte. Weil ohne Fallschirm, blieb nichts anderes übrig, als den Landeanflug in Rückenlage bis kurz vor den Boden und dann – Augenzeugen sprechen von einer Flügelspannweite – das Flugzeug umzudrehen. Das Foto in seinem Buch „Aerobatics“ ist der Beweis, dass es sich dabei um kein „Fliegerlatein“ handelt.

Beim anspruchsvollen Kunstflug kommt man allerdings nicht umhin, sich im Bereich der Lastvielfachen zwischen 6 und 9 G zu bewegen. Man muss sich allerdings im klaren sein, dass man sich außerhalb der Zulassungsgrenzen bewegt. Durch unzählige Manöver wurde nachgewiesen, dass beispielsweise

der Flügel der Pitts durchaus in der Lage ist, bis zu 9 G auszuhalten. Walter Extra beispielsweise hat den Holm seiner EA 300 auf Lastvielfache von 20 G ausgelegt. Das heißt, je nach Flugzeug wird man die geforderten 6 G weit überschreiten können, ohne dass Holm- oder Flügelbruch auftritt. Über die tatsächlichen Designgrenzen geben allerdings die Hersteller aus Haftungsfragen so gut wie nie Auskunft. Das einzige was sie interessiert ist die Zulassungs-Lastvielfache, die bei Kunstflugmaschinen bei 6 G liegt. Die Belastbarkeit des Flügels allein ist noch kein Kriterium, dass das Flugzeug sich nicht in der Luft zerlegt. Gerissene Rollen beispielsweise belasten die Knoten der Rumpfkonstruktion speziell dann, wenn sie mit zu hohen Geschwindigkeiten eingeleitet werden. Es ist daher kein Wunder, wenn häufig über gebrochene Verbindungsknoten berichtet wird.

Generell gilt, wer sein Flugzeug außerhalb der Designgrenzen betreibt, ist sein eigener Testpilot und riskiert Kopf und Kragen. Auch wenn die Überlast hundert mal klaglos weggesteckt wird; das einhundert und einte Mal kann genau ein Mal zuviel sein.