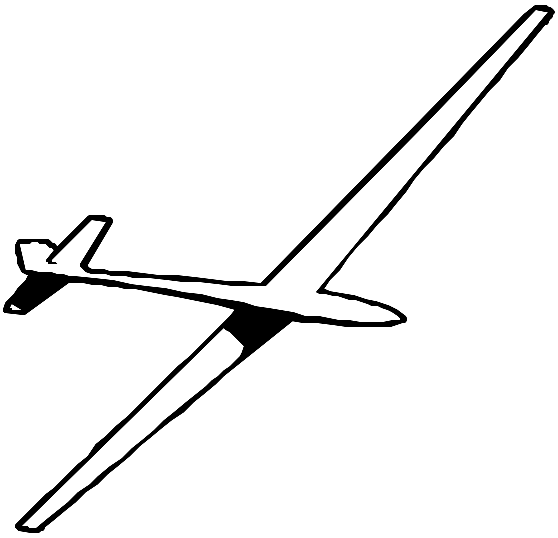
Gedanken zum Kreisflug in der Thermik

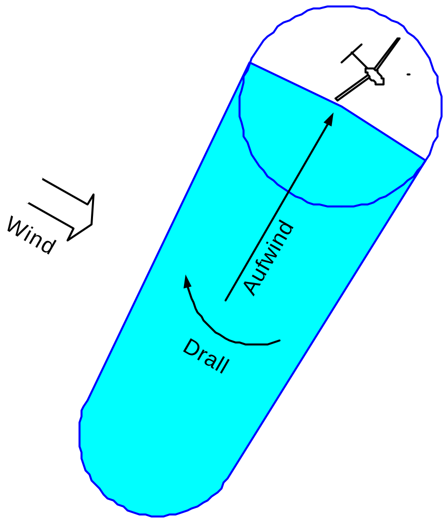


1 Vorwort

Dieser Beitrag soll ermutigen, in der Thermik auch mal steiler zu kreisen. Es wird gezeigt, dass in gewissen Bereichen mit Erhöhung der Schräglage (i.e. des Rollwinkels) der Kurvenradius gewaltig verkleinert werden kann ohne das Eigensinken unseres Modells nennenswert zu vergrößern. Unter der Annahme dass das Steigen des Aufwindes zum Zentrum des Bartes zunimmt (warum kreisen die großen Segelflieger wohl immer so eng?) wird das effektive Steigen unseres Flugmodells durch die Radiusverkürzung bemerkenswert vergrößert. Damit dieser Beitrag nicht zu theoretisch gerät wird auch mit den Zahlenwerten eines Beispielmodells und einem fiktiven „Bart“ gearbeitet.

1.1 Was ist ein Bart?

Der Begriff „Bart“ stammt aus der manntragenden Segelfliegerei. Er bezeichnet eine aufsteigende schlauchförmige Luftblase die man wie folgt charakterisieren kann:



- Der Schlauch hat einen kreisförmigen Querschnitt.
- In diesem Schlauch strömt (warme) Luft nach oben, dies wird Aufwind genannt.
- Die Geschwindigkeit des Aufwindes nimmt zum Zentrum des kreisförmigen Querschnittes zu.
- Herrscht Wind, dann steht dieser Schlauch nicht senkrecht, sondern geneigt im Raum.
- Der Aufwind hat einen Drall, dieser wird durch den Wind noch verstärkt.

2 Sinkflugpolare des Beispielmodells

Betrachten wir zunächst einmal die Sinkflugpolare eines beliebigen Modells, hier in etwa ein großer HLG. [1]. Diese zeigt die Sinkgeschwindigkeit über der Fluggeschwindigkeit und ist in Fig. 1 dargestellt.

Bekanntermaßen sinkt ein Modell um so weniger, je langsamer wir fliegen. Fliegen wir aber zu langsam, reißt die Strömung ab und das Modell fällt nach unten durch. Aus Fig. 1 können wir nun entnehmen, dass wir die geringste Sinkgeschwindigkeit von ungefähr 0.33 m/sec bei einer Fluggeschwindigkeit (v) von 5.4 m/sec erreichen.

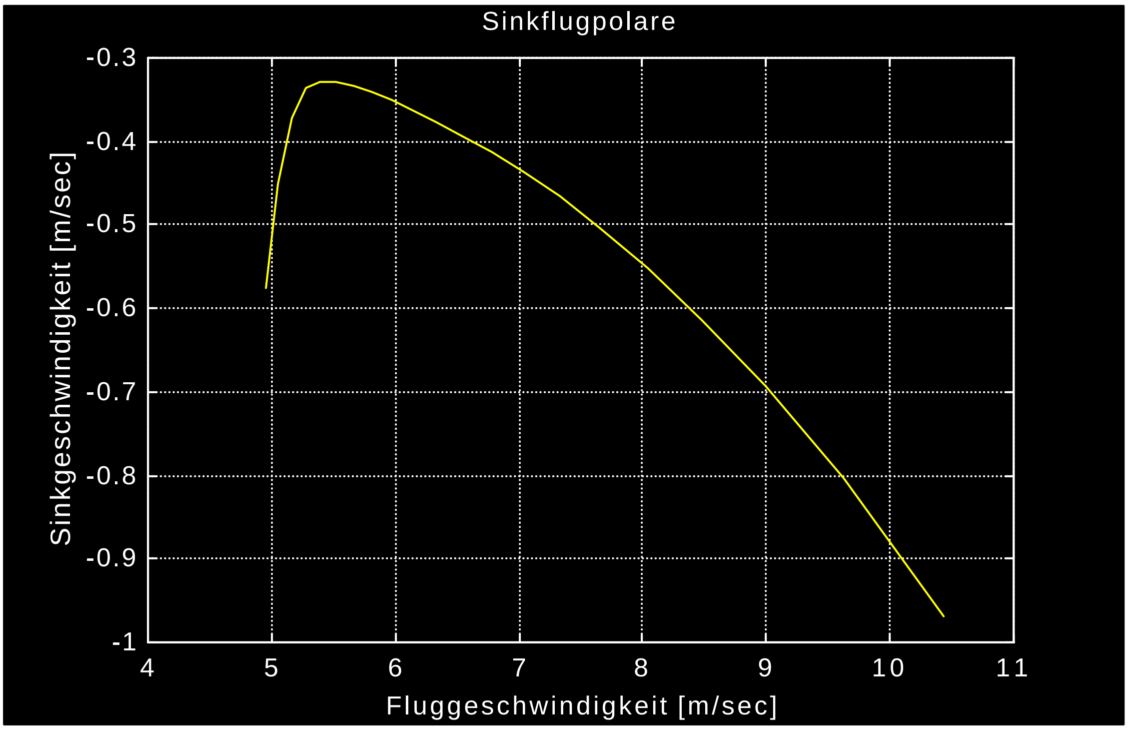
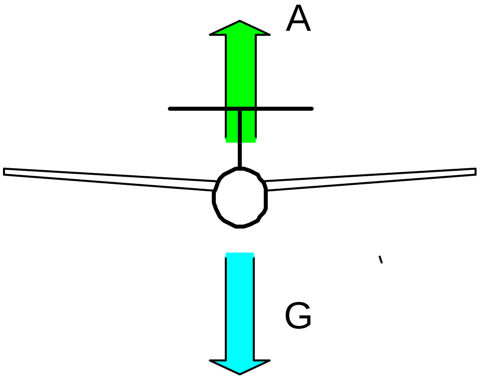


Fig. 1: Sinkflugpolare des Beispielmodells

[1] Beispiel HLG
Spannweite = 2m
Streckung := 12
Gewicht :=600g
Profil = S3021 (wie man am Abfall der Sinkgeschwindigkeit im Langsamflug sieht, wohl bedingt durch die sehr kleinen Re-Zahlen, ist dieses Profil in dieser Anwendung nicht die beste Wahl
Rumpf-, Leitwerk- und Interferenz-Widerstände optimistisch eingeschätzt.

3 Geradeausflug

3.1 Beziehungen und Größen im Geradeausflug



Im stationären Geradeausflug, d.h. bei konstanter Schräglage i.e. Rollwinkel gleich Null und bei konstanter Fluggeschwindigkeit (**v**) ist der Auftrieb (**A**) immer gleich dem Gewicht (**G**) unseres Modells.
I

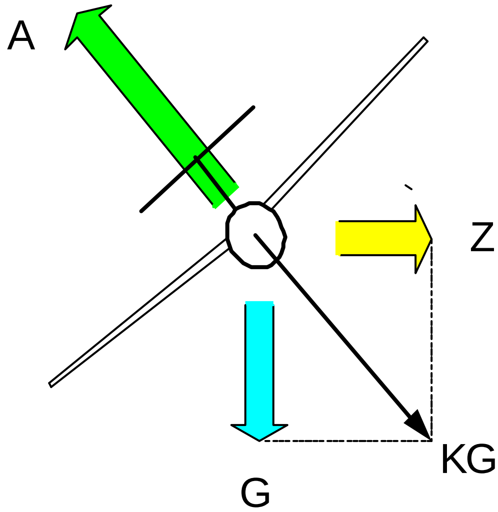
3.2 Strategie 1

Fliegen wir geradeaus durch ein Aufwindfeld würden wir es mit der Geschwindigkeit des geringsten Sinkens unseres Modells durchfliegen (hier 5.4 m/sec) damit unser Optimierungsziel, das maximale Steigen, erzielt wird.

4 Kurvenflug

Wollen wir einen „Aufwind-Bart auskurbeln" fliegen wir bekanntlich Kurven. Entgegen mancherorts geäußerten abstrusen Theorien wollen wir die Kurven immer „scheinlotrichtig" fliegen. Die manntragenden Segelflieger achten immer peinlich genau auf das „Fädchen" oder die Libelle welche das Scheinlot anzeigen! Und sie tun dieses in erster Linie aus Steigleistungsgründen und nicht aus Sicherheitsgründen!

4.1 Beziehungen und Größen im Kurvenflug



Im Kurvenflug kommt neben der Gewichtskraft (**G**) noch eine weitere Kraft, nämlich die Zentrifugalkraft (**Z**) hinzu. Diese steht orthogonal auf der Gewichtskraft. Beide Kräfte bilden eine Resultierende die manchmal auch das Kurvengewicht (**KG**) genannt wird.

Fliegen wir scheinlotrichtig, stationär eine Kurve, ist der Auftrieb (**A**) im „gleichen" Winkel dem Kurvengewicht (**KG**) entgegengesetzt. Wie wir weiteres sehen können ist nun der Betrag des Auftriebs **größer** als der Betrag des Gewichtes (**G**).

4.2 Strategie 2

Ein Segelflugzeug kann die für den stationären Kurvenflug notwendige Auftriebserhöhung nur durch Erhöhung der Fluggeschwindigkeit ($A := v^2$) herbeiführen. Dabei verschiebt sich unser Arbeitspunkt auf der Polare in Fig. 1 von den ursprünglichen 5.4 m/sec weiter nach rechts, und damit nimmt auch das Eigensinken des Modells zu. Wichtig ist, wir fliegen dabei nicht schneller als es zur Kompensation der notwendigen Auftriebserhöhung nötig ist!

4.3 Fluggeschwindigkeit in Abhängigkeit des Rollwinkels

Glücklicherweise haben wir uns dafür entschieden, scheinlotrichtig zu kreisen. Denn dafür kann man relativ einfache physikalische Beziehungen aufstellen. Im Anhang A werden die grundlegenden Formeln angegeben.

In Fig. 2 wird für verschiedene Rollwinkel die prozentuale Fluggeschwindigkeitserhöhung, bezogen auf die Geschwindigkeit für das geringste Sinken, dargestellt. Durch die in Frage kommenden physikalischen Beziehungen gilt diese „normierte“ Darstellung für jedwedes Segelflugzeug, egal ob HLG Modell oder manntragenden Nimbus 4.

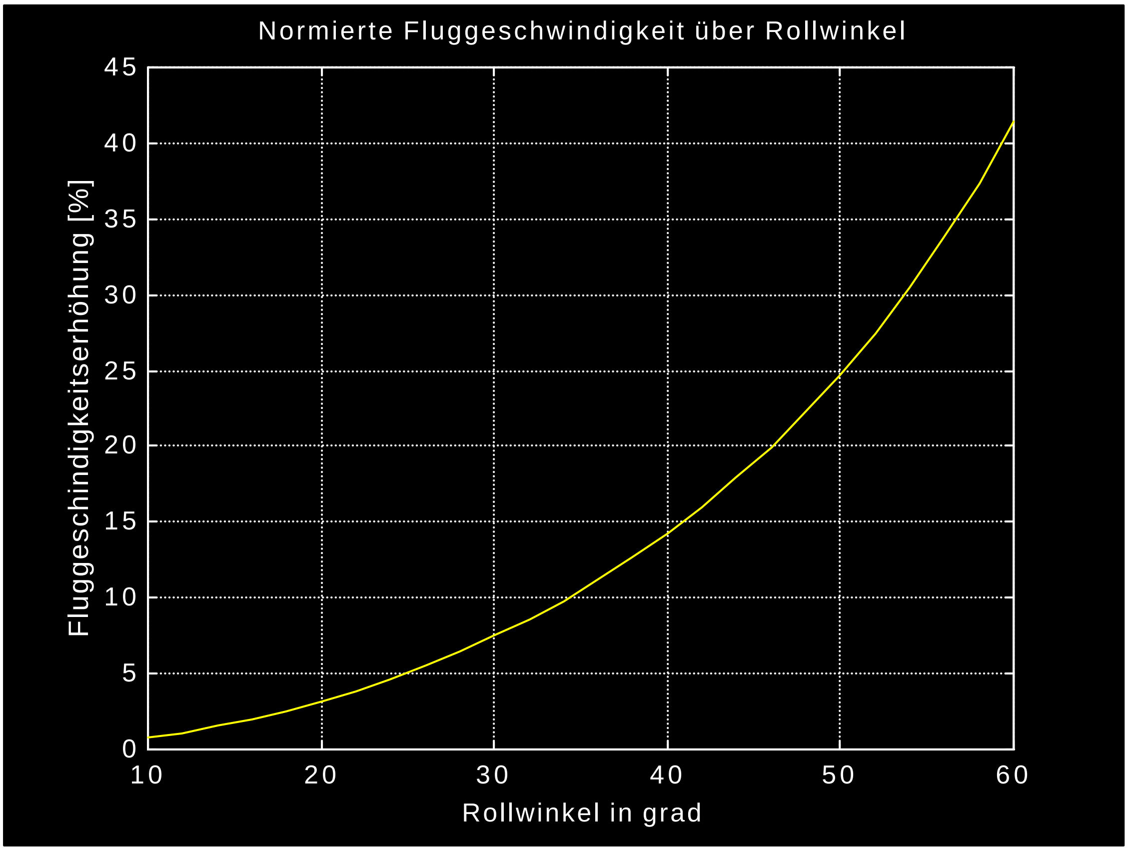


Fig. 2: Normierte Kurvenfluggeschwindigkeit über Rollwinkel

4.3.1 Merksatz 1

Bei einem Rollwinkel von 35° müssen wir unsere Fluggeschwindigkeit geradeeinmal um ca. 10% erhöhen gegenüber der Geschwindigkeit für das geringste Sinken im Geradeausflug

4.4 Kurvenradius in Abhängigkeit des Rollwinkels

Betrachten wir einmal unseren „normierten" Kurvenflugradius in Abhängigkeit des Rollwinkels. Aus Fig. 3 können wir entnehmen, dass, wenn wir anstatt mit einem Rollwinkel von 10° mit einem Rollwinkel von 20° fliegen, sich unserer Kurvenflugradius um die Hälfte (i.e. ca. 50%) reduziert. Gewaltig, nicht wahr! Übrigens, dies gilt wiederum für einen (manntragenden) Düsenjäger wie auch für unseren Modell-HLG!

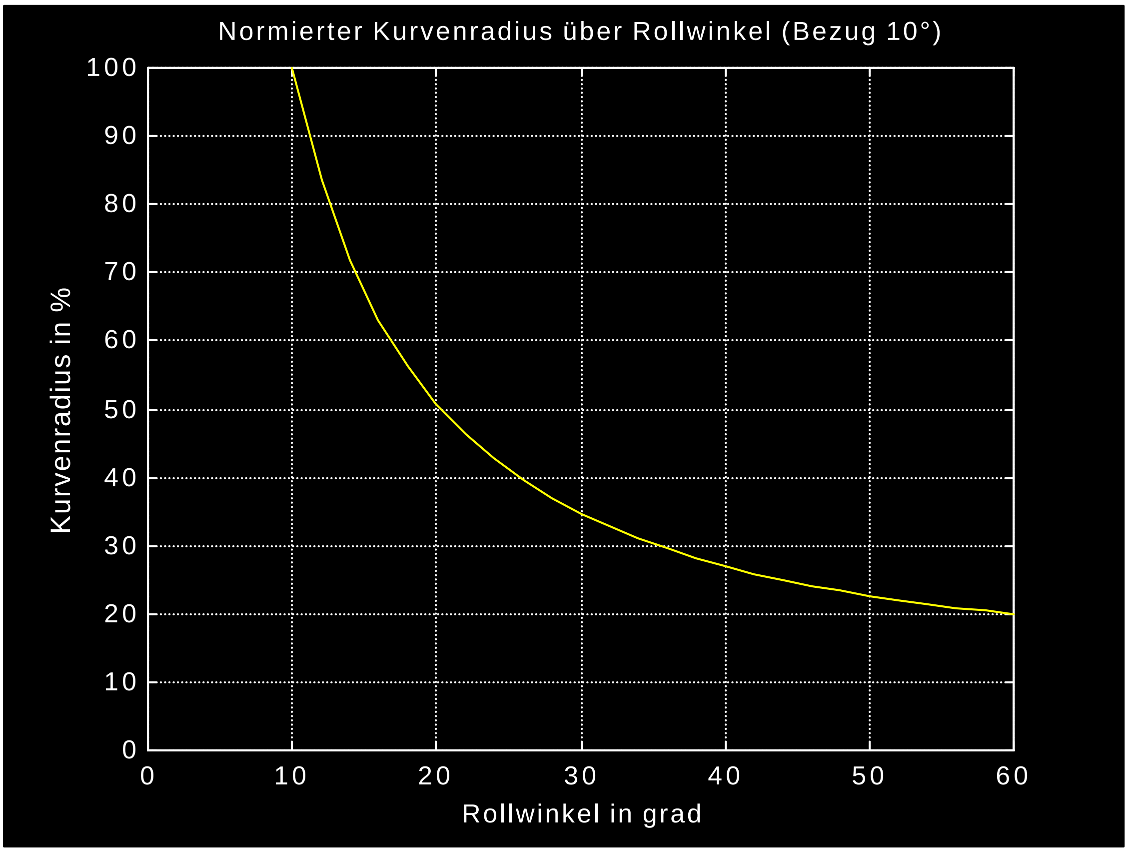


Fig. 3: Normierter Kurvenflugradius über Rollwinkel

4.4.1 Merksatz 2

Würden wir z.B. unseren Rollwinkel von 10° auf 35° erhöhen, wäre unserer Kurvenflugradius nur ca. 30% dessen was wir bei 10° haben.

4.5 Was ist der Preis für den Radiusgewinn?

Wie in Fig. 2 schon gezeigt wurde, müssen wir mit zunehmendem Rollwinkel unsere (Kurven-) Fluggeschwindigkeit erhöhen. Nun ist es Zeit zu den realen Zahlenwerten zurückzukehren.

Fig. 4 zeigt uns nun die realen Werte unseres Beispielmodells. Wollen wir z.B. stationär mit einem Rollwinkel von 30° fliegen, müssen wir unsere Fluggeschwindigkeit auf 5.8 m/sec erhöhen. Schauen wir auf die Sinkflugpolare in Fig. 1 dann entnehmen wir eine (Eigen-) Sinkgeschwindigkeit von 0.34 m/sec.. Wir sind also noch ganz Oben in der Sinkflug-Polare.

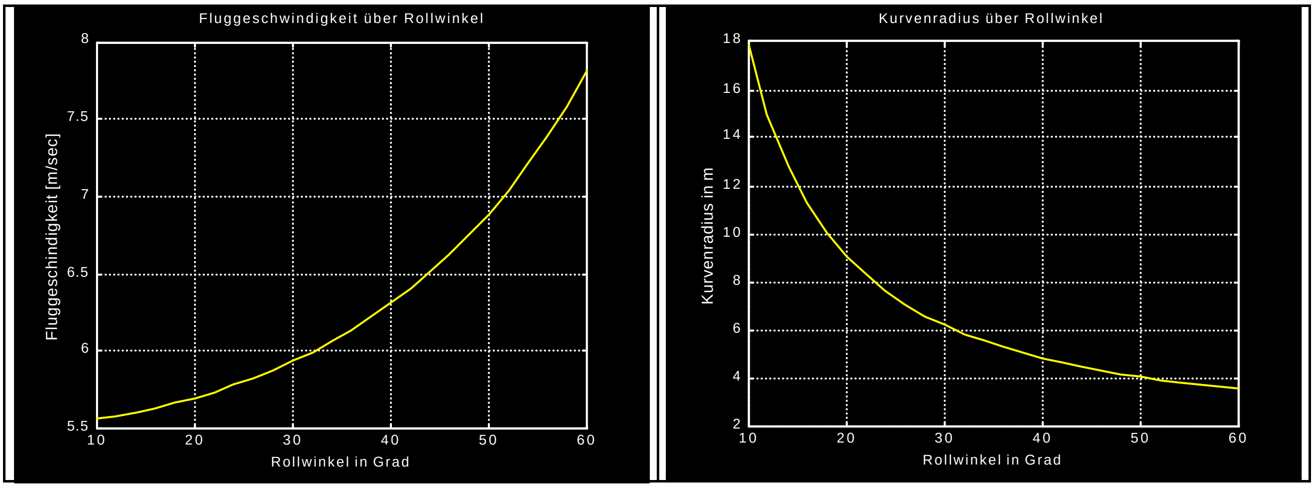


Fig. 4: Kreisfluggeschwindigkeit und Kurvenradius des Beispielmodells

4.6 Die Kreisflugpolare

Stellen wir die (Eigen-) Sinkgeschwindigkeit für verschiedene Rollwinkel in einem Diagramm dar, kommen wir zur Kurvenflug-Polare unseres Beispielmodells. Fig. 5 zeigt diese.

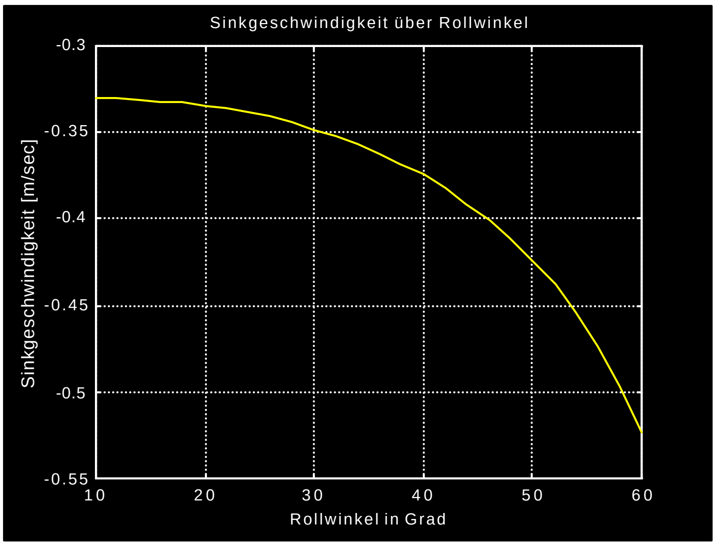


Fig. 5: Kurvenflug-Polare des HLG

4.6.1 Merksatz 3

Wir nähern uns langsam der magischen Zahl von 35°. Die Kurvenflug-Polare zeigt dass etwa bis zu diesem Wert kein größere Verschlechterung des (Eigen-) Sinkens auftritt. Hier nun ein Postulat ohne weitere Beweise. Nämlich dieses, dass, außer Skalenfaktoren, alle vernünftigen Profile und auf gute Leistungen ausgelegte Flugzeuge eine ähnliche Charakteristik aufweisen.

5 Kurvenflug in einem Beispielbart

5.1 Definition des Beispielbartes

Ein Aufwindbart ist eine mehr oder wenige runde schlauchartige Warmluftblase die aufsteigt. Die höchste Steiggeschwindigkeit ist im Zentrum des Bartes anzutreffen. Daher auch der Begriff das man einen Bart zentrieren muss, d.h. dass man mit gleichbleibenden Radius engstmöglich um dieses Zentrum herum kurven muss.

Vor langen Jahren als ich noch Pilot manntragender Segelflugzeuge war habe ich vermessene Auftriebsverteilungen von für Großsegler relevanten Bärten gesehen. Soweit ich mich noch erinnere waren diese Verteilungen ähnlich einer Gaußschen-Klockenkurve. Daher habe ich hier als Gaußsche-Klockenkurve das Modell eines fiktiven Bartes aufgestellt welches in Bodennähe durchaus zutreffen könnte. Dieses Bartmodell ist in Fig. 6 veranschaulicht.

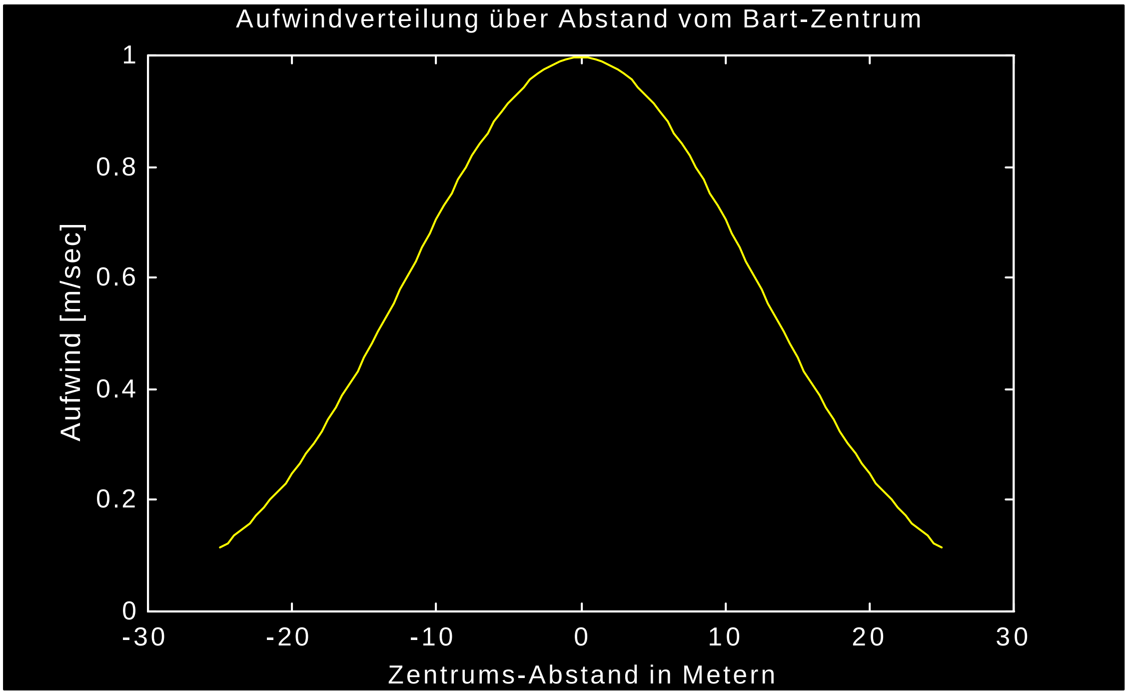


Fig. 6: Auftriebsverteilung eines fiktiven Aufwindbartes

5.2 Effektives Steigen in Abhängigkeit des Rollwinkels

Mit der Annahme dass wir den Bart zentriert haben können wir nun das effektive Steigen in Abhängigkeit des Rollwinkels berechnen.

Nehmen wir als Arbeitspunkt einen bestimmten Rollwinkel, z.B. 30°. Dann finden wir für unser Beispielmodell in Fig. 4 einen Radius von ca. 6.2 m. Gehen wir mit diesem Zentrums-Abstand von 6.2 m in Fig. 6, dann finden wir für den Aufwind ein Geschwindigkeit von ca. 0.87 m/sec. Gleichzeitig finden wir in der Kurvenflug-Polare für das Eigensinken unseres Modells einen Wert von ca. 0.35 m/sec. Die effektive Steiggeschwindigkeit ist offensichtlich Aufwindgeschwindigkeit minus Eigensinken, d.h. 0.87 - 0.35 := 0.52 m/sec.

Fig. 7 zeigt nun das effektives Steigen für verschieden Rollwinkel.

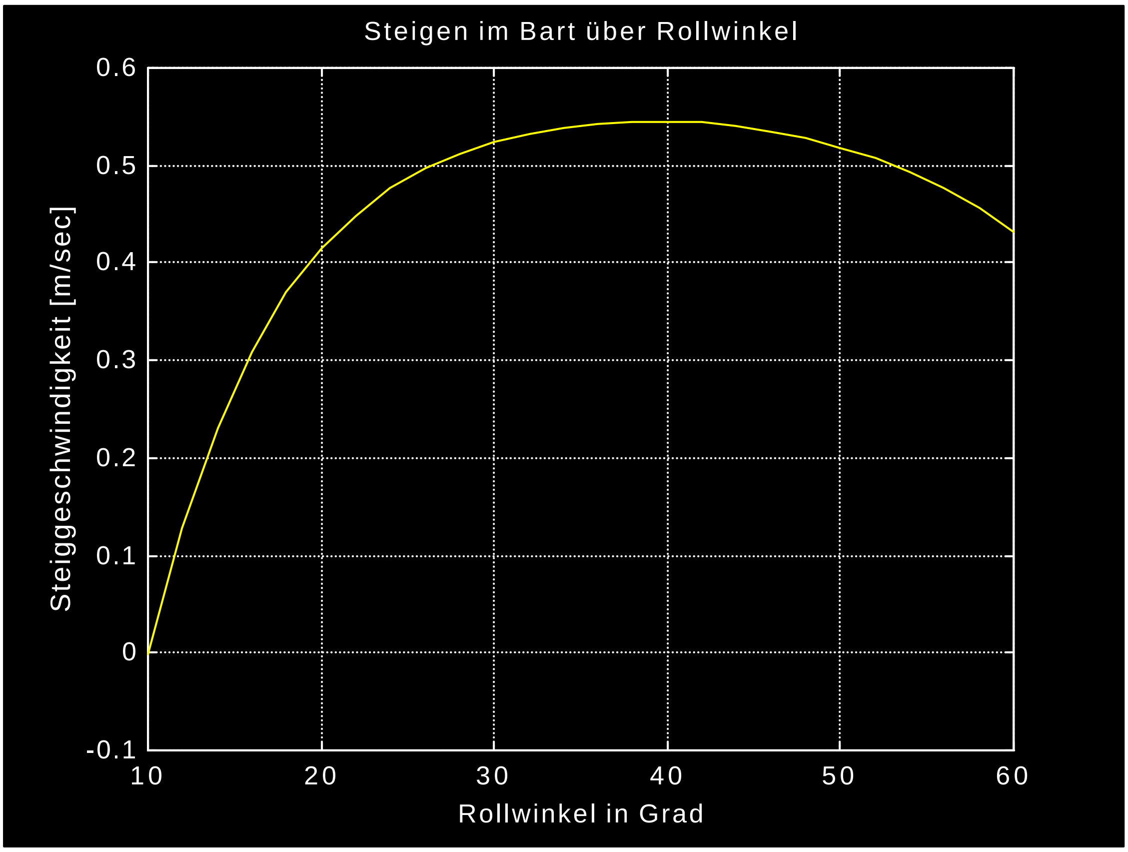


Fig. 7: Effektives Steigen des Beispielmodells im fiktiven Bart

Aus der Fig. 7 können wir entnehmen dass wir bei einem Rollwinkel von 30° eine gewaltige Erhöhung der Steiggeschwindigkeit gegenüber derjenigen bei einem Rollwinkel von 10° vorfinden. Des weiteren können wir ab unserem „magischen Rollwinkel“ von ca. 35° nichts mehr zugewinnen.

Sie mögen nun glauben, dass der fiktive Bart derart gezinkt ist dass der „magischen Rollwinkel von 35°“ zutrifft. Wenn Sie dann das glauben steht es Ihnen frei eine andere Auftriebsverteilung anzunehmen und das Ergebnis aufzubereiten. Ich würde vermuten, dass Sie dann wiederum zu einer ähnlichen Aussage kommen. Denn, das Ergebnis wird maßgeblich von **Merksatz 3** bestimmt.

6 Berücksichtigung des Dralls

Wer schon sich vom Boden ablösende Thermikblasen und die dabei hochgerissenen Teilchen beobachtet hat kann bestätigen, dass solch ein Bart schon kurz über dem Boden einen beträchtlichen Drall hat. Es ist wohl weiter zu vermuten dass dieser Drall noch stärker wird wenn Wind hinzukommt.

Unter der Voraussetzung dass ein Drall mit einer Geschwindigkeit von 0.5 m/sec im Bereich unserer Kurvenradi vorliegt, wollen wir hier mal die zahlenmäßige Auswirkung des Dralls betrachten. Wir können hier zwei Fälle unterscheiden:

1) wir fliegen unsere Thermikkreise **mit** dem Drall
2) wir fliegen unsere Thermikkreise **entgegen** dem Drall.

In beiden Fällen wollen wir jedoch scheinlotrichtig mit der dazugehörigen minimalen Fluggeschwindigkeit fliegen. Unsere Fluggeschwindigkeit v_k, die uns den notwendigen Auftrieb besorgt, ist die Geschwindigkeit gegenüber den der uns umgebenden Luft (neudeutsch die Indicated Air Speed (IAS) welche uns der Fahrtmesser im manntragenden Flugzeug anzeigen würde). Gegenüber dem /Grund haben wir bei gleicher IAS zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten:

a) Fliegen wir **mit** dem Drall (d.h. mit Rückenwind) ist unser Geschwindigkeit gegenüber dem Grund $\mathbf{v_g}$ = v_k **+Drall**.
b) Fliegen wir e**ntgegen** dem Drall (d.h. mit Gegenwind) ist unser Geschwindigkeit gegenüber dem Grund $\mathbf{v_g}$ **=** v_k **-Drall**.

Nun ist die Zentrifugalkraft Z proportional der Winkelgeschwindigkeit gegenüber dem Grund. Die Winkelgeschwindigkeit ist wiederum proportional der Zeit die wir für einen Vollkreis (360°) brauchen, D.h. fliegen wir mit v_k **-Drall**. ist unsere Winkelgeschwindigkeit kleiner als wenn wir mit v_k **+Drall** fliegen.

6.1 Zahlenbeispiel

Nehmen wir mal an wir fliegen mit einem Rollwinkel von 30° **mit** dem Drall von 0.5 m/sec. Der von Hartmut Siegmann zitierte „Thermikopa“ fliegt jedoch mit dem gleichen Flugzeug (unserem HLG) mit einem Rollwinkel von 30° **entgegen** dem Drall. Dann ergibt sich folgende Tabelle:

Wir (30° mit Drall)	Thermikopa (30° entgegen Drall)
v_k = 5.8 m/sec	$\boldsymbol{v_k}$ = 5.8 m/sec
$\boldsymbol{v_g}$ = 6.3 m/sec	$\boldsymbol{v_g}$ = 5.3 m/sec
$\boldsymbol{R}$ (aus Formel 2) =7.01 m	$\boldsymbol{R}$ (aus Formel 2) =4.96 **m**

Wie wir aus der obigen Tabelle entnehmen können fliegt Thermikopa mit einem etwa 2 Meter geringeren Kurvenradius als wir und ist damit dem Zentrum mit dem höherem Aufwind näher. Das drückt sich dann am Beispiel unseres Fiktiven Bartes wie folgt aus:

Wir (30° mit Drall)	Thermikopa (30° entgegen Drall)
v_k = 5.8 m/sec	v_k = 5.8 m/sec
v_g = 6.3 m/sec	v_g = 5.3 m/sec
R (aus Formel 2) =7.01 m	***R*** (aus Formel 2) =4.96 m
v_{sp}= 0.35 m/sec	v_{sp}= 0.35 m/sec
v_a (R=7.01) = 0.84 m/sec	v_a (R=4.96) =0.92 m/sec
v_s = 0.49 m/sec	v_s = 0.57 m/sec

Thermikopa, dadurch dass er entgegen dem Drall fliegt und damit einen kleineren Kurvenradius hat, fliegt in unserem Fiktiven Bart mit einem Steigen von $\mathbf{v_s}$ = 0.57 m/sec, wir hingegen nur mit einem Steigen von $\mathbf{v_s}$ = 0.49 m/sec. Der alte Fuchs hat uns z.B. mit 5 seiner Vollkreise 2.2 m Höhe abgenommen! Das Steigen hat sich beim Thermikopa um ca. 16% erhöht. Wie viel Gelt geben Sie für ein 3% besseres Modell aus (gleiche Größe angenommen)?

6.2 Konklusion

Es zahlt sich immer aus gegen den Drall eines Bartes zu fliegen.

7 Schlusswort

Die hier aufgestellten Regeln stellen für ambitionierte Segelflugpiloten der manntragenden Zunft alte Hüte dar. Ich habe sie hier nur dargestellt und mit Zahlenbeispielen untermauert, weil ich aus vielen Beobachtungen her den Eindruck gewonnen habe dass diese Regeln für viele Modellflieger nicht bekannt sind.

7.1 Zum Rollwinkel

Setzen wir ein räumlich begrenztes thermisches Aufwindfeld, nämlich einen Bart im Gegensatz zu großflächigen Aufwindfeldern (z.B. Abendthermik) voraus, machen wir kaum was falsch wenn wir mit dem „magischen Rollwinkel“ von 35° einkreisen. Je nach Beschaffung des Aufwindfeldes werden wir bei der Optimierung feststellen dass in den seltensten Fällen weniger (z.B. 25-30°) besser sind. Meistens, bei starkem Wind und in Bodennähe, geht der Trend gegen 45° Rollwinkel.

7.2 Zum Drall

Die Geschichte mit dem Drall ist schwer umsetzbar. Selbstverständlich kreisen Sie immer gegen die hochgehende Tragfläche ein!? Damit ist zunächst auch vorgegeben in welcher Drallrichtung Sie fliegen. Des weiteren kennen Sie den Kurvenwechsel als erfolgreichste Methode einen Bart zu verlieren!

Die Drallrichtung ist geländebedingt, zudem vom Wind und Sonneneinstrahlung abhängig (auch soll die Corioliskraft eine Rolle spielen), sie ist damit auch Tagesform und zeitabhängig. Für die über weite Strecken überlandfliegenden manntragenden Segelflugpiloten ist daher die Drallvorhersage eher ein Lotteriespiel, jedoch sagen diese dass sich die Wahrscheinlichkeit für eine Richtung innerhalb der nächsten Stunde kaum ändert.

Fliegen wir als Modellpilot unter eher thermischen Bedingungen an einem Hang können wir doch sehr oft beobachten, dass der Bart immer an der gleichen Stelle steht und wir können weiters beobachten, dass dieser manchmal besser rechts- oder linksrum geht.

Dann werden wir immer in jener Vorzugsrichtung einkreisen.

ANHANG A: FORMELN

Allgemein

Die im folgenden aufgeführten gelten nur für den Segelflugbetrieb. Motorflieger können andere Strategien zum scheinlotrichtigen Kurvenflug anwenden (z.B. Messerflug). Damit gelten dann die folgenden Formeln.

Definitionen

IAS Staudruck (rho/2 * V^2) ausgedrückt als Geschwindigkeit v

q = Rollwinkel

v_{sp} = Polares Eigensinken [m/sec]

$v_{\min}$ = Fluggeschwindigkeit bei geringstem Sinken [m/sec] $_{IAS}$

v_k = Kurvenfluggeschwindigkeit [m/sec] $_{IAS}$

R = Kurvenflugradius [m]

Formeln für Segelflugzeuge

$$v_k = v_{\min} / \cos(q)^{1/2}$$

Formel 1

$$R = v_{\min} / 9.81 / \sin(q)$$

Formel 2