

ENTWURF! Das hier gezeigte Manuskript versucht, die Probleme des Windenschlepps ausführlich und leicht verständlich darzustellen. Dies soll die Sicherheit und den Wirkungsgrad des Windenschlepps erhöhen, insbesondere beim Einsatz moderner leistungsstarker Winden. Hoffentlich kann es auch helfen, die seit September 2009 geltenden Vorschriften zu verstehen. Sicher ist nicht jeder Fachmann mit allem einverstanden, was hier formuliert ist. Zudem wird mancher nicht überall verstehen, was gemeint ist. Ich bin für alle Vorschläge und konstruktive Kritik dankbar und unter r.eppler@gmx zu erreichen.

Richard Eppler

April 2012

Windenschlepp

Sicherheit und optimale Ausklinkhöhe

1 Einleitung

Der Windenschlepp ist nach wie vor die billigste Art, Segelflugzeuge in die Luft zu bringen. Jährlich werden in Deutschland ungefähr 700 000 Windenschlepps durchgeführt. Die Unfallquote ist erfreulich niedrig, aber nicht Null. Ganz klar, jeder Unfall ist einer zu viel. Besonders neue Arten von Winden, Elektrowinden, sehr starke Dieselwinden, die teilweise spezielle Regelungen haben, erfordern dringend, sich mit diesem Thema zu befassen. Dabei darf man ruhig auch daran denken, dass die neuen Winden höhere Schlepps ermöglichen, und wie man diese ohne Konzession an die Sicherheit erreicht. Diesen Problemen widmet sich der nachstehende Text. Jeder Segelflieger sollte sich damit beschäftigen. Vor allem Fluglehrer müssen ihn kennen.

Wir werden sehen dass wir den Vorgang des Windenschlepps nicht verstehen können, ohne die dabei wirkenden Kräfte zu kennen. Was wir über diese Kräfte wissen müssen ist nicht viel. Dies wird in den nächsten beiden Abschnitten kurz zusammengefasst. Wer das nicht verstehen kann oder will, der kann diese Abschnitte übergehen, er muss dann eben die hergeleiteten Ergebnisse glauben. Viele Leser werden die einfachen Grundlagen der Mechanik, die hier besprochen werden schon kennen. Auch sie sollten diese Abschnitte übergehen. Niemand soll unnötig gelangweilt werden.

Natürlich bilde ich mir keineswegs ein, ich wäre der Erste, der sich ausführlich theoretisch mit dem Windenschlepp beschäftigt. Ich habe selbst eine Menge aus Arbeiten meiner Vorgänger gelernt. Mancher davon mag vielleicht ein Zitat seiner Arbeit vermissen. Worauf es mir hier ankommt, ist eine möglichst einfache Darstellung und eine leichte Verständlichkeit, ohne falsche Vereinfachungen. Ich meine, ein Segelflieger versteht ein Kräftediagramm und ein Diagramm von Funktionen leichter als eine mathematische Formel. Man wird deshalb hier sehr wenige einfache Formeln finden, mehr Diagramme und viel Text, der hoffentlich die Denkweise der Segelflieger berücksichtigt. Ich habe ja selbst viel geflogen und vor allem mit meinen vielen Fliegerkameraden oft und offen diskutiert. Es bleibt zu hoffen, dass wir uns auch mit dem vorliegenden Text wieder gut verstehen.

2 Kräfte

Wir sind hier natürlich an Kräften interessiert, die auf unser Segelflugzeug und möglicherweise in ihm wirken. Wer je schon einmal ein Segelflugzeug berechnet hat, der weiss, dass man es dabei ständig mit Kräften zu tun hat, Auftrieb, Widerstand, Schwerkraft, Seilkräfte in allen möglichen Flugzuständen, Normalflug, Kunstflug, Böen, Windenschlepp und so weiter. Wenn wir den Windenschlepp verstehen wollen, dann tun wir gut daran, uns ein klein wenig mit Kräften allgemein vertraut zu machen.

Hier also das Wichtigste, was wir über Kräfte wissen sollten.

- A) Kräfte kann man nicht sehen. Man kann nur aus ihren Wirkungen auf sie schliessen.
- B) Kräfte wirken immer auf irgendwelche Dinge, Planeten, Meere, Steine, Menschen, Flugzeuge, man spricht allgemein von mechanischen Körpern.
- C) Jede Kraft hat eine GröÙe und eine Richtung. Ein Seil überträgt immer eine Kraft in der Richtung des Seils, Die Schwerkraft geht immer in Richtung Erdmittelpunkt.
- D) Zu jeder Kraft existiert eine gleich groÙe Gegenkraft in der entgegengesetzten Richtung. Die Sonne zieht die Erde an und lenkt sie in eine Bahn um die Sonne herum. Die Erde zieht die Sonne an und bewegt ihren Schwerpunkt, allerdings sehr wenig im Vergleich zur Erdbahn. Das Windenseil übt eine Kraft auf das geschleppte Segelflugzeug aus. Die gleiche Kraft in entgegengesetzter Richtung übt das Segelflugzeug auf das Seil aus.

Welche Wirkungen können Kräfte haben?

- a) Kräfte können eine Masse beschleunigen, es gilt allgemein

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$$

(Newtonsches Gesetz) Ein Stein, der nur der Erdanziehungskraft unterliegt, wird durch sie in Richtung Erdmittelpunkt beschleunigt, er fällt nach unten. Man kann nachmessen, dass er dabei eine Beschleunigung $g = 9,81 \text{ (m/sec)/sec} = 9,81 \text{ m/sec}^2$ erfährt. Die Krafteinheit 1 Newton (1 N) ist die Kraft, die eine Masse von 1 kg mit 1 m/sec^2 beschleunigt. Die alte Krafteinheit 1 kp (Kilopond) war das Gewicht, also die Erdanziehungskraft von einer Masse 1 kg. Sie beschleunigt aber die Masse 1 kg mit g . Allerdings ist dieses g von der lokalen Höhe abhängig. Man musste also für die Umrechnung eine spezielle Höhe auswählen, nämlich die von Paris, wo in der französischen Revolution die Einheiten des Kilogramms und des Meters geschaffen wurden. Dort ist g ungefähr 9.8065 m/sec^2 . Damit ist $1 \text{ kp} = 9.8065 \text{ N}$. Umgekehrt ist $1 \text{ N} = 0,10197 \text{ kp}$ oder $101,97 \text{ pond}$. Man setzt heute noch gerne näherungsweise $1 \text{ kp} \approx 10 \text{ N} = 1 \text{ DaN}$ (DekaNewton) weil man sich Erdanziehungskraft einer Masse 1 kg leichter vorstellen kann als die Kraft, die eine Masse 1 kg mit 1 m/sec^2 beschleunigt.

- b) Kräfte können einen nicht starren Körper verformen, zum Beispiel einen Flügel verbiegen. Dies kann man auch zur Herstellung von Waagen ausnützen. Eine Feder verlängert sich abhängig von der auf sie wirkenden Kraft. Wenn man an sie eine Masse anhängt, kann man aus der Dehnung der Feder auf die Gewichtskraft schliessen, mit der die Masse von der Erde angezogen wird. Heute benützt man in Waagen meistens sehr steife Stäbe deren winzig kleine Verlängerung sehr genau gemessen wird, meistens mit Dehnungsmeßstreifen.

- c) Kräfte können andere Kräfte hervorrufen. Wenn der obige Stein irgendwo auf dem Boden liegt, dann erfährt er immer noch eine Erdanziehungskraft $m \times g$. Aber diese Kraft bewirkt jetzt, dass noch eine zweite Kraft vom Boden auf den Stein wirkt, und zwar genau entgegen der Gewichtskraft. Da der Stein keine Beschleunigung erfährt, müssen sich die beiden Kräfte in ihrer Wirkung auf die Beschleunigung des Steins aufheben. Darüber wird noch mehr zu sprechen sein.

Nicht alle Kraftwirkungen kann der Mensch selbst fühlen. Beim Windenschlepp bemerkt der Pilot das Anschleppen sehr deutlich. Da wird sein Flugzeug und damit auch er mit 0,3 bis 0,7 g beschleunigt. Er fühlt sich im Cockpit nach hinten gedrückt. (In Wirklichkeit spürt er die Kraft, die vom Flugzeug auf ihn wirkt um ihn nach vorn zu beschleunigen) Im Steigflug hat er, wenn er sauber mit konstanter Fahrt fliegt, kaum mehr eine Beschleunigung. Das bedeutet aber keineswegs, dass keine Kräfte mehr auf sein Flugzeug wirken! Dies werden wir bald sorgfältig begründen. Dazu müssen wir noch kennenlernen wie man mit Kräften rechnen kann..

Wie besprochen hat eine Kraft immer eine Größe (sowasviel Newton) und wirkt in einer Richtung. Es gibt in der Mechanik viele Begriffe, die durch Größe und Richtung definiert sind, z.B. Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Verschiebungen. Man nennt solche Größen auch Vektoren. Man kann sie nur durch Pfeile zeichnerisch darstellen. Ihre Länge beschreibt dann die Größe oder den Betrag des Vektors und die Richtung des Pfeils ist diejenige des Vektors. Natürlich müssen längere Pfeile größere Beträge oder Kräfte darstellen als kürzere. Man benötigt also einen Längenmaßstab, zum Beispiel 10 mm entsprechen 100 N, oder 60 mm entsprechen dem Fluggewicht des betrachteten Segelflugzeugs. Mit solchen Pfeilen kann man für Vektoren geltende Gesetze graphisch darstellen.

Oft wirken auf ein Flugzeug oder einen anderen mechanischen Körpern mehrere Kräfte, wie zum Beispiel beim auf dem Boden liegenden Stein. Dann kann man die Wirkung aller Kräfte auf diesen Körper bekommen, indem man die Kraftvektoren zueinander addiert. Wenn dieser Körper in Ruhe ist und deshalb keine Beschleunigung hat, dann weiss man sogar allgemein, dass die auf ihn wirkenden Kräfte sich insgesamt aufheben müssen. Damit kann man Kräfte ausrechnen, die man nur schwer messen könnte.

Die Addition von zwei Vektoren kann man zeichnerisch durchführen. Man bezeichnet das der Spitze gegenüberliegende Ende des Vektors als seinen Anfang. Man bekommt die Summe der beiden Vektoren indem man den Anfang des zweiten Vektors an die Spitze des ersten Vektors setzt. Die Summe der beiden Vektoren ist dann ein Pfeil vom Anfang des ersten zur Spitze des zweiten Vektors. In Abb. 1 ist dies für die Vektoren A und B und ihre Summe C dargestellt. Ganz links im Bild sind die beiden Vektoren A und B getrennt gezeichnet. Rechts davon ist gezeichnet, wie B zu A addiert wird. Knapp rechts davon ist dargestellt wie A zu B addiert wird, nur um zu zeigen, dass natürlich das gleiche Ergebnis C herauskommt. Ganz rechts im Bild ist dann noch dargestellt, wie man die Summe zweier Vektoren meistens zeichnet. Man trägt beide Vektoren vom gleichen Punkt aus ab und zieht jeweils durch die Spitze des einen Vektors eine Linie parallel zum andern Vektor, in Abb. 1 gestrichelt gezeichnet. Dadurch entsteht ein Parallelogramm, dessen Diagonale zum Schnittpunkt der beiden gestrichelten Linien wieder den Summenvektor C ergibt. Diese Konstruktion entsteht, wenn man die beiden Figuren links davon so zusammenschiebt, dass die Ergebnisvektoren C zusammenfallen. Das funktioniert allerdings nicht, wenn die Vektoren A und B parallel sind. Mehrere Vektoren kann man addieren, indem man sie aneinander anschliesst, immer den Anfang des nächsten an die Spitze des vorangehenden Vektors. Die Summe dieser Vektoren ist dann ein Vektor vom Anfang des ersten Vektors zur Spitze des letzten. Die Reihenfolge der Vektoren ist beliebig, das Ergebnis ist unabhängig von der Reihenfolge. Wenn der unter solchen Kräften stehende

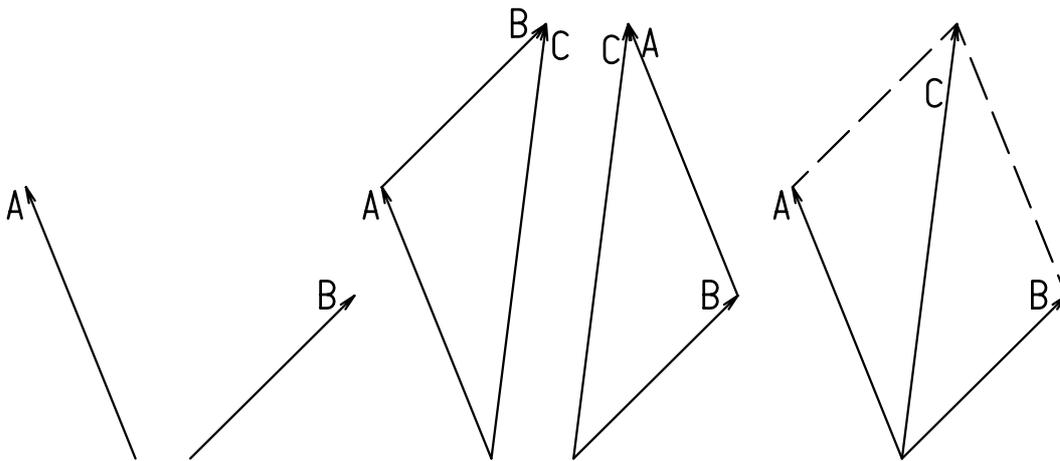


Abbildung 1: Addition von Vektoren bzw Kräfte

Körper keine Beschleunigung hat, müssen sich alle Kräfte insgesamt aufheben, die Spitze des letzten Vektors muss mit dem Anfang des ersten Vektore zusammenfallen, der Summenvektor muss die Länge Null haben. Wirken nur zwei Kräfte auf einen ruhenden Körper, dann müssen sie gleich groß sein und in entgegengesetzter Richtung wirken.

3 Beschleunigung

An eine Beschleunigung denkt man normalerweise wenn sich die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs, Flugzeugs, einer Kugel oder einer Rakete ändert. Dann ist die Beschleunigung eben Geschwindigkeitsänderung pro Zeit, zum Beispiel (m/sec)/sec, (km/h)/min. Nun haben wir oben das Newtonsche Gesetz $\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$ gesehen. Auf der linken Seite steht dabei eine Kraft, und wir haben behauptet dass sie immer eine Richtung hat, also ein Vektor ist. Bis jetzt sieht es aber so aus, als ob die Beschleunigung durch eine Zahl bestimmt ist, von einer Richtung war keine Rede. Diesen Fehler wollen wir sofort beheben.

Bei einer Geschwindigkeit können wir uns sofort vorstellen, dass sie nicht nur einen Betrag, sondern auch eine Richtung hat. Wenn wir aber vor und nach einer kurzen Zeit zwei Geschwindigkeitsvektoren vergleichen, dann ist der Unterschied wieder ein Vektor mit einer Richtung, und wenn wir ihn durch die zugehörige Zeit teilen bekommen wir den Beschleunigungsvektor.

Wenn ein Fahrzeug auf einer geraden Bahn fährt, hat sein Geschwindigkeitsvektor und damit jeder Beschleunigungsvektor immer die Richtung der Bahn. Dann ist es langweilig, von dieser Richtung zu reden, dann geht es nur um die Beträge der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren. Schon wenn der Wagen aber eine Kurve fährt, sieht das anders aus. Im Wagen spüren wir eine Kraft, die uns nach außen drückt, die Fliehkraft. Wenn wir es aber von außen sehen, drückt der Wagen uns in Innenrichtung der Kurve, es existiert also eine Beschleunigung in Richtung des Kurveninneren. Man nennt sie Zentripetalbeschleunigung. Sie kommt zu einer eventuellen Änderung des Geschwindigkeitsbetrags in der Fahrtrichtung dazu. Auch Richtungsänderungen führen zu Beschleunigungen, die Beschleunigung hat also tatsächlich immer eine Richtung, auch wenn wir uns bei gerader Bahn nicht darum kümmern müssen. Genau das gleiche gilt für die durch die Beschleunigung bedingte Kraft.

Beim Segelflugzeug können wir von der geraden Bahn nicht nur nach der Seite, sondern auch nach oben abweichen, zum Beispiel wenn wir einen Looping fliegen. Dabei sind erhebliche Kräfte vorhanden, die der Flügel aufbringen muss. Der Pilot bemerkt aus seiner Sicht eine Fliehkraft, die ihn nach unten in den Sitz drückt und die nur durch einen erhöhten Auftrieb ausgeglichen werden kann. Von aussen gesehen muss der Pilot durch eine Zentripetalkraft in die gekrümmte Bahn gedrückt werden. Auch diese Kraft kann nur durch einen erhöhten Auftrieb aufgebracht werden. In beiden Fällen wird der Flügel zusätzlich belastet, was zu einer deutlich sichtbaren Flügelbiegung führt. Nebenbei, wenn der Looping bei genügend hoher Geschwindigkeit eng genug herumgezogen wird, kann der Flügel auch brechen. Im Prinzip kann man oberhalb der sog. Manövergeschwindigkeit jedes Flugzeug zerbrechen. Dazu gehört allerdings schon einiger Todesmut. Trotzdem ist das schon vorgekommen. Im Windschlepp spielt die zusätzliche Belastung im Übergangsbogen zum Steigflug eine Rolle, die allerdings der Festigkeit des Flugzeugs nicht so leicht gefährlich wird, weil vorher die Sollbruchstelle reißt. Ein Überziehen kann dabei aber vorkommen, deshalb muss man diesen Übergangsbogen immer berücksichtigen, siehe Abschnitt 10.

4 Kräfte am geschleppten Segelflugzeug

Wir fangen mit einem einfachen Beispiel an, das jeder kennt. Segelflugzeuge können in ruhiger Luft nicht steigen. Sie haben dann eine Sinkgeschwindigkeit und eine Gleitzahl. Das gleichmäßige Gleiten (ohne Kurve) wird normalerweise dargestellt wie in Abb. 2, linkes Bild. Am Flugzeug entsteht eine Auftriebskraft A senkrecht zur Flugrichtung und eine Widerstandskraft W entgegen der Flugrichtung. Beide zusammen müssen das Gewicht G des Flugzeugs tragen. Alle Kräfte müssen sich gerade aufheben, denn es ist keine Beschleunigung vorhanden.

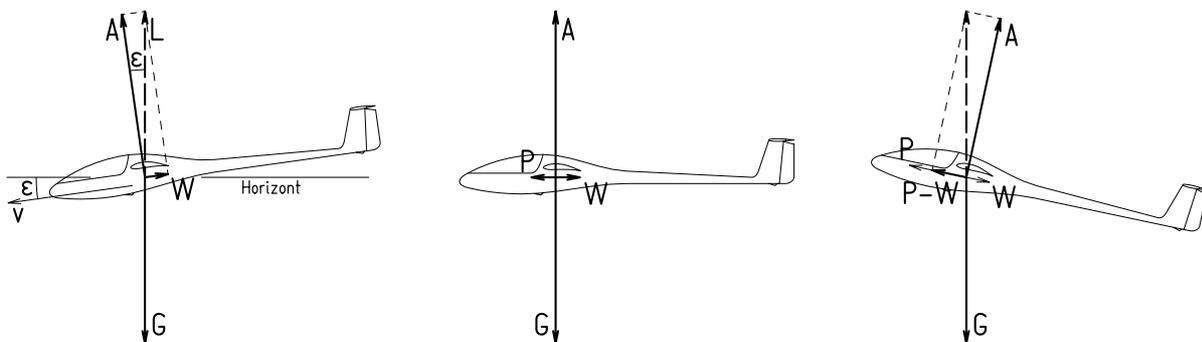


Abbildung 2: Kräfte auf ein Segelflugzeug stationären Geradeausflug

Schon in diesem einfachen Beispiel hat man es mit drei typischen Kräften zu tun. Der Auftrieb A wirkt genau senkrecht zur Flugrichtung, der Widerstand W entgegen der Flugrichtung. Beide zusammen ergeben die Luftkraft L . Sie muss genau entgegengesetzt zur Gewichtskraft G sein, damit sich alle drei Kräfte aufheben. Diese drei Kräfte A , W und G ergeben aneinander gereiht und addiert ein geschlossenes Dreieck, ihre Summe ist Null. Nebenbei, der Winkel zwischen Auftrieb und Luftkraft ist auch der Gleitwinkel und die Gleitzahl ist A/W .

Entsprechend kann man die beiden anderen Bilder in Abb. 2 sofort verstehen. Wenn ein Segelflugzeug in ruhiger Luft steigen soll benötigt es eine weitere Kraft, zum Beispiel in seiner Flugrichtung, durch ein Seil zu einem vor ihm fliegende Motorflugzeug oder einen Propeller,

den es ausfahren kann. Wenn diese Kraft P gleich groß ist wie der Widerstand, entsteht das mittlere Bild. Hier hat man vier Kräfte, die in der Reihenfolge A, W, G, P aneinandergereiht und damit addiert ein geschlossenes Rechteck ergeben. Der Auftrieb muss dann genau so groß sein wie das Fluggewicht, und die Flugrichtung ist waagrecht, es muss dann zwar nicht mehr sinken, kann aber noch nicht steigen. Erst wenn die Kraft P größer ist als der Widerstand, kann es steigen, wie dies im rechten Bild von Abb. 2 gezeigt ist. Hier klappt die Addition von P und W nicht mehr mit dem Parallelogramm, die vier Kräfte in der Reihenfolge A, G, P, W aneinandergereiht ergeben wieder ein geschlossenes Viereck, das allerdings aussieht wie ein Dreieck mit einem kleinen Zipfel.

Man kann durch die Betrachtung der Kräfte an einem Flugzeug auf einfache Art eine Menge davon verstehen, wie das Flugzeug belastet wird, und welche Bewegungen welche Kräfte benötigen. Die bisherigen Beispiele waren recht einfach. Kaum schwieriger ist das beim Windenschlepp, aber wesentlich interessanter. Hier wird wieder ein Seil am Flugzeug eingehängt, das eine Kraft S auf das Flugzeug ausübt. Nur wirkt diese Seilkraft nicht mehr in Flugrichtung, die auch die Richtung der Geschwindigkeit v ist. Um nun Aussagen über die Kräfte zu bekommen, fassen wir Auftrieb A und Widerstand W zur einer Luftkraft L zusammen. Sie ist fast gleich groß wie der Auftrieb, nur ist die Flugrichtung nicht senkrecht zu L , sondern zusätzlich um den Gleitwinkel ϵ nach unten geneigt, wie dies schon im linken Bild von Abb. 2 der Fall ist. Als Gleitwinkel ist durchweg 2° benützt, was einer Gleitzahl von 27 entspricht. Andere Gleitwinkel ändern nichts an den grundlegenden Ergebnissen.

Zunächst stellen wir uns vor, das Segelflugzeug ist im Steigflug und will so steigen, dass seine Fahrtmesseranzeige konstant ist, also seine Fluggeschwindigkeit sich nicht ändert. Die Richtungsänderung ist in dieser Phase des Schleppts so klein, dass man sie vernachlässigen kann. Damit ist keine Beschleunigung da, die Kräfte am Flugzeug müssen sich aufheben. Den Steigwinkel und damit die Richtung der Luftkraft kann der Pilot mit dem Höhenruder steuern. Man muss also immer mehrere Steigwinkel auswerten. Die Richtung der Seilkraft S ist ungefähr durch die Verbindungslinie vom Flugzeug zur Winde gegeben. Genauer bezeichnen wir als Seilwinkel den Winkel, den das Seil direkt am Flugzeug mit der Horizontalen bildet. Bei Stahlseilen ist ein erheblicher Durchhang vorhanden. Der Seilwinkel ist dann größer als ohne Durchhang. Das stört die Überlegungen nicht. Die Gewichtskraft ist immer senkrecht nach unten gerichtet. Ihre Größe ist immer das Fluggewicht des geschleppten Flugzeugs. Die Größen von Luftkraft L und Seilkraft S kennt man zunächst nicht, nur ihre Richtungen. Die beiden müssen aber zusammen genau die Gewichtskraft G aufheben. Die Summe aus S und L muss also senkrecht nach oben gehen und genau die Größe der Gewichtskraft haben. Das heisst, man kennt in dem Kräfte-Parallelogramm, das L und S bilden, die Diagonale und die Richtung der Kanten. Damit kann man dieses Parallelogramm und damit die Längen von L und S zeichnen. Diese Konstruktion ist in Abb. 3 für eine Anzahl von Seilwinkeln und Steigwinkeln gezeigt.

In der oberen Reihe dieser Bilder ist der Seilwinkel jeweils 10° . Er wird schon in einer relativ geringen Höhe erreicht, grob 10 Prozent der gesamten Seillänge, bei Stahlseilen weniger. Wenn in dieser Höhe schon ein Steigflug mit konstanter Fluggeschwindigkeit erfolgen soll, dann hängt die erforderliche Seilkraft stark vom Steigwinkel ab. Bei einem mässigen Steigwinkel von 30° ist die Seilkraft wesentlich kleiner als das Fluggewicht (der entsprechende Kraftpfeil ist wesentlich kürzer als derjenige der Gewichtskraft). Bei einem Steigwinkel von 40° ist die Seilkraft schon fast so groß wie die Gewichtskraft, bei 50° ist sie schon wesentlich größer! Genau die gleiche Tendenz kann man in der mittleren Zeile der Bilder erkennen, wo der Seilwinkel jeweils 30° ist. Allerdings reichen hier schon jeweils 5° mehr Steigwinkel aus für die kräftige Erhöhung der Seilkraft. In der unteren Reihe der Bilder ist der Seilwinkel jeweils 50° , was im letzten Drittel

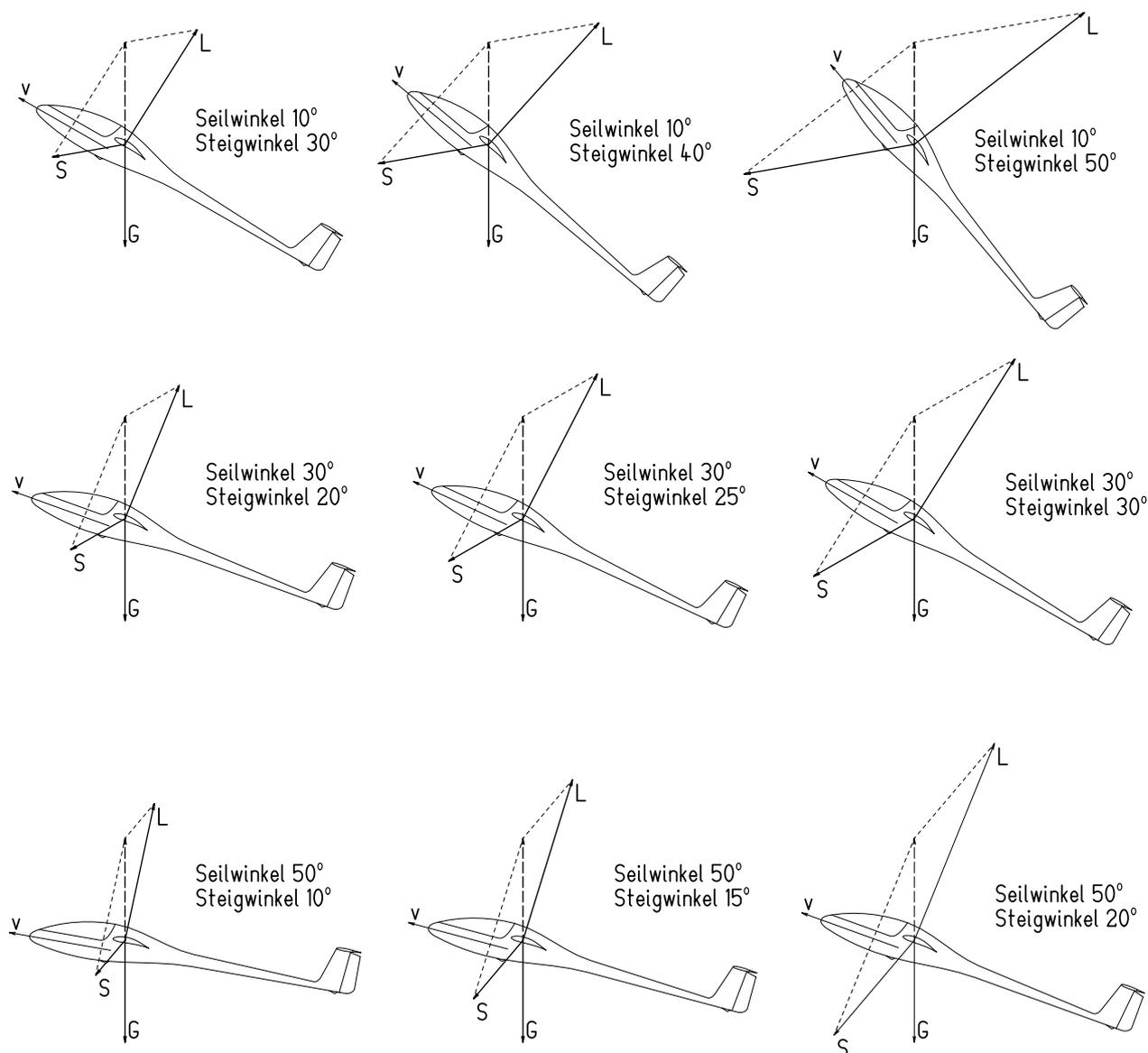


Abbildung 3: Kräfte auf ein Segelflugzeug im Windschlepp

des Schlepps vorkommt. Hier bewirken jeweils 5° mehr Steigwinkel noch größere Zunahmen der Seilkraft als bei 30° Steigwinkel. Der Pilot steuert durch sein Höhenruder den Steigwinkel, er kann ihn zum Beispiel durch Ziehen vergrößern. Unsere Bildern zeigen deutlich, dass er dann aber wesentlich mehr Seilkraft benötigt um unter dem größeren Steigwinkel gleichmäßig zu steigen.

Man kann natürlich das, was man in den Bildern geometrisch konstruiert, auch ausrechnen. Dies ist in Abb. 4 geschehen. Dort wurden für verschiedene Seilwinkel die Seil- und Luftkräfte ausgerechnet, die sich für die möglichen Steigwinkel ergeben. Die Ergebnisse sind als Kurven dargestellt. Hier sieht man das, was aus den vielen Bildern von Abb. 3 für einzelne Winkel schon zu erkennen war, noch deutlicher. Im linken Bild geht es um die Seilkraft S . Das Verhältnis S/G ist nach oben abgetragen. $S/G = 1$ bedeutet also, dass die Seilkraft gleich groß ist wie das Fluggewicht G des geschleppten Flugzeugs. Für jeden Seilwinkel von 10° bis 60° ist eine Linie gezeichnet. Die Linie für 10° geht am weitesten nach rechts. Klar, bei den kleinen Seilwinkeln am Anfang des Schlepps kann man am steilsten steigen. Weiter oben, das weiss

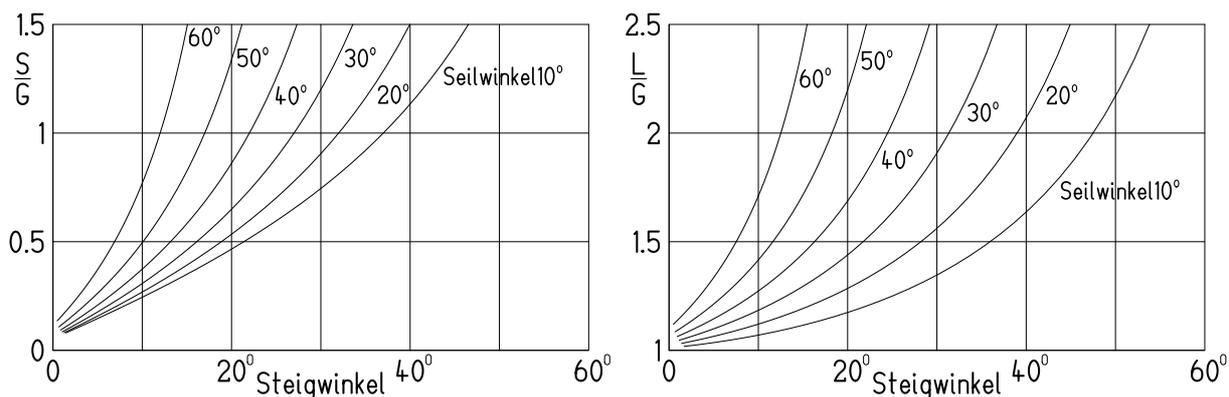


Abbildung 4: Seilkraft- und Luftkraft-Kurven über dem Steigwinkel für verschiedene Seilwinkel

jeder Pilot, wird der Schlepp immer flacher. Was hier aber noch klarer als in den Bildern von Abb. 3 herauskommt, ist die Tatsache, dass bei größeren Seilwinkeln die Seilkraftlinien wesentlich steiler verlaufen. Man kann also dort durch weniger oder mehr Ziehen schon große Änderungen der für Steigen mit gleicher Fahrt erforderlichen Seilkraft erreichen. Ganz ähnlich sieht es auch im rechten Diagramm mit der Luftkraft L aus. Man muss beachten, dass in diesem Diagramm L/G vom Wert 1 nach oben geht. Die Luftkraft ist also immer größer als das Gewicht. Der Wert $L/G = 2$ bedeutet hier, dass die Luftkraft schon doppelt so hoch ist wie im freien Flug, wo sie ja gerade das Gewicht des Flugzeugs tragen muss. Auch die Luftkraftlinien verlaufen für höhere Seilwinkel wieder steiler als diejenigen für niedrige Seilwinkel. Darauf wird im Abschnitt 7 zurückgekommen.

5 Bisherige Schleppmethoden

Hier erkennt man schon ein zentrales Problem des Windschlepps. Die Seilkraft spielt eine entscheidende Rolle, aber weder der Pilot noch der Windenfahrer kennt sie (normalerweise). Wenn man untersuchen will, wie neue starke Winden, auch Elektrowinden, sich auf die Taktik und die Ausbildung im Windschlepp auswirken, dann ist es ratsam, zunächst einmal zu fragen, wie das bisher 60 Jahre lang ganz gut funktioniert hat, ohne dass viel über die Seilkraft gesprochen wurde. Allenfalls wenn die Sollbruchstelle einmal gerissen ist, hat man bemerkt, dass die Seilkraft zu hoch war.

Im Grund hat der Pilot einen normal steilen Schlepp gemacht, der ohne Gegenwind ungefähr eine Höhe von 35 Prozent der zur Verfügung stehenden Schleppstrecke erreicht hat, und der Windenfahrer musste so schleppen, dass der Pilot im Schlepp eine normale Fahrt hatte. Der Pilot hat dem Windenfahrer, manchmal per Funk schon im Schlepp, oder nachträglich gesagt, er soll schneller oder langsamer schleppen. Dadurch bekam der Windenfahrer Erfahrung, mit welcher Motor- oder Trommeldrehzahl er die einzelnen Flugzeuge schleppen musste, je nachdem, welche Instrumente er hatte. Diese Taktik hing aber sehr davon ab, wie steil die einzelnen Piloten steigen wollten und wieviel Gegenwind vorhanden war. Wir werden sehen, der Windenfahrer konnte auf die Aufforderung „schneller“ nichts anderes tun als mehr Gas zu geben. Damit hat er zunächst nur die Seilkraft erhöht. Nur wenn der Pilot nicht mehr gezogen hat, ist er schneller geworden. Entsprechend war es, wenn der Pilot „langsamer“ gewünscht hat. Der Windenfahrer musste das Gas zurücknehmen. Damit hat man dann die Möglichkeiten starker Winden gar nicht ausgenutzt.

Wenn man nun die bis September 2009 gültigen Bestimmungen für den Steigflug des Windenschlepps anschaut, dann stellt man rasch fest, dass sie die neueren starken Winden ungenügend berücksichtigt haben und bezüglich der enthaltenen Fahrtangaben sogar gefährlich waren.. Sie standen in drei verschiedenen Broschüren, die von der Segelflugkommission des Deutschen Aeroclubs herausgegeben werden, nämlich den Startwindenfahrer-Bestimmungen (Juni 1999), der Segelflugsport-Betriebs-Ordnung, SBO, (Januar 2001) und Segelflugausbildung (Mai 2003). Die ersten beiden wurden im September 2009 wesentlich verbessert. Seltsamerweise werden diese Vorschriften seither wesentlich mehr diskutiert und beachtet. Natürlich konnten diese Vorschriften nicht ausführlich begründet werden. Deshalb gab es auch Missverständnisse. Ein wesentlicher Grund für die Herausgabe der vorliegenden Broschüre war, die Vorschriften und möglicherweise weitere Änderungen in ihnen verständlich zu machen.

6 Die minimale Fahrt im Windenschlepp

Hier geht es um ein zentrales Sicherheitsproblem des Windenschlepps. Schon im Freiflug ist das Fliegen mit zu kleiner Geschwindigkeit sehr gefährlich, denn dies ist ein überzogenen Flugzustand, bei dem die Gefahr des seitlichen Abschmierens bis hin zum Trudeln besteht. Jeder Flugschüler lernt dies in seiner Ausbildung intensiv kennen. Ein Pilot mit Schein, der zum ersten Mal auf einem neuen Flugzeugtyp fliegt, muss so bald wie möglich in genügend Höhe das Verhalten dieses Flugzeugs im Langsamflug erfliegen. Im Windenschlepp ist der überzogene Flugzustand noch gefährlicher, weil das Abschmieren aus nach oben geneigter Fluglage erfolgt und nicht abgefangen werden kann. Ein Schieben beim Vorhalten gegen Seitenwind kann das Abschmieren begünstigen, und zwar bis in den letzten Teil des Schlepps. Die berüchtigte Rolle am Seil kommt bis heute noch vor. Man muss also die Minimalgeschwindigkeit im Windenschlepp unbedingt kennen und vermeiden. Wir werden gleich sehen, dass sie wesentlich höher ist als in freien Flug und höher als man dies gefühlsmäßig annimmt.

Hier liefert das rechte Diagramm von Abb. 4 wichtige Grundlagen. Nicht nur die erforderliche Seilkraft S , sondern auch die Luftkraft L nimmt zu, wenn der Steigwinkel größer wird. In der Nähe der Minimalgeschwindigkeit nimmt die Luftkraft nicht mehr zu, wenn man den Anstellwinkel vergrößert. Wenn man mehr Luftkraft benötigt, kann dies nur durch Vergrößerung der Geschwindigkeit erreicht werden, Im Freiflug ist die Luftkraft gleich dem Gewicht, siehe Abb. 2, und die Minimalgeschwindigkeit V_{s_1} . Da alle Luftkräfte proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit sind, kann man durch die doppelte Geschwindigkeit schon die vierfache Luftkraft bekommen. Allgemeiner kann man das durch die einfache Formel

$$\frac{V_{min}}{V_{s_1}} = \sqrt{\frac{L}{G}}$$

ausdrücken. Dabei ist V_{s_1} die Minimalgeschwindigkeit im freien Flug, die hier ebenso bezeichnet wird wie in den Bauvorschriften, und V_{min} die Minimalgeschwindigkeit bei erhöhter Luftkraft.

Beide Geschwindigkeiten in dieser Formel sind auf dem Fahrtmesser angezeigte Werte. Etwas anderes steht im Flug nicht zur Verfügung. Es gibt Flugzeuge, bei denen vor allem im Langsamflug die Fahrtmesseranzeige niedriger ist als die wirkliche Geschwindigkeit (true airspeed). Für den Windenschlepp dürfen nur angezeigte Werte benützt werden. Die Geschwindigkeit V_{s_1} muss also im freien Flug ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass das Flugzeug bei V_{s_1} noch wirklich fliegt und steuerbar ist. Neuere Flugzeuge können im Garadeausflug einen Sackflug machen, bei dem mehr oder weniger deutliches Schütteln und träge Reaktion auf

Steuerbewegungen vorhanden ist. Derartige Flugzustände dürfen zur Ermittlung von V_{s1} nicht herangezogen werden.

Die obige Formel wird zunächst auf das Fliegen mit Wasserballast angewandt, da dies einfacher zu verstehen ist. Jeder Pilot weiss, dass er mit Ballast nicht nur eine höhere Minimalgeschwindigkeit hat, auch alle anderen Geschwindigkeiten erhöhen sich entsprechend, vor allem diejenigen im Kreisflug. Dabei muss man in der obigen Formel $L = G + G(\text{Ballast})$ einsetzen. Wenn also das Fluggewicht durch Ballast um einen Faktor 1.44 erhöht wird (um 44%), was schon sehr viel ist, dann nimmt die Minimalgeschwindigkeit um einen Faktor 1.2 oder 20% zu.

Nun kann man aus den Abb. 3 und 4 aber leicht sehen, dass die Luftkraft im gleichmäßigen Schlepp meistens wesentlich mehr Ballast entspricht, besonders bei steilen Schleppts. Dieses Problem ist bisher zu wenig beachtet worden, wahrscheinlich hat es sich bei schwächeren Winden nicht so deutlich gestellt. Die Minimalgeschwindigkeit ist aber ein zentrales Sicherheitsproblem des Windenschleppts! Man muss unbedingt wissen, wie hoch sie ist und wovon sie abhängt.

Man könnte hier argumentieren, dies ist ein Problem des Flug- und Betriebshandbuchs. Dort muss aber nur die maximale Geschwindigkeit im Windenschlepp enthalten sein. Und wo im Handbuch eine Windenschleppgeschwindigkeit empfohlen ist, besteht die Gefahr, dass sie für schwächere Winden und schwächere Sollbruchstellen gilt und die Zunahme bei hohem Steigwinkel nicht berücksichtigt ist. Es muss versucht werden, die in den gezeigten Bildern klar erkenntlichen Tatsachen in möglichst einfache Vorschriften umzusetzen und dabei keine Konzessionen an die Sicherheit zu machen. Leider ist es unmöglich, einen einheitlichen relativ hohen Prozentsatz für die Erhöhung der Minimalgeschwindigkeit für alle Schleppts vorzuschreiben. Gedacht war an 60 % was einem Faktor 1.6 entspricht. Dies kann mit vielen schwächeren Winden und schwereren Flugzeugen gar nicht erreicht werden. Dort sind aber die Steigwinkel überhaupt nicht möglich, bei denen man die hohen Minimalgeschwindigkeiten hat.

Wie nun einfache Regeln finden, die in die Vorschriften eingearbeitet werden können? Auch hier kommt man an der von der Winde gelieferten Seilkraft nicht vorbei. Dazu schauen wir noch ein anderes Diagramm. Wir gehen jetzt davon aus, dass wir die Seilkraft kennen. Dann kann man für jeden Seilwinkel die Luftkraft ausrechnen. Dies ist in Abb. 5 dargestellt. Dabei ist immer noch stationärer Steigflug mit sehr langsamen Geschwindigkeitsänderungen vorausgesetzt. Der Übergangsbogen dazu wird später getrennt bearbeitet. Jede der Linien in Abb. 5 gilt für einen Wert S/G . Wenn ein Schlepp mit konstanter Seilkraft durchgeführt wird, dann nimmt die Luftkraft im Verlauf des Schleppts, also bei zunehmendem Seilwinkel, entsprechend der zugehörigen Linie zu und nähert sich gegen Ende des Schleppts dem Wert $1 + S/G$, den sie nicht ganz erreicht. Das ist erklärlich, denn gegen Ende des Schleppts haben Seilkraft, Gewicht und Luftkraft ähnliche Richtungen, siehe untere Reihe von Abb. 3. Der Wert $1 + S/G$ würde erreicht, wenn alle drei Kräfte die gleiche Richtung hätten. Wenn sich die Seilkraft während des Schleppts ändert, dann muss man die Luftkraft aus verschiedenen Linien (oder aus gedachten Zwischenlinien) entnehmen. Um sicher zu gehen, arbeitet man dann mit der höchsten benützten Linie, also derjenigen der höchsten Seilkraft des Schleppts. Die Luftkraft ist dann immer kleiner oder höchstens gleich derjenigen die aus S_{max}/G folgt. Wenn man also nur die maximale Seilkraft S_{max}/G kennt, die in einem Schlepp auftreten kann, dann kann man eine für den ganzen Steigflug sichere Minimalgeschwindigkeit finden, indem man als maximale Luftkraft $L = G + S_{max}$ zugrunde legt und die Formel

$$\frac{V_{sw}}{V_{s1}} = \sqrt{\frac{G + S_{max}}{G}} = \sqrt{1 + \frac{S_{max}}{G}}$$

anwendet. Schauen wir einmal den Idealfall konstanter Seilkraft an, die dann im gesamten

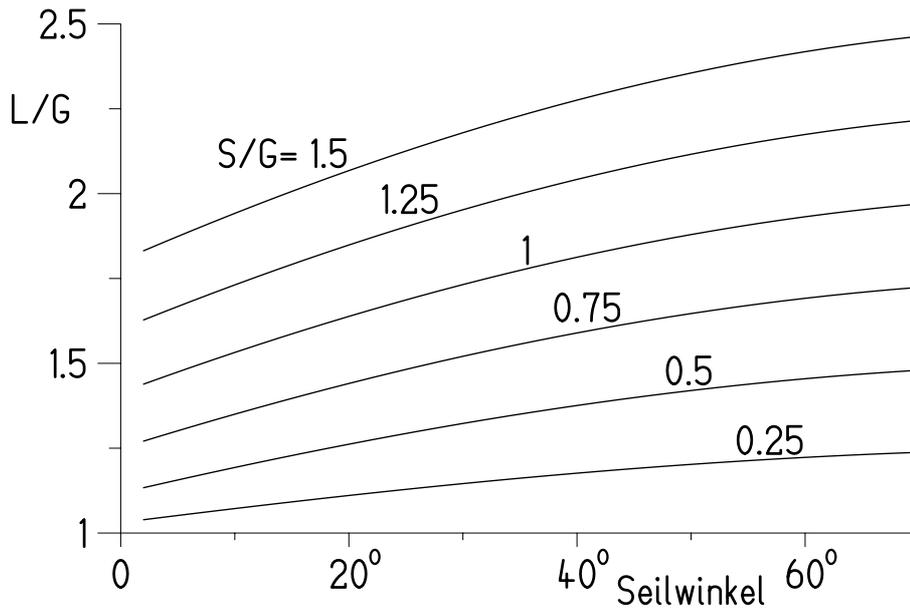


Abbildung 5: Luftkraft L/G bei verschiedenen Seilkräften S/G

Schlepp die maximale Seilkraft ist. Aus Abb. 5 folgt dann, dass die Luftkraft immer kleiner ist als die in der obigen Gleichung eingesetzte. Die Minimalgeschwindigkeit wird also aus einer Luftkraft errechnet, die erst gegen Ende des Schlepps knapp erreicht wird. Vorher könnte man niedrigere Werte nehmen. Wenn man dies nicht tut, ist man im unteren Teil des Schlepps mehr auf der sicheren Seite als im oberen. Wenn man aber keine konstante Seilkraft voraussetzen kann, dann hat man mit der obigen Formel zusätzliche Sicherheit, besonders im unteren Teil des Schlepps. Wir werden aber sehen dass dort im Übergangsbogen noch zusätzliche Luftkräfte erforderlich sind und wir den dort vorhandenen Spielraum gut brauchen können.

Eigentlich müsste für jede Winde ein Volllast-Diagramm vorhanden sein, aus dem man die maximale Seilkraft bei Vollgas entnehmen kann. Dann kann man diese maximale Seilkraft in die obige Formel ein setzen und erhält für jedes Flugzeug, das an der betrachteten Winde mit Vollgas geschleppt werden kann, eine für den gesamten Steigflug gültige sichere Minimalgeschwindigkeit. Dies hilft wenigstens bei nicht sehr starken Winden eine ganze Menge. Nehmen wir einmal eine Winde an mit 5000 N maximaler Seilkraft. Sie schleppt beispielsweise eine A SK 21 mit 650 kg Masse, also ungefähr 6370 N Fluggewicht. Dann ist S/G maximal 0.78, und die sichere Minimalgeschwindigkeit um den Faktor 1.34 oder um 34% gegenüber V_{s1} erhöht. Die Sollbruchstelle mit 8500 N Nennlast würde knapp ausreichen, siehe Abschnitt 15. Mit der gleichen Winde und der gleichen Sollbruchstelle kann man einen Kunststoff-Einsitzer mit Flugmasse 400 kg und Fluggewicht 3920 N mit Vollgas schleppen. Bei ihm ist dann $S/G = 1.28$ und die Minimalgeschwindigkeit um den Faktor 1.51 oder 51% erhöht. Dabei haben wir nicht darauf geachtet, ob diese Sollbruchstelle für das angenommene Flugzeug zugelassen ist. Dazu wird im Abschnitt 15 Stellung genommen. Flugzeuge wie Ka 8 oder Ka 6 sollte man an dieser Winde nicht mit Vollgas schleppen. Wenn man davon ausgeht, dass die maximale Seilkraft ungefähr ebenso zurückgeht wie die Gasstellung, dann kann man ein solches Schulflugzeug mit 300 kg Flugmasse oder 2940 N Fluggewicht an dieser Winde mit 3000 N Seilkraft und ungefähr 60% Gas schleppen. Dann ist $S/G = 1.02$ und die Minimalgeschwindigkeit um den Faktor 1.42 oder 42% erhöht. Die Nennlast der Sollbruchstelle muss dann mindestens 4000 N

sein.

Wenn für eine Winde kein Vollastdiagramm und auch sonst keine Information über die Seilkraft zur Verfügung steht, kann man vielleicht andere Winden mit ähnlichen Motoren und ähnlichem Übersetzungsverhältnis zwischen Motor und Seil finden, bei denen das Vollgasdiagramm vorhanden ist. Daraus kann man schon gewisse Anhaltspunkte für die maximale Seilkraft entnehmen. Vorsicht! Bei Winden aus der ehemaligen DDR ist oft das Übersetzungsverhältnis wesentlich kleiner als im Westen üblich. Solche Winden haben ordentliche Seilkraft im Steigflug, kommen aber am Anfang des Schleppts oft in Drehzahlbereiche, in denen die Seilkraft schon stark abnimmt.

Was hier über die Minimalfahrt im Windenschlepp gesagt wurde, muss natürlich im praktischen Flugbetrieb ständig beachtet werden. Wahrscheinlich kommt man nicht umhin, gewisse Angaben über die Minimalfahrt im Windenschlepp im Cockpit zur Verfügung zu stellen, z.B. durch ein Schild. Dabei muss die zulässige Sollbruchstelle und ein Bereich möglicher Winden-Stärken berücksichtigt werden. Auch in der Ausbildung muss der Windenschlepp genauer beachtet werden. Dabei muss klar werden, dass der Pilot seine Fahrt im Windenschlepp ständig überwachen und seine Minimalgeschwindigkeit gut kennen muss. Es ist absolut lebensgefährlich, im Schlepp die Mindestfahrt zu unterschreiten! Dazu gibt es im nächsten Abschnitt 7 noch wichtige Aussagen.

7 Klare Regeln für den Windenschlepp

Die Bilder in Abb. 3 haben deutlich gezeigt, dass der Pilot um so mehr Seilkraft benötigt, je steiler er steigen will. Die Seilkraft hängt vom Motor der Winde und davon ab wieviel Gas der Windenfahrer gibt. Darauf hat aber der Pilot ebenso wenig Einfluss wie der Windenfahrer auf das Höhenruder des Piloten. Der Windenfahrer muss also für jedes zu schleppe Segelflugzeug aus Erfahrung eine gewisse Menge Gas geben und darauf achten, dass die Sollbruchstelle des Seils nicht reißt. Wie kann aber der Pilot feststellen, wie steil er bei der allein von der Winde und dem Windenfahrer gesteuerten Seilkraft steigen kann?? Er kann! Man muss nur das, was schon klar beschrieben wurde, von der anderen Seite her betrachten. Ebenso wie zu jedem Steigwinkel eine „richtige“ Seilkraft gehört, gehört jeder Seilkraft ein richtiger Steigwinkel, bei dem die Fahrt konstant bleibt. Steigt der Pilot steiler als mit dem richtigen Steigwinkel, verliert er Fahrt, steigt er flacher, holt er Fahrt auf. Er kann also seine Fahrt genau wie im freien Flug durch mehr oder weniger Ziehen selbst steuern, und er muss dies unbedingt auch tun! Er sorgt damit vorrangig dafür, dass seine Fahrt angemessen über der Minimalgeschwindigkeit liegt und dann dafür, dass seine Geschwindigkeit konstant bleibt. Wenn beides erreicht ist, dann hat er automatisch auch den richtigen Steigwinkel erreicht bei dem die erforderliche Seilkraft mit der von der Winde gelieferten übereinstimmt.

Der Windenfahrer hat dann im Steigflug nur noch die Aufgabe, so zu schleppen, dass der Pilot seine Fahrt leicht regeln kann. Das ist einfach, er muss nur so gleichmäßig wie möglich schleppen. Ideal wäre es, wenn er mit konstanter Seilkraft schleppen würde. Dies ist aber nicht möglich, solange er die Seilkraft nicht kennt. Er kann dann nur darauf vertrauen, dass sich bei konstantem Gas die Seilkraft wenig ändert. Er sollte also im Steigflug das Gas nur sehr langsam ändern, wenn überhaupt. Und er kann natürlich mit der Seilkraft, die er in Wirklichkeit erzeugt aber nicht kennt, nicht nahe an die Nennlast der Sollbruchstelle herangehen.

Die klaren Regeln lauten also:

Der Windenfahrer schleppt so gleichmäßig wie möglich. Er passt sein Gas an das

geschleppte Segelflugzeug und die eingehängte Sollbruchstelle an.

Der Pilot steuert seine Fahrt durch sein Höhenruder, wie im Freiflug. Er ist dafür verantwortlich, dass er immer angemessen höhere Fahrt als die jeweilige Minimalfahrt hat.

Welche Fahrt der Pilot benötigt, um sicher zu fliegen, ist in Abschnitt 6 ausführlich diskutiert worden.

Wir wollen uns als schwierigsten Fall einmal einen Schlepp vorstellen, bei dem der Pilot gar nicht weiss, was für eine Winde er benützt und wie er geschleppt werden wird. Zunächst hebt er ab und versucht, ohne wesentliches Steigen Fahrt aufzuholen normalerweise bis $1.2 V_{s1}$. Dazu muss er unter Umständen ziemlich drücken. Er hält deshalb den Knüppel schon im Anschleppen in halb gedrückter Stellung. Wenn dies gut gegangen ist, lässt er sein Flugzeug langsam steigen, in dem Mass, in dem die Fahrt weiter zunimmt. Schon wenn er $1.3 V_{s1}$ erreicht hat, kann er etwa 30° steigen, kann also langsam ziehen. Wenn dabei die Fahrt nicht mehr zunimmt, darf er nicht weiter ziehen, wenn sie abnimmt muss er sogar etwas nachlassen, also weniger ziehen. So bemerkt er, dass er relativ wenig Seilkraft zur Verfügung hat und kann seinen Steigflug danach einrichten. Seine Minimalgeschwindigkeit bleibt relativ niedrig, er wird keine große Höhe erreichen. Wenn dagegen seine Fahrt nach dem Beginn des Steigens zunimmt, vielleicht sogar rasch zunimmt, kann er sich auf mehr Seilkraft einstellen. Er kann, wenn er genügend Fahrt aufgeholt hat weiter ziehen und steiler steigen. Sowie aber beim weiteren Ziehen die Fahrt abnimmt, muss er etwas nachlassen, es sei denn er hat vorher schon eine deutliche Übergeschwindigkeit erreicht. Er muss aber immer seine höhere Minimalgeschwindigkeit im Auge behalten. Auf diese Weise kann er sich auf die vorhandene Seilkraft einstellen und wird eine gute Höhe erreichen.

Normalerweise wird der Pilot aber schon vorher wissen, wie stark seine Winde ist und wie stark er geschleppt werden will. Er muss dann nicht erst erfühlen bei welcher Geschwindigkeit er sicher schleppt, sondern kann zielsicher auf eine Fahrt oberhalb seiner erforderlichen Minimalgeschwindigkeit losteuern und sie dann konstant halten. Man lernt diese Methode, wenn man sie nicht schon jetzt fliegt, recht schnell. Der Windenfahrer hat dabei wenig zu tun. Er wird gegebenenfalls mit relativ kleiner Seilkraft anschleppen, siehe Abschnitt 7, und während des nachfolgenden Übergangs in den Steigflug langsam auf die Gasstellung übergehen, die er für das geschleppte Flugzeug kennt.

Die klaren Regeln bedeuten auch, dass der Windenfahrer nicht verantwortlich sein kann, wenn der Pilot im Steigflug zu viel zieht und damit zu langsam wird. In dieser kritischen Situation kann der Windenfahrer fast nichts mehr richtig machen. Früher galt die Regel, dass er in diesem Fall Vollgas geben muss. Dies ist sehr problematisch, denn der Windenfahrer erhöht dadurch die Seilkraft, das Segelflugzeug benötigt noch mehr Auftrieb, der bei seiner geringen Fahrt gar nicht möglich ist. Seine überzogene Fluglage wird verstärkt, die Gefahr des seitliche Abkippens erhöht, lange bevor das höhere Gas die Geschwindigkeit erhöhen könnte, was ja langsam erfolgt.

Das Vollgas kann bei den früher üblichen schwachen Winden gerade noch gerechtfertigt gewesen sein, die ohnehin meistens fast mit Vollgas geschleppt haben. Heute muss der Windenfahrer in dieser kritischen Situation ganz vorsichtig das Gas erhöhen. Er kann dann nur noch hoffen, dass der Pilot durch weniger Ziehen langsam Fahrt aufholt bevor er seitlich abschmiert. Verantwortlich für diese Situation war schon immer der Pilot, und das muss so bleiben. Man muss diese Art von immer schweren Unfällen reduzieren, indem schon bei der Schulung peinlich genau darauf geachtet wird dass der Pilot seine Fahrt ständig im Auge hat und richtig steuert. Dabei muss er vor allem wissen, von welcher Minimalgeschwindigkeit er einen Sicherheitsbestand

einhalten muss.

Auf ein ähnliches Problem wurde ich durch die Stellungnahme eines aufmerksamen Piloten hingewiesen. Es hatte per Funk „schneller“ erbeten und beobachtet, dass der Windenfahrer relativ rasch mehr Gas gab. Am Seitenfaden bemerkte er, dass er dadurch fast in einen überzogenen Flugzustand kam. Daraus muss man zweierlei Schlüsse ziehen:

- Der Pilot muss beachten, dass die Aufforderung „schneller“ mehr Seilkraft bedeutet, seine Minimalfahrt also zunimmt. Er holt also am besten etwas Fahrt auf, bevor er seine Bitte an die Winde funkt.
- Der Windenfahrer gibt auf die Bitte „schneller“ sehr langsam und vorsichtig mehr Gas, damit der Pilot genügend Zeit hat, um Fahrt aufzuholen. Dazu passt, dass er sich ohnehin daran gewöhnen muss, möglichst wenig mit dem Gas spielen.

Nebenbei, der Pilot kann natürlich die optimale Höhe erreichen, wenn er im Steigflug immer die größtmögliche Seilkraft bekommt. Dies ist eine konstante Seilkraft in einem sicheren Abstand unterhalb der Nennlast der Sollbruchstelle. Solange der Windenfahrer seine Seilkraft nicht kennt, also keine Seilkraftmessung zur Verfügung steht, kann er sich nur von unten an die richtige Seilkraft heran tasten. Dabei sollte er im unteren Teil des Schlepps besonders vorsichtig sein. Wenn die Sollbruchstelle reißt, hat er zu viel Seilkraft gehabt. Dies sollte er höchstens im letzten Drittel des Schlepps riskieren. Er kann sich aber darauf verlassen, dass der Pilot mehr zieht, wenn er mehr Seilkraft zur Verfügung hat. Die erreichte Höhe ist also ein gutes Kriterium für eine gut dosierte Seilkraft. Der Windenfahrer tut also gut daran, sich die erreichte Höhe jeweils durchsagen zu lassen. Natürlich muss er auch die Sollbruchstelle kennen, die eingehängt wird. Auch die Drehzahlmesser von Motor und Trommel geben ihm Hilfen. Wenn der Pilot mehr zieht, reduziert sich die Trommeldrehzahl.

Eine Schwierigkeit besteht noch darin, dass die meisten Winden einen Wandler zwischen Motor und Seiltrommel haben, der einsetzt, bevor die minimale Motordrehzahl erreicht wird. Dann entsteht ein Schlupf zwischen Motor und Trommel, der zur Verstärkung des Trommel-Drehmoments und damit der Seilkraft ausgenützt wird. Der Windenfahrer kann das Einschalten des Wandlers meist nicht feststellen. Dadurch wird die Seilkraft automatisch erhöht. Je nach Einstellung des Wandlers erfolgt dies erst im allerletzten Teil des Schlepps, oder auch schon früher. Die meisten Fliegergruppen haben diesbezügliche Erfahrungen. Die einen haben einen ziemlichen Verbrauch von Sollbruchstellen, die immer mehr oder weniger kurz von dem Ausklinken reißen, die anderen kenne dieses Problem kaum. Bei gutem Gegenwind ist immer die Seilgeschwindigkeit kleiner, dann reißen die Sollbruchstellen früher, aber immer in genügend großer Höhe, wodurch kaum Gefahr von Unfällen besteht. Bei entsprechend eingestelltem Wandler muss eigentlich der Windenfahrer im letzten Teil des Schlepps mit dem Gas zurückgehen. Es ist bei solchen Winden aber auch zu empfehlen, dass auch die Piloten im letzten Teil des Schlepps nicht mehr so stark ziehen und nicht die letzte Höhe herausholen.

Insgesamt sind die gegebenen Regeln für den Steigflug sehr klar und einfach. Viele Piloten und Windenfahrer befolgen sie schon lange. Beide wissen genau, was sie zu tun haben. und wofür sie verantwortlich sind. Durch die im September 2009 durchgeführten Änderungen wurden die Vorschriften an die neuen Erkenntnisse angepasst.

Zu diesen Regeln sind von Windenfahrern und Segelfliegern, die bisher nicht nach ihnen flogen, Fragen gestellt worden, die hier gleich beantwortet werden.

- Steilere Schlepps benötigen höhere Fahrt, ziehen verringert diese aber. Wie passt das zusammen??

Antwort: Das verläuft wie im freien Flug. Wenn man dort aus irgend einem Grund seine Fahrt kräftig erhöhen will, drückt man erst so dass die Nase tiefer nach unten geht und man Fahrt aufholt. Wenn man dann die gewünschte Fahrt hat muss man wieder etwas ziehen, damit die Fahrt nicht weiter steigt. Das macht man unbewusst und bemerkt es gar nicht mehr. Im Schlepp zieht man etwas weniger, wenn man Fahrt aufholen will, und wenn man die gewünschte Fahrt hat, zieht man wieder etwas, damit sie erhalten bleibt. Auch das macht man auf die Dauer unbewusst. Das Ziehen, das zum steileren Schlepp führt kommt also erst, wenn man schon genügend Fahrt für den steileren Schlepp hat und muss so vorsichtig geschehen, dass die Fahrt dabei nicht abnimmt. All das überlegt man höchstens am Anfang. Wenn man es ein paarmal gemacht hat, geht das unbewusst.

- Wie kann ein Windenfahrer mit möglichst konstanter Seilkraft schleppen, wenn er sie gar nicht kennt ??

Antwort: Jeder Windenfahrer hat schon immer im wesentlichen eine Seilkraft erzeugt und an das geschleppte Segelflugzeug durch sein Windenseil übertragen. Grundsätzlich erhöht er das Motordrehmoment und damit die Seilkraft, wenn er mehr Gas gibt und umgekehrt. Solange er seine Seilkraft nicht kennt, sollte er versuchen im Steigflug sein Gas möglichst wenig zu verändern. Er kann sich darauf verlassen, dass der Pilot seine Geschwindigkeit selbst steuert, also mehr zieht wenn er mehr Gas gibt. Er kann sich von unten vorsichtig an höhere Gasstellungen herantasten. Dies tut er zuerst im letzten Teil des Schleppts. Wenn die Sollbruchstelle reißt, hat er zu viel Gas gegeben (oder der Wandler hat eingesetzt). Er wird bemerken, dass er so allmählich größere Ausklinkhöhen erreicht. Die Grenze für sein Gas ist entweder durch die Sollbruchstelle oder den Anschlag des Gashebels, also Vollgas gegeben. Siehe hierzu auch Abschnitt 15.

Normalerweise ist der Windenfahrer ohnehin gewohnt, mit dem Gas nicht viel zu spielen. Dann passiert nichts wenn er so schleppt wie bisher. Es geht ja nur darum, den Piloten nicht zu stören bei seiner Fahrt-Steuerung. Wenn er sich vielleicht ein wenig kontrolliert, wieviel er im Steigflug sein Gas verändert und dies reduziert, kann er wahrscheinlich etwas mehr Ausklinkhöhe herausholen.

8 Die optimale Ausklinkhöhe

Wie schon im Abschnitt 7 erwähnt wurde, kann der Pilot um so steiler steigen, je mehr Seilkraft er zur Verfügung hat. Er kann also die maximale Ausklinkhöhe erreichen, wenn der Windenfahrer ihm den ganzen Steigflug über eine möglichst große Seilkraft zur Verfügung stellt, bei der die Sollbruchstelle nicht reißt. Dies ist natürlich nur theoretisch erreichbar, solange der Windenfahrer seine Seilkraft nicht kennt. Es ist vielleicht trotzdem interessant zu wissen, welche Steigwinkel möglich sind, wenn der Windenfahrer eine konstante Seilkraft liefert. Dies ist in Abb. 6 gezeigt. Hier ist der Seilwinkel nach rechts aufgetragen und der Steigwinkel nach oben. Die verschiedenen Linien gelten jeweils für ein konstantes Verhältnis S/G . Es sind die Linien für vier Werte $S/G = 0.4, 0.8, 1.2$ und 1.6 dargestellt. Der Steigwinkel nimmt natürlich immer ab, wenn der Seilwinkel steigt. Er nimmt aber immer zu, wenn man von einem Wert S/G auf einen höheren übergeht. Dies ist aufgrund der bisherigen Überlegungen nicht überraschend. Interessant ist aber, wieviel das ausmacht. Offenbar macht die Steigerung der Seilkraft von $S/G = 0.4$ auf 0.8 mehr aus als diejenige von 1.2 auf 1.6 . Die letzten beiden Linie liegen enger zusammen als die beiden ersten. Eine allzu hohe Seilkraft bringt also nicht mehr so viel. Nun, $S/G = 1.6$ ist ohnehin ein sehr hoher Wert, den man kaum praktisch realisieren kann. Dagegen kann $S/G = 1.2$ mit starken Winden bei Einsitzern gut erreicht werden.

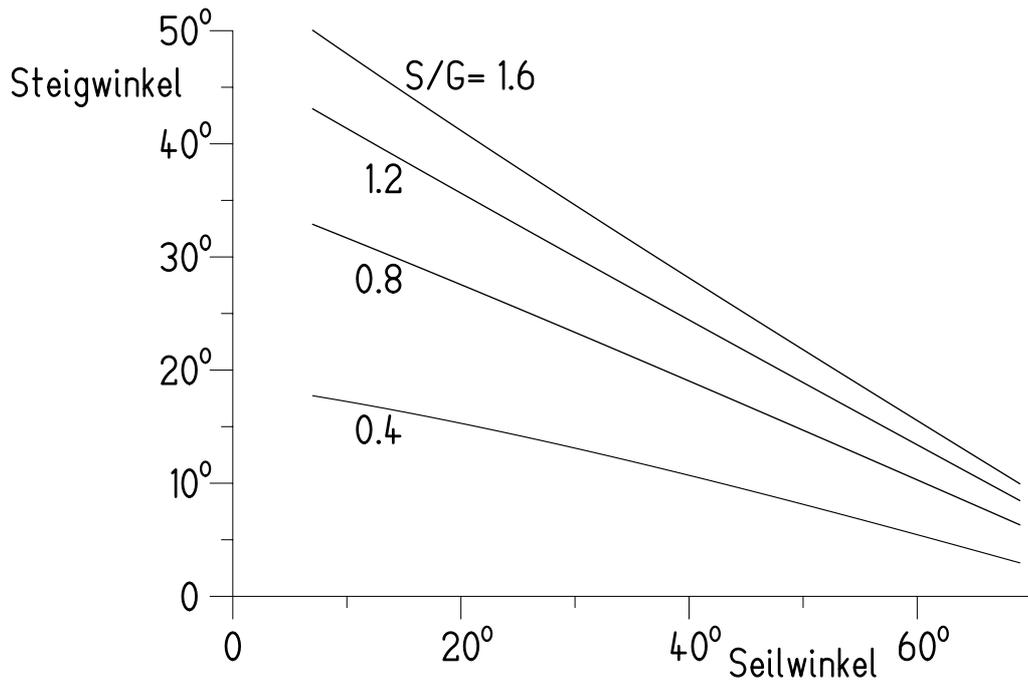


Abbildung 6: Steigwinkel bei verschiedenen konstanten S/G

9 Abheben

Alles, was bisher hergeleitet wurde, hat auf dem einfachen Gleichgewicht der Kräfte beruht, das im Steigflug mit konstanter Fahrt vorhanden sein muss. Dabei wurden die drei Kräfte immer von einem Punkt aus gezeichnet, meistens war dies der Schwerpunkt des Flugzeugs. Damit vernachlässigt man eine weitere Wirkung von Kräften, die vor allem im ersten Abschnitt des Schlepps eine wichtige Rolle spielen. Wie kann man das erklären? Dazu betrachten wir einmal

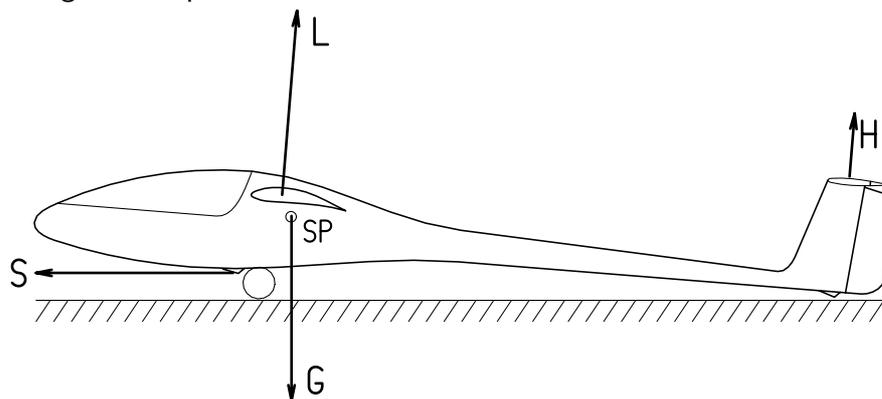


Abbildung 7: Drehmomente beim Abheben

das Anrollen und Abheben des Segelflugzeugs, siehe Abb. 7. Jeder kennt es, bei Segelflugzeugen, die im Stand außer auf dem Haupttrad auf einem vorderen Rad stehen, ist der Sporn im Stand nicht am Boden. Sowie ein solches Flugzeug angeschleppt wird, hebt das vordere Rad ab und der Sporn geht nach unten, oft schlägt er mit einem erheblichen Bumser am Boden auf. Was geschieht dabei? Der Schlüssel zu diesem Geschehen ist die Hebelwirkung der Kräfte, wobei man sich das Flugzeug in Schwerpunkt drehbar gelagert vorstellen muss. Wenn sich die Hebelwirkungen (Drehmomente) der Kräfte um den Schwerpunkt nicht aufheben, fängt das

Flugzeug an, sich zu drehen, im beschriebenen Fall von der Seite gesehen um seine Querachse. Beim angeschleppten Flugzeug ist das Seil nahe am Boden in die Schleppkupplung eingeklinkt, der Schwerpunkt liegt höher, abhängig vom Flugzeug. Schulter- und Hochdecker haben meistens eine höhere Schwerpunktlage. Die Seilkraft hat also eine erhebliche Hebelwirkung bzw. ein Drehmoment um den Schwerpunkt, die zugehörige Drehung hebt die Nase an und senkt das Heck. Diese Drehung setzt sofort ein, wenn nicht andere Kräfte entgegengesetzte Hebelwirkungen haben. Dies ist bei dem auf dem vorderen Rad aufsitzenden Flugzeugen der Fall. Wenn aber der Sporn am Boden ist, wirkt vom Boden eine Kraft nach oben auf den Sporn. Der Hebelarm dieser Kraft zum Schwerpunkt ist groß. Es entsteht eine große Hebelwirkung entgegengesetzt zu derjenigen des Seils. Das Flugzeug dreht sich nicht, solange der Sporn am Boden ist. Man sagt, das Gleichgewicht der Momente ist vorhanden.

Nun hebt aber das Flugzeug langsam ab, die Hebelwirkung der Seilkraft ist aber noch da. In dem Augenblick, in dem der Sporn den Boden verlässt, kann über ihn die Hebelwirkung der Seilkraft nicht mehr ausgeglichen werden. Jetzt kann nur das Höhenleitwerk die Funktion des Sporns übernehmen. Es muss eine erhebliche Auftriebskraft H aufbringen, die die Hebelwirkung der Seilkraft ausgleicht. Das Höhenleitwerk hat in allen Fluglagen und Flugzuständen die Funktion, das Gleichgewicht der Hebelwirkungen oder Drehmomente auszugleichen. Normalerweise ist man sich dessen nicht bewusst. Man weiss einfach, wie das Höhenruder wirkt, man regelt damit die Fahrt, man fängt bei der Landung ab, man macht gelegentlich einen Looping, man steigt mehr oder weniger steil im Steigflug des Windenschlepps, das Flugzeug macht immer, was man will. Fast immer! Kurz nach dem Abheben des Sporns im Windenschlepp kann es passieren, dass die Höhenruderkraft nicht ausreicht um das Drehmoment der Seilkraft auszugleichen. Dann bäumt sich das Segelflugzeug auf und kommt in eine überzogene Fluglage, es entsteht ungewollt der sogenannte Kavaliertart, der höchst gefährlich ist. Natürlich kommt es auch vor, dass der Pilot absichtlich zu schnell in den Steigflug übergeht und dadurch in eine überzogene Fluglage kommt. Das ist eine Frage der Ausbildung. Besonders mit starken Winden kann man aber so anschleppen dass der Pilot das Aufbäumen gar nicht verhindern kann! Diese Gefahr muss man sehr ernst nehmen. Besonders kritisch ist der Augenblick, in dem der Sporn abhebt und die Zeit kurz danach.

Eine genauere Untersuchung ergibt die folgenden Merkmale, die das unbeabsichtigte Aufbäumen beeinflussen:

- a) Hohes Verhältnis der Seilkraft zum Fluggewicht S/G zum Zeitpunkt des Abhebens begünstigt das Aufbäumen. Man kann S/G abschätzen, denn dieser Wert ist auch die g -Beschleunigung, $S/G = 0,5$ ergibt z.B. eine Beschleunigung von $0.5 g$ oder $5 (m/sec)/sec$. Diese Beschleunigung kommt sicher oft vor. Wenn sie schon im Anrollen vorhanden ist, erreicht man in 4 Sekunden $20 m/sec$ oder $72 km/h$, eine normale Abhebegeschwindigkeit. Dabei legt man etwa $40 m$ zurück.
- b) Die Höhe h des Schwerpunkts über der Schleppkupplung im Verhältnis zur mittleren Flügeltiefe t_m . Große Werte h/t_m sind gefährlicher als kleine. Schulterdecker haben meist einen höheren Schwerpunkt als Mitteldecker. Flugzeuge mit kleiner Flügeltiefe sind im Nachteil, Doppelsitzer haben es leichter als Einsitzer.
- c) Die Längsstabilität des geschleppten Segelflugzeugs. Flugzeuge, die auf das Höhenruder sehr empfindlich reagieren, sind im Nachteil. Genauer geht es um den Höhenleitwerks-Volumkoeffizienten

$$C_v = (\text{Höhenleitwerksfläche} \times \text{Leitwerksabstand}) / (\text{Flügelfläche} \times \text{mittlere Flügeltiefe}).$$

Er ist die bestimmende Größe für das Längsstabilitäts-Mass und hat meistens einen Wert ungefähr zwischen 0.4 und 0.5. Kleines C_v erhöht die Gefahr des Aufbäumens

- d) Profil und Bauart des Höhenleitwerks. Höhenleitwerke mit dünnen Profilen liefern weniger Auftrieb. Gedämpfte Höhenleitwerke sind besser als Pendelleitwerke. Die entscheidende Größe ist das Verhältnis der Auftriebsbeiwerte von Höhenleitwerk und Flügel C_{aH}/C_a , Kleine Werte begünstigen das Aufbäumen.
- e) Die Vorlage der Schleppkupplung vor dem Schwerpunkt. Weit vorn angebrachte Kupplungen haben den Vorteil, dass das Aufbäum-Moment der Seilkraft stark nachlässt, sowie der Steigwinkel zunimmt.
- f) Die Schwerpunktlage des Flugzeugs bestimmt die Höhenruderkräfte, die schon im freien Flug bei der Abhebegeschwindigkeit vorhanden sind. Sie sind speziell bei der hintersten erlaubten Schwerpunktlage in beachtlicher Größe nach oben gerichtet. Damit kann das Höhenruder beim Abheben weniger zusätzlichen Auftrieb liefern um das Drehmoment der Seilkraft auszugleichen. Das bedeutet, hintere Schwerpunktlage begünstigt das Aufbäumen.
- g) Der Unterschied zwischen Stahl- und Kunststoffseilen ist bisher in diesem Zusammenhang wenig beachtet worden. Er ist überraschend hoch. Ein Stahlseil mit der erforderlichen Brucklast hat eine Masse von 8 - 10 kg/100m, dies ergibt bei 1000 m Länge hat eine Masse von 80 - 100 kg, die beim Anschleppen mit beschleunigt werden muss. Die dazu erforderliche Kraft reduziert die am Flugzeug ankommende Seilkraft. Zudem hat das schwere Seil am Boden eine Reibungskraft proportional zu seinem Gewicht zur Folge, die am Flugzeug ankommende Seilkraft zusätzlich um ungefähr die Hälfte der Beschleunigungskraft verringert. Beide, Beschleunigungs- und Reibungskraft, sind beim Kunststoffseil um einen Faktor 8 kleiner, da seine Masse entsprechend kleiner ist. Das Kunststoffseil begünstigt deshalb das Aufbäumen.

Man kann die sichere g -Beschleunigung im Zeitpunkt des Sporn-Abhebens durch die folgende Formel bestimmen:

$$\frac{S_{max}}{G} = \frac{t_m}{h} C_v \frac{\Delta C_a(Hlw)}{C_a}$$

S_{max} = Maximal erlaubte (am Flugzeug ankommende) Seilkraft beim Abheben

G = Fluggewicht

t_m = mittlere Flügeltiefe

h = Höhe des Schwerpunkts über der Schleppkupplung

C_v = Höhenleitwerks-Volumkoeffizient

$C_{a_{max}}(Hlw)$ = maximaler Auftriebsbeiwert des Höhenleitwerks

$C_{a_{Abh}}(Hlw)$ = Freiflug- C_a bei Abhebegeschwindigkeit

$\Delta C_a(Hlw) = C_{a_{max}}(Hlw) - C_{a_{Abh}}(Hlw)$ Verfügbarer Höhenleitwerks-Auftriebsbeiwert zum Ausgleich des Aufbäummoments

C_a = Auftriebsbeiwert des Flügels beim Abheben

Praktisch kann man davon ausgehen, dass die Beschleunigung von $0.5g$ beim Abheben nicht oft übertroffen wird. Insbesondere Doppelsitzer bekommen dabei selten Probleme. Man kann also die Aufbäum-Neigung in der Doppelsitzerschulung kaum spüren. Einsitzer haben bei ungefähr gleicher Schwerpunkthöhe kleinere Flügeltiefen als Doppelsitzer, außerdem werden sie oft mit höherer Beschleunigung angeschleppt. Die Aufbäumneigung ist dann höher als in der Schulung. Das muss unbedingt schon in der Schulung klar gesagt werden. Tatsächlich sind mit

Doppelsitzern keine Unfälle durch Überziehen im Windschlepp bekannt geworden. Glücklicherweise sind es auch bei Einsitzern nur wenige, aber jeder einzelne ist einer zu viel, denn diese Unfälle enden meist tödlich.

Wie aus der obigen Formel hervorgeht, ist die Gefahr entscheidend vom Flugzeugtyp und der Schwerpunktlage abhängig. Es gibt Segelflugzeuge, die in dieser Richtung besonders anfällig sind, z.B. Club-Libelle, Standard-Libelle, Phoebus C (mit hinterer Kupplungslage). Jedes Segelflugzeug muss also mit der obigen Formel ausgewertet werden. Dabei wird sich zeigen, dass manche Typen Werte $S_{max}/G = 0.25$ und sogar darunter haben. Die genannten Beispiele sind nicht vollständig. Piloten mit gefährdeten Flugzeugen müssen unbedingt mit dem Windenfahrer absprechen, dass sie sehr vorsichtig, also mit deutlich weniger als $0.5g$ angeschleppt werden. Insbesondere muss klar gesagt werden, mit starken Winden kann man viele Segelflugzeugen so anschleppen, dass sie den Kavalierstart und die damit verbundene Lebensgefahr nicht verhindern können. Es empfiehlt sich natürlich, dass im Cockpit solcher Flugzeuge ein Warnschild angebracht wird. Bis zu einer eindeutigen Regelung sind auf alle Fälle zwei Vorsichtsmaßnahmen zu empfehlen. Der Windenfahrer muss die gefährdeten Flugzeugtypen kennen und sie vorsichtig anschleppen. Die Piloten solcher Flugzeuge müssen dem Startleiter sagen, dass sie vorsichtig angeschleppt werden müssen.

Die Aufbäum-Neigung von Flugzeugen kann vermindert werden indem man den Roll-Anstellwinkel verkleinert, also den Sporn vergrößert und/oder das Fahrwerk weniger weit nach unten herausragen lässt. Dies ist aber nicht unbedingt sicher, denn im Anrollbereich können Bodenwellen vorhanden sein, die den Anstellwinkel vergrößern. Eine sichere Verbesserung kann man erreichen, indem man mit gefährdeten Typen möglichst mit vorderer Schwerpunktlage fliegt. Normale Feder- oder Flettner-Trimmungen kopflastig zu stellen, hilft dagegen nichts.

10 Der Übergangsbogen zum Steigflug

Der Übergangsbogen zum Steigflug muss immer besonders beachtet werden. Nicht umsonst heisst es in allen Vorschriften, ein abrupter Übergang in den Steigflug ist unbedingt zu vermeiden. Was steckt dahinter?

Der entscheidende Gesichtspunkt besteht darin, dass im Übergangsbogen die Flugbahn gekrümmt ist, wie bei einem Looping oder einem Abfangen aus schnellem Flug. Dabei entsteht eine Fliehkraft nach aussen, die nur durch eine zusätzliche Luftkraft ausgeglichen werden kann. Allerdings ist sie nicht so groß wie bei einem Looping oder einem harten Abfangen. Dort spürt man schon an der Sitzfläche, wie man durch die Fliehkraft nach unten gedrückt wird. Es gibt eine einfache Regel, wie man die g -Belastung infolge der Fliehkraft ausrechnen kann. Sie ist proportional zur Fahrt und zur Drehgeschwindigkeit, mit der sich die Nase anhebt, z.B. $10^\circ/\text{Sekunde}$. Dann fliegt man einen Übergangsbogen auf 40° Steigwinkel in vier Sekunden. Wenn dabei die Fahrt 90 km/h ist, dann ist die g -Belastung $10 \times 90 / 2023 = 0.445$. Es ist also eine zusätzliche Luftkraft entsprechend $0.445 g$ erforderlich. Die Seilkraft merkt kaum etwas davon. Aber der Ballast, der die gleiche Erhöhung der Luftkraft bewirken würde, ist allein 45 Prozent des Fluggewichts. Im Übergangsbogen ist also die Mindestgeschwindigkeit noch einmal um einiges höher als im stationären Schlepp mit dem gleichen Steigwinkel.

Glücklicherweise wird der Übergangsbogen am Anfang des Schleppts geflogen, also bei niedrigen Seilwinkeln geflogen. Aus dem rechten Diagramm von Abb. 4 kann man entnehmen dass bei den kleinen Seilwinkeln die Luftkraft ohne die Zentrifugalkraft noch relativ klein ist. Praktisch wird die größte Luftkraft immer im letzten Teil des Schleppts erreicht. Damit reichen die im Abschnitt über die Mindestgeschwindigkeiten angegebenen Werte auch für einen zahm oder

anständig geflogenen Übergangsbogen aus.

Hier muss natürlich etwas zu „zahn oder anständig“ gesagt werden. Das ist gar nicht so einfach, denn es müssen wieder die verschiedensten Winden und damit Seilkräfte berücksichtigt werden. Zunächst muss geklärt werden, wann der Übergangsbogen beginnt. Die Regel besagt, nach dem Abheben muss zuerst ohne wesentliches Steigen Fahrt bis $1.2V_{s1}$ aufgeholt werden. Das bedeutet man steigt „in sich“, gegen einen Steigwinkel von wenigen Grad (bis ungefähr 5° ist dabei kaum etwas einzuwenden. Normalerweise wird diese Geschwindigkeit in 1 bis 2 Sekunden erreicht. Diese Vorschrift ist keineswegs eine Schikane sondern eine entscheidende Voraussetzung für einen sicheren Schlepp.

Ich habe gelegentlich von einem Fluglehrer gehört, der von seinen Flugschülern verlangt hat, das Segelflugzeug mit hoher Beschleunigung aus dem Gras zu reißen, da man sonst an dem kurzen Platz nicht genügend Höhe bekomme. So etwas mag bei einer schwachen, stark unteretzten Winde ganz vielleicht ohne tödlichen Unfall abgehen, ist aber auf alle Fälle unverantwortlich, ganz abgesehen davon dass direkt nach dem Abheben stark zu ziehen mit Sicherheit nicht zur optimalen Höhe führt weil man in dem damit programmierten überzogenen Flugzustand gar nicht vernünftig steigen kann.

Nach dem Erreichen von $1.2V_{s1}$ kann man vorsichtig den Steigwinkel erhöhen, in dem Maß in dem die Fahrt zunimmt. Dies kann man als den Beginn des Übergangsbogens auffassen (muss das aber nicht). In jedem Fall ist dies aber eine entscheidende Phase des Schlepps. Hier bemerkt man, wie schnell die Fahrt zunimmt und kann dementsprechend langsamer oder schneller seinen Steigwinkel erhöhen. Steigt die Fahrt mühsam auf $1.3V_{s1}$, dann hat man eine relativ kleine Seilkraft, die erreichte Fahrt reicht schon als Minimalgeschwindigkeit aus und der Übergangsbogen ist schon beendet. Man versucht dann, die erreichte Fahrt zu halten, vor allem nicht langsamer zu werden. Sowie man langsamer wird, muss man weniger ziehen und Fahrt aufholen. Man wird bemerken, dann man keinen großen Steigwinkel erreicht, der Übergangsbogen umfasst kaum 30° und kann gefahrlos in drei Sekunden geflogen werden.

Nimmt nach dem Erreichen von $1.3V_{s1}$ die Fahrt weiter zu, dann ist die Seilkraft und damit auch die Minimalgeschwindigkeit höher. Jetzt kann man vorsichtig etwas mehr ziehen. Dabei kommt es besonders darauf an, dass der Steigwinkel nicht zu schnell erhöht wird, da einerseits die Fahrt und damit die g -Beschleunigung infolge der Fliehkraft höher ist und andererseits höherer Steigwinkel schon höhere Seil- und Luftkräfte verlangt. Damit erhöhen zwei Einflüsse die Minimalgeschwindigkeit. Erst wenn man sicher ist, dass man die für die vorhandene Seilkraft geltende Minimalgeschwindigkeit des gesamten Schlepps überschritten hat, kann man versuchen, so zu steigen, dass die Fahrt konstant bleibt. Man kann auch diesen Zeitpunkt als Beginn des Übergangsbogens ansehen.

Normalerweise weiss man schon vorher, wie stark die Winde ist, von der man geschleppt wird, und kennt damit die Minimalgeschwindigkeit die man im ganzen Schlepp beachten muss. Man kann dann, wenn die Winde die hohe Seilgeschwindigkeit überhaupt bringt, zielsicher die Fahrt ohne großes Steigen über diesen Minimalwert erhöhen und dann erst einen deutlichen Übergangsbogen beginnen. Dabei ist aber im Übergangsbogen die g -Beschleunigung hoch, bei 120 km/h und $10^\circ/\text{sec}$ schon $0.6g$. Die Fahrt wird aber im ersten Teil des Übergangsbogens noch zunehmen. Man wird also bezüglich Minimalgeschwindigkeit keine Schwierigkeiten bekommen. Dagegen erreicht man mit hoher Seilkraft und hoher g -Beschleunigung Flugzeug- und Kupplungsbelastungen, die man nicht mehr vernachlässigen kann.

Es ist deshalb zu empfehlen, den Übergangsbogen nicht so spät zu beginnen, sondern nach Erreichen von $1.2V_{s1}$ den Steigwinkel schon vorsichtig zu erhöhen, in dem Maß in dem die Fahrt zunimmt. Vorsichtig bedeutet, dass die zunehmende Minimalgeschwindigkeit, siehe oben,

beachtet werden muss. Wenn dann noch Steigwinkel bis 50° erreicht werden, sind 4 Sekunden für den gesamten Übergangsbogen zu kurz,

Man muss auch immer daran denken, dass im zweiten Teil des Übergangsbogens der Spielraum abnimmt, den die im Abschnitt 6 angegebene Formel lässt. Man muss also dort die Rotationsgeschwindigkeit reduzieren. Für Piloten mit etwas fliegerischem Gefühl muss man das kaum betonen, denn sie bewegen unbewusst automatisch das Höhenruder langsamer, feinfühlicher, wenn sie schneller fliegen, außerdem ist in diesem Teil des Schleppts das Drehmoment der Seilkraft meist kopflastig was die Piloten zu vorsichtigerem Ziehen veranlasst.

Zusammenfassend kann man sagen, dass auch für die Rotationsgeschwindigkeit oder die Zeitdauer des Übergangsbogens keine allgemeine Regel angegeben werden kann. Vielmehr muss man wissen und schon in der Schulung lernen, dass „zahn oder anständig“ für den Übergangsbogen je nach Seilkraft und Steilheit des Schleppts sehr unterschiedliche Anforderungen bedeuten kann. Wichtig ist eben, wie in vielen anderen Situationen, ein gefühlsvolles Fliegen, auf das in der Schulung aus vielen Gründen großer Wert gelegt werden muss.

11 Geschwindigkeitstelemetrie

Es ist anscheinend in der Vergangenheit gelegentlich untersucht worden, was eine Telemetrie der Fahrt zur Winde beim Windenschlepp helfen kann, z.B. von M. Schmidt, Zwickau. Ernst Schöberl hat dies 2008 aufgegriffen und weiter propagiert. Inzwischen bietet die britische Firma Skylaunch das bordseitig erforderliche Telemetriegerät und den windenseitigen Empfänger mit Anzeige zum Verkauf an. Es gibt schon einige Segelflugzeuge und Winden mit den entsprechenden Geräten.

Die Fahrt ist für den Windenfahrer eine zusätzliche Information. Man muss ihm aber auch sagen, wie er damit umgehen soll. Ernst Schöberl hat berichtet, dass er je 10 km/h mehr Fahrt 50 m mehr Höhe erreicht. Auch andere Piloten stimmen dem zu. Daraus kann sofort geschlossen werden, dass die Angabe der gewünschten Fahrt nicht alles sein kann. Die Piloten, die schneller geschleppt werden wollen, wollen also auch mehr ziehen, ohne dass darüber gesprochen wird. Das bedeutet aber, der Windenfahrer muss mehr Gas geben und damit eine höhere Seilkraft liefern, so dass der Pilot mehr Fahrt erreicht und mehr ziehen kann. Damit ist auch klar, für so einen „schnelleren“ Schlepp muss auch eine höhere Sollbruchstelle benützt werden.

Nach den klaren Regeln von Abschnitt 7 kann man das einfacher machen. Der Pilot sagt dem Windenfahrer „gib mal etwas mehr Gas, ich nehme eine höhere Sollbruchstelle“. Er fliegt dann eine höhere Fahrt, weil seine Minimalgeschwindigkeit höher ist. Erreicht wird das gleiche, nur ohne Telemetrie. Ganz allgemein ist es problematisch, den Windenfahrer in die Steuerung der Fahrt mit einzubeziehen. Der Pilot hat da immer die besseren Karten, er kann die Fahrt viel leichter steuern. Wenn er nicht richtig zieht, kann der Windenfahrer weniger Gas geben was kleine Ausklinkhöhen ergibt. Wenn der Pilot zu viel und zu früh zieht darf er gerade nicht beliebig Gas geben, siehe Abschnitt 7. Es bleibt auch mit Telemetrie die zentrale Regel gültig, dass der Pilot seine Fahrt steuert und für sie verantwortlich ist. Dies muss in der Ausbildung und im praktischen Betrieb ständig klar sein. Die Telemetrie der Fahrt ist für den Windenfahrer sicher eine gute Information, die ihm zeigt dass der Pilot richtig reagiert. An der Verantwortung des Piloten für die Fahrt darf dies aber nichts ändern.

12 Der Seitenfaden

Den Seitenfaden hat schon in den Fünfziger-Jahren Ernst Günther Haase angewandt erprobt und darüber berichtet. Später hat ihn auch Helmut Reichmann benützt und wieder darüber berichtet. Durchgesetzt hat er sich damals nicht. In den letzten Jahren wird er wieder erprobt und propagiert, auch für den Windenschlepp. Dies geht so weit, dass gelegentlich verlangt wird, ihn allgemein vorzuschreiben. In einem Artikel wird sogar vorgeschlagen, ihn auch im Schnellflug zu beachten um Überbelastungen zu vermeiden. Es sieht so aus als wären alle die ihn nicht benutzen schlicht nicht gut informiert oder rückständig. Hier muss man nun doch objektiv sein und darf auch fragen, ob es vielleicht Gründe gibt weshalb er sich bisher nicht durchgesetzt hat. Dann bemerkt man rasch, ein Allheilmittel ist er sicher nicht. Zum Beispiel ändert sich seine Lage im Schnellflug kaum mehr. Dort bleibt der Fahrtmesser die einzige zuverlässige Anzeige. Es gibt noch weitere Schwächen.

Der Seitenfaden ist ein sehr einfaches Gerät und kostet fast nichts. Er wird seitlich an der Haube angebracht und im Flug straff nach hinten geweht. Seine Lage hängt im schiebefreien Flug nur vom geflogenen Anstellwinkel ab und berücksichtigt Ballast und Schräglage im Kreisflug automatisch. Es wird allgemein beschrieben, man muss nur markieren, wo er im freien Geradeausflug steht, wenn man zieht bis kurz vor dem Abkippen. Dann stellt diese Lage eine vorzügliche Überziehwarnung dar, unabhängig von Wasserballast und Schräglage im Kreisflug. Hier muss nun doch schon zur Vorsicht gemahnt werden. Die höhere Geschwindigkeit durch Ballast und Schräglage erhöht selbst bei gleichem Anstellwinkel die Reynoldszahl. Dadurch kann sich die Strömung am Flügel ändern. Das wird wohl sehr selten der Fall sein und bei den heutigen Segelflugzeugen mit soft stall keine Rolle spielen. Vergessen sollte man diese Tatsache aber nicht, insbesondere bei älteren Flugzeugen, die gelegentlich hard stall oder plötzliches Abkippen aufweisen. Ähnlich ist es mit der Wölbklappenstellung. Bis jetzt hat sich wohl gezeigt dass eine Fadenstellung für alle Klappenstellungen ausreicht. Hier ist aber noch mehr Vorsicht geboten als bei der Reynoldszahl. Generell besteht die Tendenz dass positive Klappenstellungen das Überziehverhalten härter machen. Es empfiehlt sich, die Fadenlage für positive Klappenstellungen einzurichten und zu benützen. Ausgesprochen kritisch wird die Situation wenn ein Pilot mit weniger Erfahrung zum Beispiel in einem Flugzeug mit hartem Überziehverhalten im Kreisflug zu langsam wird, und beginnt seitlich abzuschmieren. Dann kann der Seitenfaden als Überziehwarnung glatt versagen, denn er ist nur im schiebefreien Flug brauchbar. Jedenfalls möchte ich klar davor warnen, den Seitenfaden allgemein als Überziehwarnung einzusetzen.

Ist deshalb der Seitenfaden allgemein unbrauchbar? Nein! Leistungs- und Wettbewerbspiloten schätzen ihn vor allem im Kreisflug. Man weiss seit langer Zeit, dass der optimale Kreisflug, vor allem wenn aus Wettergründen eng und steil gekreist wird, sehr nahe am C_{amax} geflogen wird. Wer also den Mittelfaden im Kreisflug sicher kontrolliert, für den ist der Seitenfaden sehr nützlich. Er berücksichtigt Schräglage und Ballast automatisch. Es empfiehlt sich aber, mit ihm ausgiebig Erfahrung zu sammeln bevor man ihn im Pulk benützt. Viele Piloten (ich auch) lassen gerne im Kreisflug den Mittelfaden leicht nach außen stehen. Dann hängt die optimale Lage des Seitenfadens von der Kreisrichtung ab. Das muss man sicher im Griff haben wenn man wirklich die letzte Steiggeschwindigkeit herausholen will, ohne ein Risiko einzugehen.

Was gilt nun für den Seitenfaden im Windenschlepp? Der optimale Anstellwinkel im Schlepp ist nahe am maximal fliegbaren. Der Seitenfaden würde erlauben, in jeder Phase des Schleppts nahe an diesem Limit zu fliegen. Sowie aber Seitenwind ausgeglichen werden muss, gilt das nicht mehr. Dabei ist oft ein Schieben nicht zu vermeiden. Der leeseitige Faden, also derjenige zu dem der Mittelfaden hinzeigt, steht tiefer als im schiebefreien Flug, der luvseitige höher.

Wenn man nur einen Faden anbringt, dann ist seine Anzeige nur gültig, wenn gleichzeitig der Mittelfaden in der Mitte steht. Man muss also sehr sorgfältig untersuchen und erproben, ob der Seitenfaden im Windenschlepp allgemein empfohlen werden kann. Damit darf er auch bei Seitenwind keine zusätzlichen Risiken mit sich bringen. Beispielsweise könnte ein Pilot bei Seitenwind versehentlich nur den leeseitigen Faden beachten und dadurch überziehen. Mit dem luvseitigen ist man auf der sicheren Seite. Man muss also sicherstellen, dass ständig zwei Fäden und der Fahrtmesser beachtet werden. Zumindest in der Schulung und bei weniger erfahrenen Piloten mit Schein ist es wahrscheinlich einfacher, die Minimalgeschwindigkeit zu kennen und nur nach der Fahrtmesseranzeige zu fliegen.

13 Böen

Segelfliegen ist immer mit Böen verbunden. Speziell in der Nähe von thermischen Aufwinden ist es immer böig. Für Motorflugzeuge sind die Aufwinde oft die unangenehmsten Böen. Ich habe vor vielen Jahren einmal einen Flug in einer DC 3 mitgemacht, die eine Höhe zugeteilt bekam, um die 200 m unterhalb der Basis von vielen Bilderbuch-Cumuli, die mich fast sehnsüchtig machten. Die gesamten Passagiere hatten allerdings wenig Spass daran. Sie wurden alle Augenblicke in den Sitz gedrückt und gleich darauf nach oben gerissen, so dass sie im Gurt hingen. Sie hatten große Probleme, nicht nur mit spucken, viele waren am Rand ihrer Möglichkeiten. Ich saß in der ersten Reihe und fragte den Piloten, ob er sich nicht 1000 Fuss mehr Höhe geben lassen könne. Er funkte er kurz und stieg über die flachen Cumuli, das ging damals leicht. Ich wurde dann als Retter gefeiert.

Spass beiseite, auch im Windenschlepp muss mit Böen gerechnet werden. Es wurde deshalb vorgeschlagen, die Minimalgeschwindigkeit um 15 km/h über dem in Abschnitt 6 begründeten Wert festzulegen. Dies halte ich allerdings für unangemessen. Damit bekommen viele Winden Schwierigkeiten, die Seilgeschwindigkeit im unteren Teil des Schlepps aufzubringen. Jeder Pilot muss in jeder Situation wissen, wie weit er über der Minimalgeschwindigkeit bleibt, im Kreisflug wird er beispielsweise versuchen, nahe dran zu bleiben. Im Pulk wird man etwas schneller kurbeln als allein, damit man sicher nicht aus seinem Kreis fällt.

Im Windenschlepp sind vor allem Böen von hinten gefährlich weil sie die Fahrt vermindern. Allerdings sind keine Windenunfälle bekannt, die auf Böen zurückzuführen sind. Dabei gibt es Plätze, in deren Nähe gehäuft Scherströmungen und damit gefährliche Böen auftreten, meist in den Alpen, oder in der Nähe von Waldrändern. Auf solche Gefahren wird man am jeweiligen Platz deutlich hingewiesen und bekommt gesagt, wie man gefährliche Flugzustände vermeidet. Zudem besagen die klaren Regeln, dass man sofort nachdrückt, wenn die Fahrtmesseranzeige zurückgeht.

Diese Angelegenheit muss man wohl noch weiter diskutieren. Mein Vorschlag bleibt, die in Abschnitt 6 begründete Minimalgeschwindigkeit zu beachten, die ja schon eine gewisse Sicherheit enthält.

14 Motoren mit speziellen Regelungen

Normale Motoren werden nur durch einen Gashebel oder ein Gaspedal gesteuert. Dies kennt jeder Autofahrer. Dabei kann man davon ausgehen, dass mehr Gas auch immer mehr Drehmoment bedeutet. Das Drehmoment, das die Seilkraft liefert, hängt dabei allerdings noch von der Drehzahl ab. Für viele Motoren gibt es diesen Zusammenhang wenigstens für Vollgas. Die

Linie des Drehmoments in Abhängigkeit von der Drehzahl hat immer einen höchsten Punkt, das maximale Drehmoment und die zugehörige Drehzahl. Oberhalb dieser Drehzahl nimmt das Drehmoment mit steigender Drehzahl meistens mehr ab als unterhalb mit fallender Drehzahl. Oft existieren Begrenzungen der Drehzahl damit der Motor nicht überdrehen kann. Bei der Grenzdrehzahl nimmt das Drehmoment stark ab. Dies ist für Winden nur im untersten Teil des Schleppts interessant, wo die höchsten Seilgeschwindigkeiten auftreten. Alle Motoren haben auch eine niedrigste Drehzahl unterhalb derer sie abgewürgt werden. Diese Drehzahl ist meist gar nicht so niedrig. Sie wird leicht im obersten Teil des Schleppts erreicht, wo die Seilgeschwindigkeit sehr klein wird, besonders bei Gegenwind. Fast alle Winden haben deshalb einen Wandler, der einen Schlupf zwischen Motor und Trommel erzeugt, so dass die Seilgeschwindigkeit niedriger sein kann als es der minimalen Motordrehzahl entspricht. Allerdings wird durch diese Wandler das Drehmoment verstärkt. Dadurch steigt die Linie der Seilkraft in diesem Bereich stark an. Der Wandler arbeitet auch beim Anschleppen, aber nur kurz und bei niedriger Motorleistung, so dass dort keine zu hohen Seilkräfte entstehen.

Oft wird auch eine Linie der Leistung über der Drehzahl angegeben, die durch $\text{Drehzahl} \times \text{Drehmoment}$ bestimmt ist. Die Drehzahl der höchsten Leistung ist immer höher als diejenige des höchsten Drehmoments. Nur für wenige Motoren kann man das bekommen, was den Windenfahrer interessiert, nämlich die Linien des Drehmoments über der Drehzahl für feste Gasstellungen unterhalb von Vollgas. Bei den wenigen Motoren, für die solche Diagramme zugänglich sind, hat man den Eindruck, dass bei niedrigen Gasstellungen größere Bereiche mit ungefähr konstantem Drehmoment vorhanden sind. Es sieht so aus, als ob dort mit konstanter Gasstellung der idealen Situation näher kommt, nach der man mit möglichst konstantem Drehmoment schleppen soll.

Mit solchen Motoren schleppt man seit fast 60 Jahren, und jeder Windenfahrer hat mit der Zeit ein Gefühl dafür bekommen, mit welcher Gasstellung man die unterschiedlichen Segelflugzeuge schleppen muss. Dies ist bei älteren Winden nicht so schwierig, mit denen man Doppelsitzer mit Vollgas schleppt und Einsitzer nicht weit darunter. Nachdem inzwischen wesentlich stärkere Motoren eingebaut werden, ist es nicht mehr so leicht, die richtige Gasstellung für die einzelnen Flugzeuge zu finden. Anscheinend gelingt dies den meisten Windenfahrern ganz gut.

Für schwere Fahrzeuge hat man Motoren mit automatischen Regelungen entwickelt. Der Fahrer gibt dann nur noch einen Sollwert für die sogenannte Regelgröße ein, zum Beispiel die Drehzahl. Der Regler misst dann den Istwert der Regelgröße, vergleicht ihn mit dem Sollwert und berechnet Gasstellungen, mit denen er möglichst rasch den Sollwert erreicht. Wenn die Regelgröße die Drehzahl ist spricht man von drehzahlgeregelten Motoren. Zusammen mit automatischer Gangschaltung führt das zur Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit, die man auch bei Personenwagen findet, oft Speedomat genannt.

Eine andere Regelgröße ist das Drehmoment des Motors, was drehmomentgeregelte Motoren ergibt. Hier wird es nun für die Winden interessant, denn das Drehmoment des Motors erzeugt die Seilkraft. Wenn man indirekt den Sollwert der Seilkraft vorgeben kann, dann ist man dem idealen Schlepp mit konstanter Seilkraft sehr nahe. Der Windenfahrer muss dann nur beim Anschleppen die Seilkraft sorgfältig dosieren. Im Steigflug muss er nur einen zur Sollbruchstelle und dem Fluggewicht des geschleppten Flugzeugs passenden Wert der Seilkraft einstellen, den er bis zum Einsetzen des Wandlers stehen lassen kann. Um das Gas kümmert er sich gar nicht mehr, er kann es gar nicht mehr selbst beeinflussen. Diese Seilkraftregelung ist übrigens für Drachenschleppts vorgeschrieben, dort gibt es gar nicht anderes.

Besonders einfach kann man solche Regelungen bei Elektromotoren realisieren, denn man misst

dort ohnehin einige elektrische Größen, die man zu Regelung verwenden kann.

Hier muss nun klar gesagt werden, dass drehmomentgeregelter Motoren zum Windschlepp gut geeignet sind, drehzahlgeregelter dagegen nicht. Da die Seilgeschwindigkeit während des Schlepps stark abnimmt, müsste man bei ihnen ohnehin den Sollwert ständig verstellen. Was aber noch viel mehr Probleme schafft ist die Reaktion des Reglers, wenn man eine höhere Soll-Drehzahl vorgibt als sie momentan vorhanden ist. Dann wird der Regler sofort mehr Gas geben, ohne dass der Windenfahrer dies bemerken oder verhindern kann. Bei starken Winden wird das sehr rasch zum Bruch der Sollbruchstelle führen, und zwar in den gefährlichsten Situationen. Im umgekehrten Fall wird das Gas stark zurückgeregelt, der Pilot muss stark nachdrücken, wenn er nicht in überzogene Flugzustände kommen will. Winden mit drehzahlgeregelten Motoren dürfen deshalb nicht zugelassen werden.

15 Sollbruchstellen

Die Sollbruchstellen im Seil sorgen dafür, dass das geschleppte Segelflugzeug nicht überlastet wird. Die Schleppkupplung im Segelflugzeug muss gemäß Bauvorschrift JAR 22 so befestigt sein, dass sie eine Seilkraft von 1,95 G mit Sicherheit aushält. Man kann leicht ausrechnen, mit dieser Seilkraft das Segelflugzeug nicht so hoch belastet wird wie bei den vorgeschriebenen Böen- und Abfang-Lastfällen. Leider kann die JAR 22 so ausgelegt werden, dass viel niedrigere Nennlasten in den Flug- und Betriebshandbüchern stehen können. Dies hat zur Folge, dass gelegentlich Sollbruchstellen im Schlepp reißen, zumal sie nach einigen Starts vorbelastet sind und weit unterhalb der Nennlast reißen können. Die Firma Tost empfiehlt, nicht mehr als 100 Starts mit einer Sollbruchstelle durchzuführen. Trotzdem passieren nach Sollbruchstellen-Versagen immer wieder Unfälle, wenn nicht schnell genug nachgedrückt wird. Auch wenn alles gut geht, werden Kunststoffseile durch plötzliche Entlastung möglicherweise beschädigt. Hohe Nennlasten der vorgeschriebenen Sollbruchstellen sind also ein Beitrag zur Sicherheit und zur Schonung von Kunststoffseilen. Ganz nebenbei ermöglichen sie auch größere Ausklinkhöhen. Es sollte also dringend angestrebt werden, hohe Nennlasten zuzulassen. Insbesondere muss klargestellt werden, dass hohe Nennlasten schwere Unfälle vermeiden können.

Ich will nicht bestreiten, dass die im Handbuch stehenden Nennlasten nicht immer eingehalten werden. Sollte es in diesem Zusammenhang zu Gerichtsprozessen kommen, wenn bei einem Windschlepp-Unfall eine höhere als die vorgeschriebene Sollbruchstelle benützt wurde, dann kann ein fachkundiger Gutachter auf alle Fälle nachweisen, dass dies mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht die Unfallursache gewesen sein kann.

16 Vorhalten bei Seitenwind

Die meisten Segelflugplätze haben nur eine Startbahn und damit zwei Startrichtungen. Damit ist nicht zu verhindern, dass Windenstarts mit einer oft erheblichen Seitenwindkomponente durchgeführt werden müssen. Rückenwindkomponenten muss man vermeiden, indem man „umbaut“, also die Startrichtung um 180 Grad ändert.

Bei einem Windenstart mit Seitenwind muss der Pilot gegen den Seitenwind vorhalten, damit das Seil mit seinem Schirm nach dem Ausklinken nicht zu weit abgetrieben wird und möglicherweise sogar außerhalb des Flugplatzes herunterfällt. Dieses Vorhalten kann mit Seiten- und Querruder erreicht werden. Ein wesentlicher Gesichtspunkt ist dabei, den Mittelfaden in der Mitte zu halten. Einerseits wird dadurch die maximale Ausklinkhöhe erreicht, zudem kann ein

Seitenfaden nur dann eine zuverlässige Anzeige liefern und damit hilfreich sein. Siehe hierzu auch Abschnitt 12. Es muss sorgfältig erprobt werden ob es schon bei der Windenschlepp-Schulung möglich ist, den Mittelfaden im Windenschlepp in der Mitte zu halten.

17 Zusammenfassung

Der Windenschlepp an der Schwerpunktkupplung ist eine beliebte, billige, umweltfreundliche Startart für Segelflugzeuge seit fast 60 Jahren. Leider gibt es dabei auch schwere Unfälle, die besonders in den letzten Jahren wieder zugenommen haben. Daran sind neue starke Winden besonders beteiligt, auch Elektrowinden. Es könnten auch Vorschriften beteiligt sein, die für die neuen starken Winden nicht mehr gelten. Es ist also dringend nötig die Risiken des Windenschlepps genau zu beschreiben und in die Köpfe aller Piloten und Fluglehrer zu hämmern. Dies ist in erster Linie die höhere Minimalgeschwindigkeit im Schlepp und das vorsichtige Anschleppen bis nach dem Abheben zur Vermeidung von unbeabsichtigten Kavaliertarts. Es bleibt zu hoffen, dass der vorliegende Text zur Sicherheit, aber auch zu höheren Ausklinkhöhen beitragen kann.

Es hat sich bei allen Untersuchungen gezeigt, dass die von der Winde erzeugte Seilkraft eine entscheidende Rolle spielt, die bisher kaum gemessen wurde. Neuere Entwicklungen zur Messung der Seilkraft und einer Anzeige derselben für den Windenfahrer können Sicherheit und Effektivität erhöhen. Diese Entwicklung sollte nach Kräften unterstützt werden.