

Vergleich der Kreisflugleistungen einiger Segelflugzeuge auf Grund vermessener Flugpolaren

Von H. J. Merklein

Vortrag am 10. OSTIV-Kongress, South Cerney, England, Juni 1965

Es ist in den vergangenen Jahren gelungen, die Leistungen der Segelflugzeuge durch die Verwendung günstigerer Tragflügelprofile und durch modernere Bauweisen merklich zu steigern. Ein Teil der fliegerischen Erfolge liegt jedoch auch in der Auslegung für optimalen Reiseflug begründet. Eine hohe Reisegeschwindigkeit verlangt einerseits gute Schnellflugleistungen und insofern hohe Flächenbelastungen. Segelflugzeuge befinden sich jedoch andererseits zu einem grossen Teil eines Leistungsfluges in der Kreisbewegung, wo zur Erzielung guter Reiseflugleistungen niedrigere Flächenbelastungen und gute Langsamflugleistungen zur Ausnutzung der thermischen Aufwinde wünschenswert sind.

Es hat sich gezeigt, dass die rechnerische Ermittlung von Flugleistungen mit grossen Unsicherheiten verbunden ist. Aus diesem Grunde wurden immer wieder interessante Segelflugzeuge im Fluge vermessen. Die Geradeausflug-Polare bietet sich für derartige Messungen besonders an, denn sie ist fliegerisch und messtechnisch am einfachsten zu erfassen. Für einen Leistungsvergleich verschiedener Segelflugzeuge geben diese Polaren eine gute Grundlage, jedoch muss das Verhalten im stationären Kreisflug zusätzlich untersucht werden.

Die nachfolgenden Ausführungen bestätigen anhand von Kreisflugmessungen, dass es zulässig ist, die Kreisflugleistungen rechnerisch aus einer vorliegenden Geradeausflug-Polare abzuleiten. Weiterhin werden verschiedene Darstellungsweisen der Kreisflugleistungen erläutert und die im Geradeausflug erzielten Messergebnisse einiger jüngerer Segelflugzeugtypen in diesen Diagrammen verglichen. Anregungen zu den dargestellten Diagrammen gehen teils auf Arbeiten von Herrn Zacher, Herrn Dr. Eppler und vor allem auf die von Herrn Homburg und Herrn Waibel an unserem Institut durchgeführten Studien zurück.

Die Messung von Leistungen im Kreisflug stösst gegenüber dem Geradeausflug auf einige zusätzliche Schwierigkeiten. Neben Bahn- und Sinkgeschwindigkeit muss noch die Schräglage, die Kreiszeit oder die Beschleunigung erfasst werden, damit daraus der zugehörige Kurvenradius bestimmt werden kann. Die Einhaltung vorgegebener Schräglagen durch den Piloten wäre wünschenswert, jedoch gelingt dies häufig wegen unregelmässigem Horizont oder Dunst auch bei ruhigen Wetterlagen nur ungenau. Besondere Übung erfordert vor allem das während 100 bis 200 Sekunden vollkommen stationäre Fliegen mit grosser Schräglage und Beschleunigung. Dies erklärt, warum im Kreisflug allgemein eine grössere Streuung der Ergebnisse zu erwarten ist als im Geradeausflug.

Anlässlich der Vermessung der Segelflugzeuge D-34 d und K 8 wurde mit einer Anzahl von Messpunkten der Kreisflug untersucht. Die Ergebnisse für die K 8 sind im Bild 1 mit den vom Geradeausflug umgerechneten Polaren

verglichen. Die Punktstreuung ist in diesem Beispiel erfreulich klein, so dass man die gute Übereinstimmung der gerechneten Kurven mit den Messpunkten erkennt. Dieses Ergebnis konnte erwartet werden, da sich theoretisch nachweisen lässt, dass der Luftwiderstand und insbesondere der induzierte Widerstand des Tragflügels im stationären Kreisflug nicht wesentlich erhöht ist [6]. Für die nachfolgenden Betrachtungen werden daher durchwegs die im Geradeausflug gemessenen Polaren herangezogen und mit den bekannten Formeln umgerechnet.

Aus den Bedingungen für Kräftegleichgewicht ergeben sich für den stationären Kreisflug die folgenden Formeln:

$$V_K = \sqrt{\frac{2 G}{g} \frac{1}{F} \frac{1}{c_A} \frac{1}{\cos \varphi}} = \frac{V_G}{\sqrt{\cos \varphi}} \quad (1)$$

$$w_{SK} = \sqrt{\frac{2 G}{g} \frac{c_W^2}{F} \frac{1}{c_A^3} \frac{1}{\cos^3 \varphi}} = \frac{w_{SG}}{\sqrt{\cos^3 \varphi}} \quad (2)$$

$$R_K = \frac{1}{g} \frac{2 G}{g} \frac{1}{F} \frac{1}{c_A} \frac{1}{\sin \varphi} = \frac{V_G^2}{g \cdot \sin \varphi} \quad (3)$$

Bei vorgegebenen Geradeausflugleistungen lässt sich hiermit die bekannte Form eines Kreisflugdiagramms, das heisst Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Kreisradius berechnen, wie es Bild 2 für die Skylark 3 F darstellt. Eingezeichnet sind die Kurven $\varphi = \text{const.}$ und $v = \text{const.}$ Auf die Wiedergabe $c_A = \text{const.}$ wurde verzichtet, da diese Grösse für den Piloten weniger anschaulich ist als die Flugeschwindigkeit. Man erkennt an der Darstellung, dass für grosse Kreisradien und kleine Schräglage die minimale Sinkgeschwindigkeit des Geradeausfluges erreicht werden kann. Für enges Kreisen mit grosser Schräglage wachsen jedoch die Sinkgeschwindigkeiten gemäss

$$\frac{1}{\sqrt{\cos^3 \varphi}}$$

stark an, so dass diese Flugzustände unwirtschaftlich sind. Es ist bemerkenswert, dass mit wachsender Schräglage das Minimum der Kurven $\varphi = \text{const.}$ immer schmaler wird, und vor allem, dass die Sinkgeschwindigkeit empfindlich von Abweichungen im Kurvenradius oder der Flugeschwindigkeit abhängig ist.

Entscheidend für die Kreisflugleistungen ist die Hüllkurve an die eingezeichneten Kurvenscharen. Für jede Schräglage ist nicht mit der zugehörigen minimalen Sinkgeschwindigkeit, sondern im Berührungspunkt mit der Hüllkurve der günstigste Zustand erreicht. Mit Hilfe von Optimalbetrachtungen [3] findet man die mathematische Bedingung für diese Hüllkurve

$$\frac{2}{3} \cos^2 \varphi = \frac{c_W}{c_A \frac{\Delta c_W}{\Delta c_A}} ; \quad (4)$$

Diese Gleichung führt bei $\varphi = 0$ im Geradeausflug zur minimalen Sinkgeschwindigkeit, und es zeigt sich, dass für alle optimalen Kreisflugzustände die höher liegenden c_A -Werte geeignet sind.

Viele Flugzeuge erreichen ihr minimales Sinken im Geradeausflug in der Nähe der Ueberziehgeschwindigkeit, so dass mit weiterer Vergrößerung des c_A -Wertes schnell ein grosser Zuwachs an Sinkgeschwindigkeit erfolgt. Der zum Kreisflug brauchbare c_A -Bereich ist hier sehr klein, und schon kleine Abweichungen vom Sollwert ziehen grosse Leistungsverluste nach sich. Am Beispiel der Ka 6 (Bild 3) erkennt man besonders gut, wie schwierig es in solchen Fällen für Piloten ist, bei grösseren Schräglagen die Optimalbedingungen zu erfüllen.

Ein ähnliches Beispiel ist die D - 34 d. Wir wollen hier einmal den Verlauf der Fluggeschwindigkeit verfolgen (Bild 4). Eine Verringerung des Kreisradius kann allgemein durch Erhöhung sowohl von c_A als auch von φ erreicht werden. Ersteres hat wie im Geradeausflug eine Abnahme der Geschwindigkeit zur Folge, jedoch bewirkt die Vergrößerung von φ bei unverändertem c_A das Gegenteil. Wir sehen im

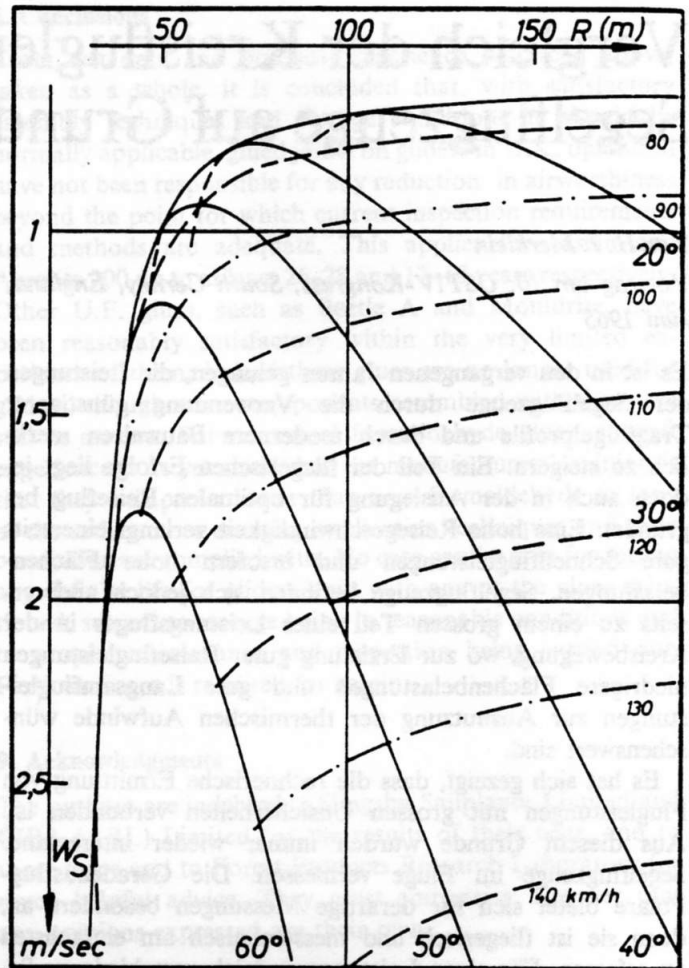


Bild 2: Skylark 3 F, $G/F = 21,2 \text{ kp/m}^2$

Bild 1: Flugmessungen an einer K 8

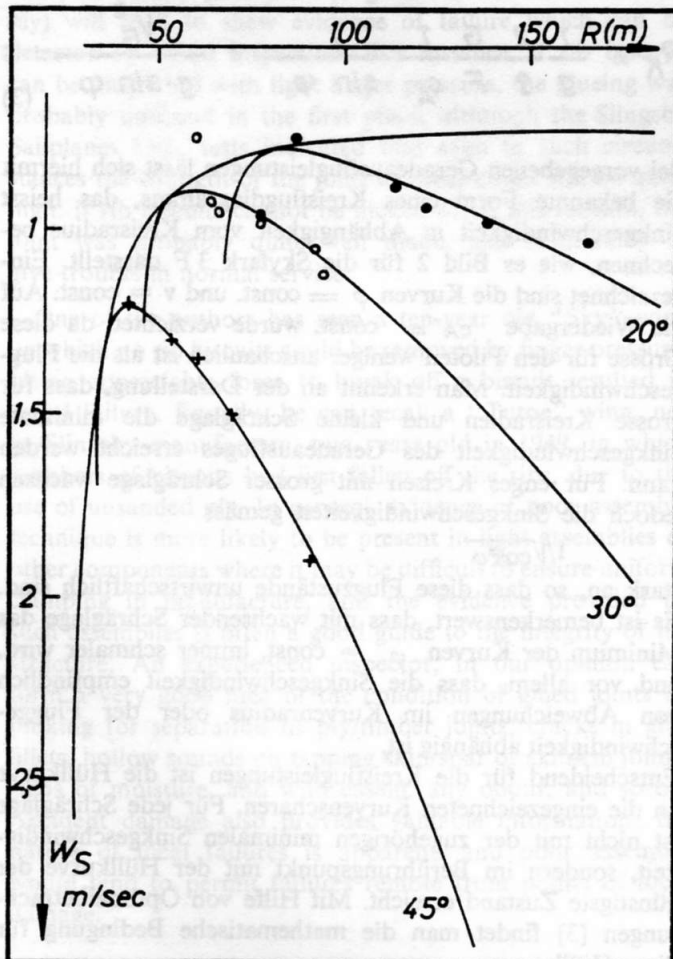


Bild 4, wie schon bei den vorigen, eines der Beispiele, wo in allen Kreisflugzuständen die optimale Fluggeschwindigkeit höher liegt als beim Geradeausflug mit «geringstem Sinken». Der Verlauf der Linien $v = \text{const.}$ und ihre Berührungspunkte mit der Hüllkurve lassen dies erkennen. Die Ursache liegt in dem relativ kleinen verfügbaren c_A -Bereich des Kreisfluges. Der Schräglageneinfluss überwiegt.

Man könnte nun sagen, es sei selbstverständlich, dass die grössere Schräglage auch die höhere Fluggeschwindigkeit erfordert. Dies ist jedoch tatsächlich nicht bei allen Flugzeugen der Fall. Wenn nämlich für den Kreisflug ein genügend grosser c_A -Bereich verfügbar ist, kehren sich die Verhältnisse um, und zum kleineren Kreisradius muss trotz grösserer Schräglage die Fluggeschwindigkeit im Rahmen der Optimalbedingung grösser werden. Ein derartiges Beispiel ist der Phönix (Bild 5). Das geringste Sinken wird im Geradeausflug bei etwa 80 km/h erreicht. Die Linie für 80 km/h verläuft für grosse Radien dicht an der Optimalkurve. Für engere Kreise werden dann geringere Geschwindigkeiten günstiger. Erst wenn der Radius kleiner wird als rund 50 m, erfolgt ein Ansteigen der Optimalgeschwindigkeit wie bei den vorigen Beispielflugzeugen.

Bild 3: Ka 6 CR, G/F = 22,2 kp/m²

Die Abhängigkeit der Kreisgeschwindigkeit vom Radius wurde für eine Anzahl von Segelflugzeugen untersucht (Bild 6). Das Verhalten des Phönix erwies sich hierbei als aussergewöhnlich. Wir wollen daher ganz kurz zeigen, welche Eigenschaften einer Flugzeugpolare für den Verlauf der Optimalgeschwindigkeiten im Kreis verantwortlich sind.

Die Formel für die optimale Kreisgeschwindigkeit erhält man nach Einsetzen der Optimalbedingungen (4) in die allgemeine Geschwindigkeitsgleichung (1).

$$V_{Kopt} = \sqrt{\frac{2}{9} \frac{G}{F}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{\frac{3}{2} \frac{c_W}{c_A} \frac{c_W'}{c_A'} \cdot c_A^2}} \quad (5)$$

Differenziert man diese Gleichung nach c_A und setzt gleich Null, so ist die entstehende Differentialgleichung

$$0 = c_W'' - \frac{c_W'}{c_A} - \frac{c_W'^2}{c_W} \quad (6)$$

die Bedingung dafür, dass die optimale Fluggeschwindigkeit

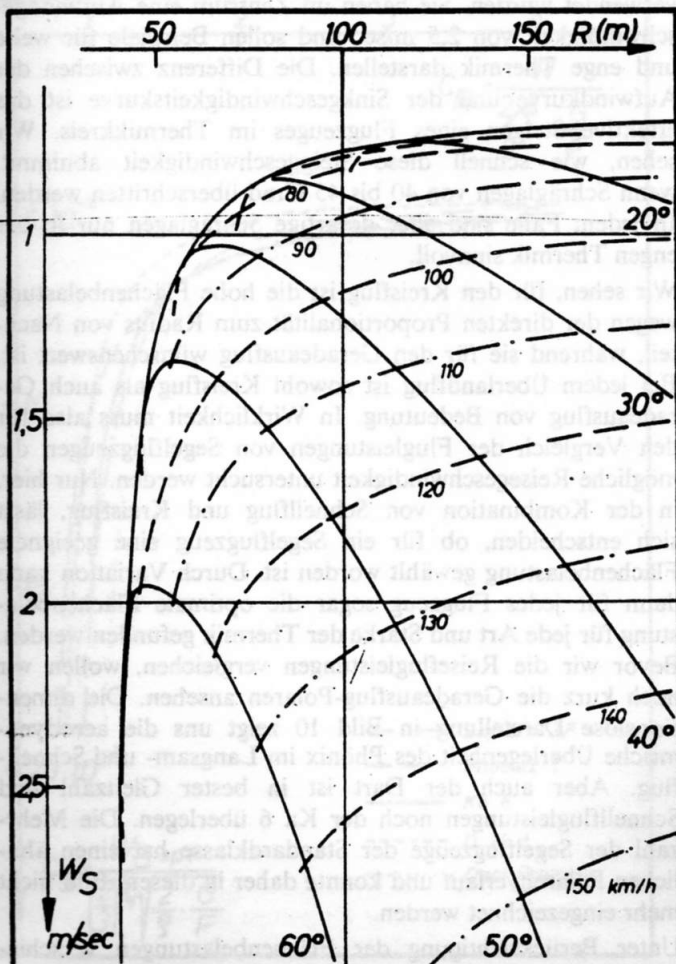
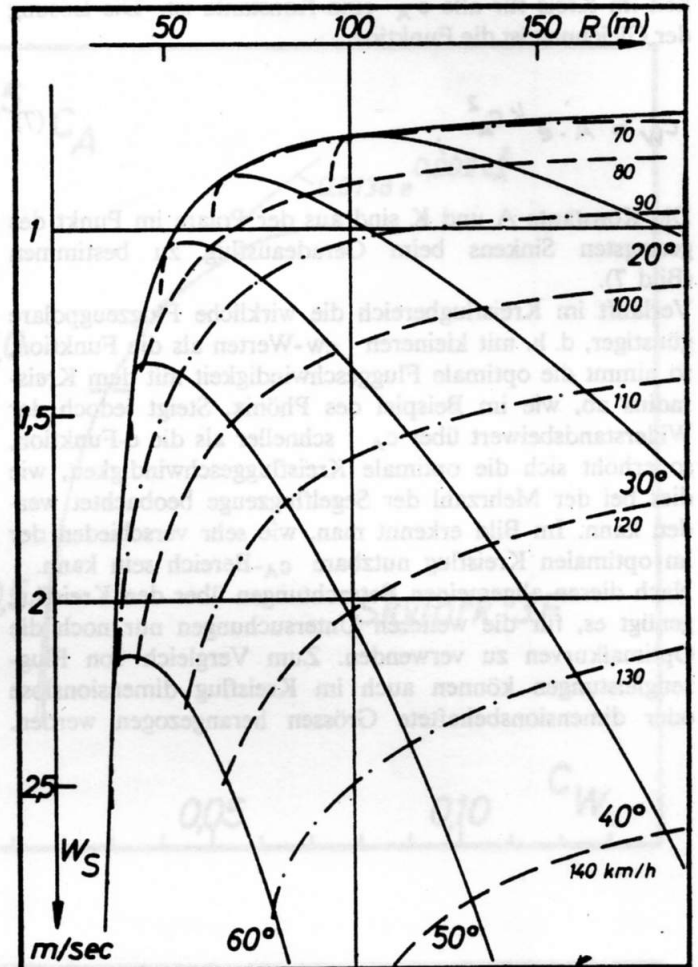


Bild 4: D 34 d, G/F = 27,8 kp/m²

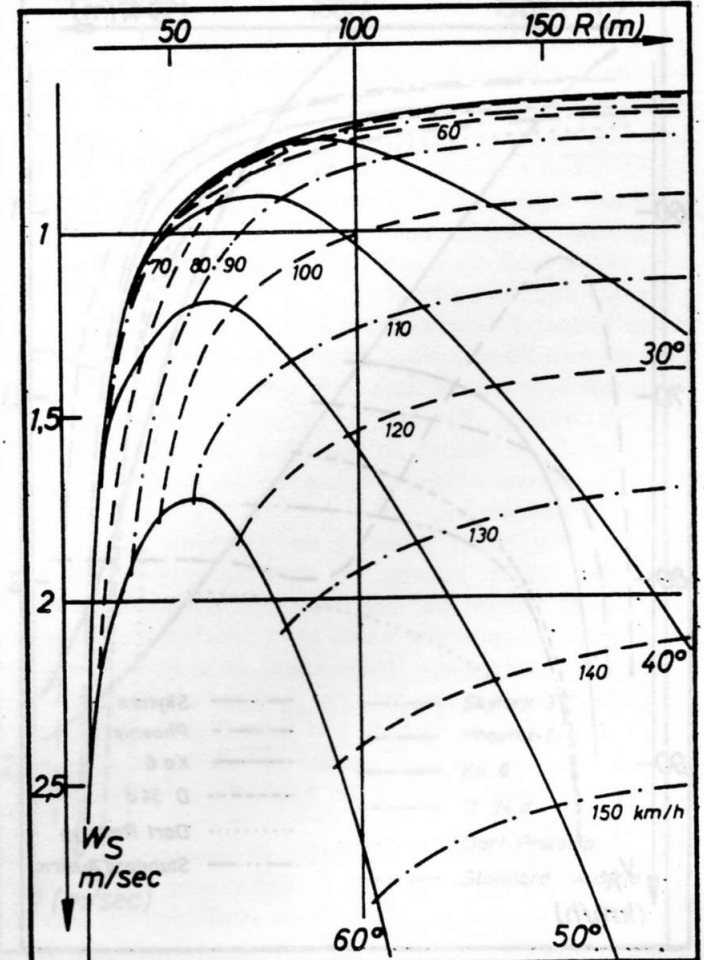


Bild 5: Phoenix T, G/F = 20,8 kp/m²

keit im Kreis für alle c_A eine Konstante ist. Die Lösung der Gleichung ist die Funktion

$$c_W = A \cdot e^{k c_A^2} \quad (7)$$

Die Konstante A und K sind aus der Polare im Punkt des geringsten Sinkens beim Geradeausflug zu bestimmen (Bild 7).

Verläuft im Kreisflugbereich die wirkliche Flugzeugpolare günstiger, d. h. mit kleineren c_W -Werten als die Funktion, so nimmt die optimale Fluggeschwindigkeit mit dem Kreisradius ab, wie im Beispiel des Phönix. Steigt jedoch der Widerstandsbeiwert über c_A schneller als die e-Funktion, so erhöht sich die optimale Kreisfluggeschwindigkeit, wie dies bei der Mehrzahl der Segelflugzeuge beobachtet werden kann. Im Bild erkennt man, wie sehr verschieden der im optimalen Kreisflug nutzbare c_A -Bereich sein kann. Nach diesen allgemeinen Betrachtungen über den Kreisflug genügt es, für die weiteren Untersuchungen nur noch die Optimalkurven zu verwenden. Zum Vergleich von Flugzeugleistungen können auch im Kreisflug dimensionslose oder dimensionsbehaftete Größen herangezogen werden.

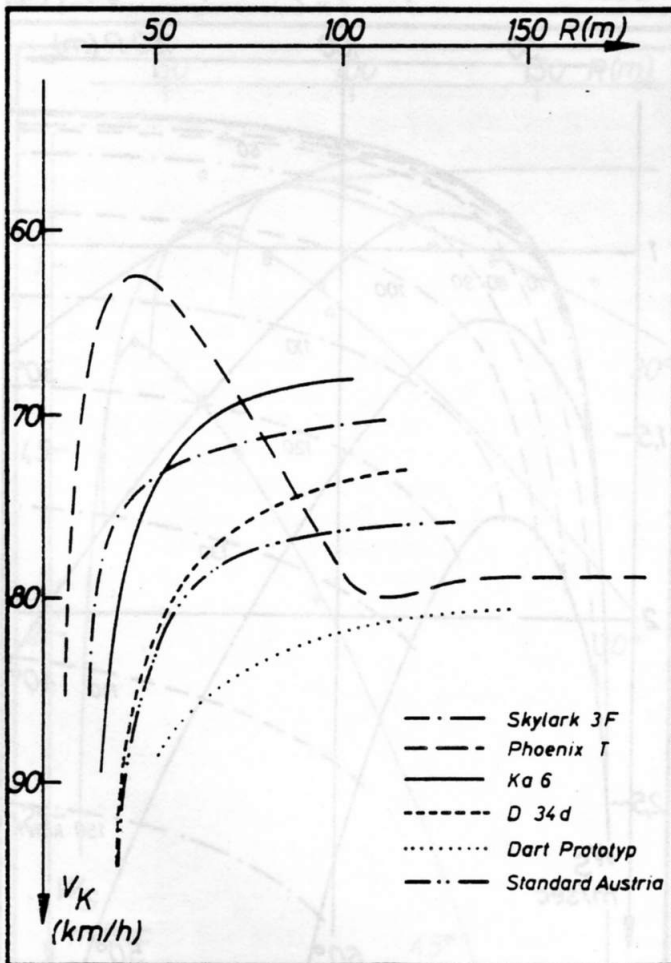


Bild 6: Optimaler Kreisflug

Wir sehen im Bild 8 zunächst eine Gegenüberstellung dimensionsloser Optimalkurven. Sowohl beim Kreisradius R als auch bei der Sinkgeschwindigkeit w_S wurde der Einfluss der Flächenbelastung beseitigt. Die dimensionslose Darstellungsweise eignet sich daher besonders für aerodynamische Vergleiche. Interessant ist hier, dass bei mittleren Schräglagen (30 bis 40 Grad) die Skylark 3 F, der Phönix T und die Ka 6 praktisch gleichwertig sind. Bei weiteren Kreisen kommt die grössere Flügelstreckung der Skylark zur Wirkung, während im engen Kreis der Phönix durch seinen hohen Maximalauftrieb im Vorteil ist. Die D 34 kann trotz der geringen Spannweite in der Kreisflugaerodynamik gut mithalten, da die Widerstandsbeiwerte im oberen c_A -Bereich erst spät anwachsen.

Für den fliegerischen Gebrauch ist natürlich die tatsächliche Flächenbelastung entscheidend. Wir sehen im Bild 9, dass unter Berücksichtigung der Fluggewichte die Kurven etwas weiter auseinanderliegen. Ka 6 und D 34 haben infolge der höheren Flächenbelastungen merklich schlechtere Kreisflugeleistungen als Phönix und Skylark 3 F. Zum Vergleich sind in dieses Diagramm noch einige Standardklasse-Segelflugzeuge mit eingezeichnet. Natürlich sagen alle diese Leistungskurven nichts darüber aus, wieweit zum Beispiel die Flugeigenschaften es ermöglichen, im Wettbewerb und unruhiger Luft alle diese Flugzustände zu erfliegen.

Wir haben bisher nur den Kreisflug in ruhiger Luft untersucht. Es ist aber zu berücksichtigen, dass im allgemeinen ein Aufwindgebiet von begrenztem Durchmesser zur Verfügung steht. In Bild 9 sind zwei Aufwindverteilungen angegeben, wie sie mit dieser Art schon von Carmichael [5] verwendet wurden. Sie haben im Zentrum eine Aufwindgeschwindigkeit von 2,5 m/sec und sollen Beispiele für weite und enge Thermik darstellen. Die Differenz zwischen der Aufwindkurve und der Sinkgeschwindigkeitskurve ist das effektive Steigen eines Flugzeuges im Thermikkreis. Wir sehen, wie schnell diese Steiggeschwindigkeit abnimmt, wenn Schräglagen von 40 bis 45 Grad überschritten werden. In jedem Falle sind aber derartige Schräglagen nur in der engen Thermik sinnvoll.

Wir sehen, für den Kreisflug ist die hohe Flächenbelastung wegen der direkten Proportionalität zum Radius von Nachteil, während sie für den Geradeausflug wünschenswert ist. Bei jedem Überlandflug ist sowohl Kreisflug als auch Geradeausflug von Bedeutung. In Wirklichkeit muss also für den Vergleich der Flugeleistungen von Segelflugzeugen die mögliche Reisegeschwindigkeit untersucht werden. Nur hier, in der Kombination von Schnellflug und Kreisflug, lässt sich entscheiden, ob für ein Segelflugzeug eine geeignete Flächenbelastung gewählt worden ist. Durch Variation kann dann für jedes Flugzeug sogar die optimale Flächenbelastung für jede Art und Stärke der Thermik gefunden werden. Bevor wir die Reiseflugeleistungen vergleichen, wollen wir noch kurz die Geradeausflug-Polaren ansehen. Die dimensionslose Darstellung in Bild 10 zeigt uns die aerodynamische Überlegenheit des Phönix im Langsam- und Schnellflug. Aber auch der Dart ist in bester Gleitzahl und Schnellflugeleistungen noch der Ka 6 überlegen. Die Mehrzahl der Segelflugzeuge der Standardklasse hat einen ähnlichen Polarenverlauf und konnte daher in diesem Bild nicht mehr eingezeichnet werden.

Unter Berücksichtigung der Flächenbelastungen verschieben sich die Kurven etwas (Bild 11). Die Schnellflugeleistun-

Bild 7: Minimum-Bedingung für $V_{K opt}$.

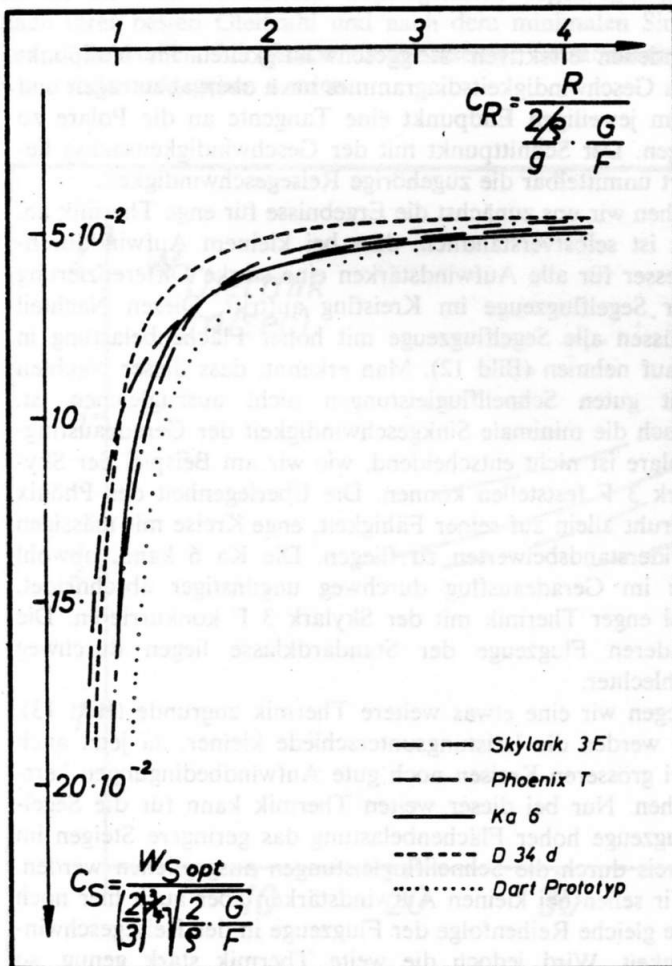
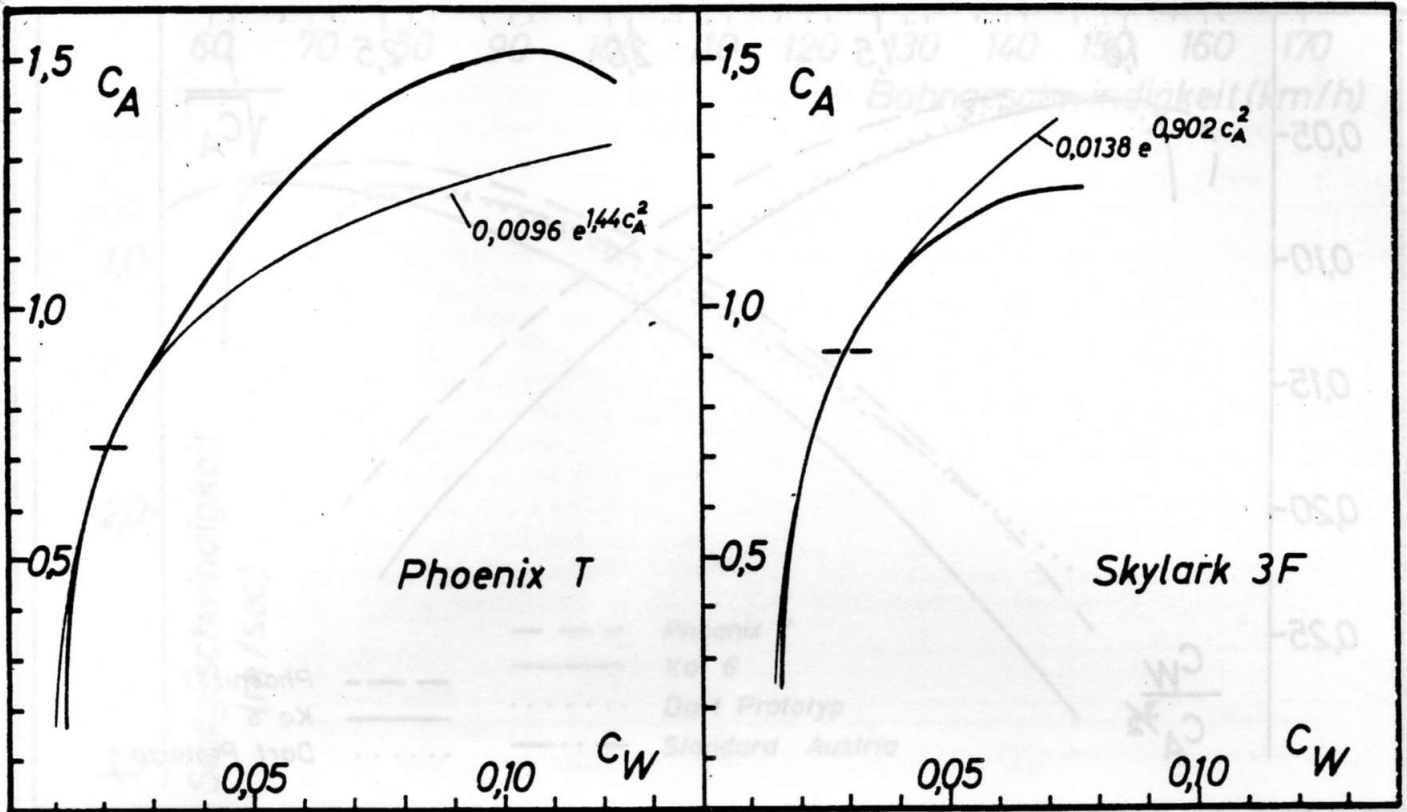


Bild 8: Kreisflug-Polaren, dimensionslos

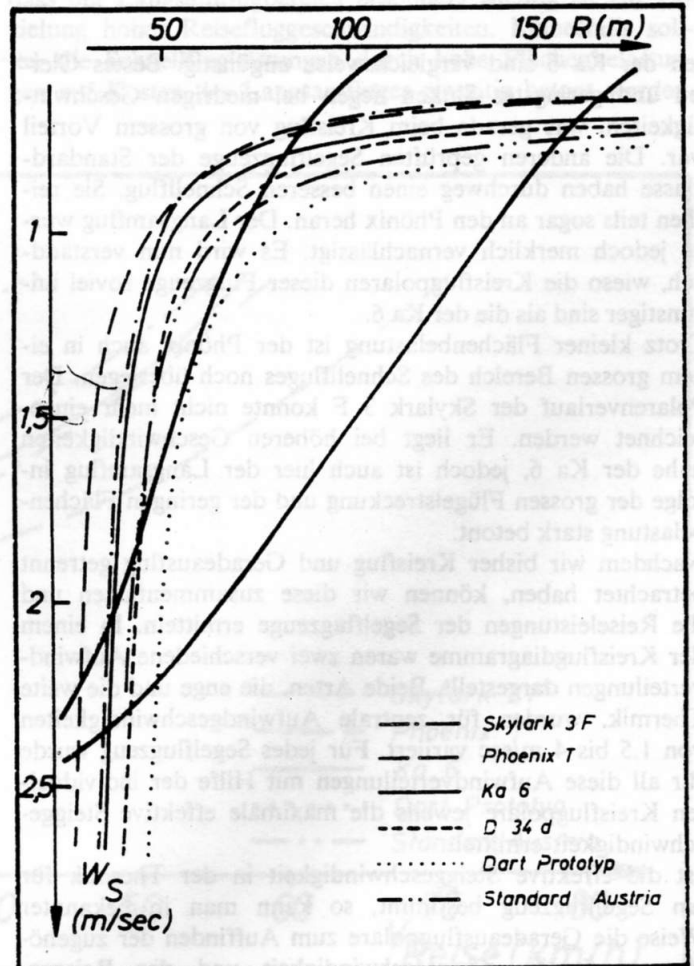
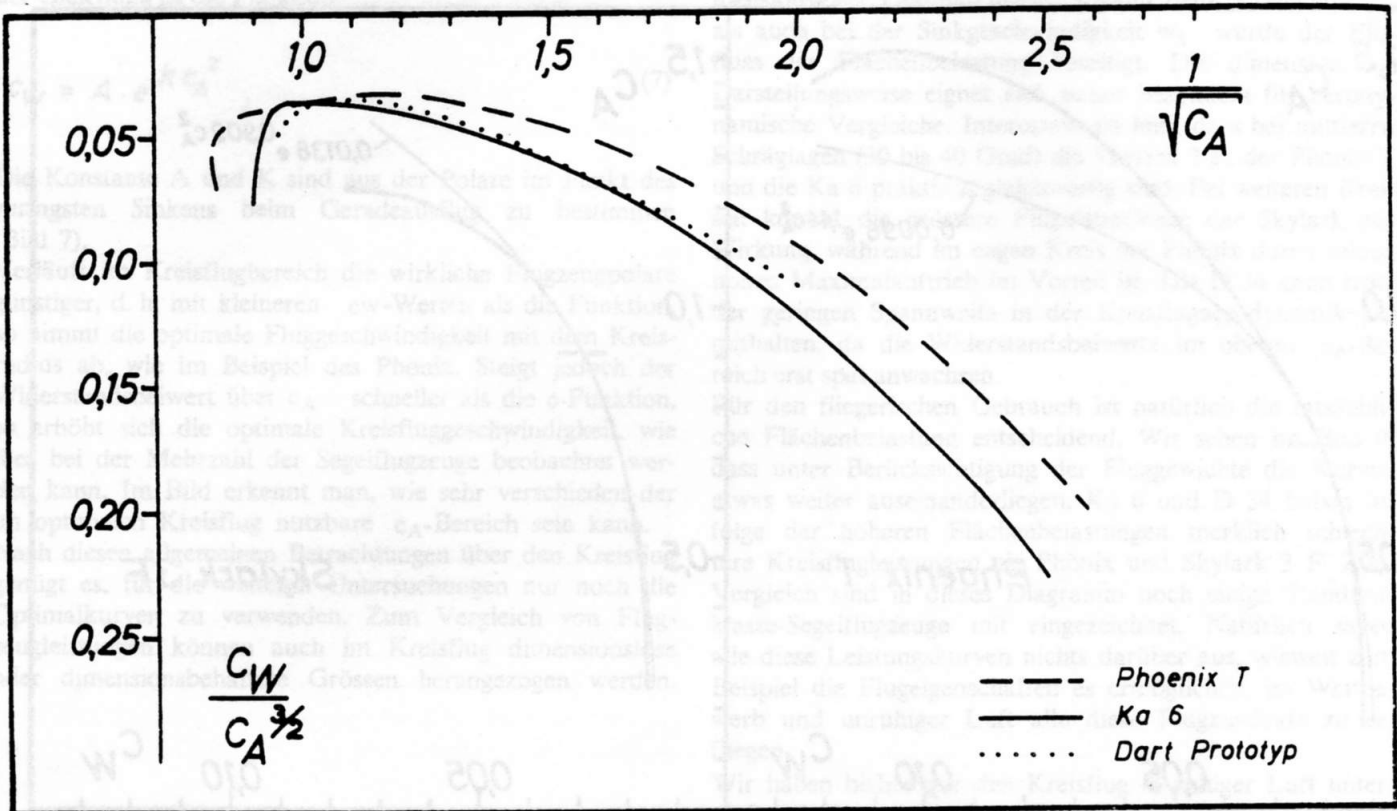


Bild 9: Kreisflug-Polaren

Bild 10: Geradeausflug-Polaren, dimensionslos



gen der Ka 6 sind vergleichsweise ungünstig. Bestes Gleiten und geringstes Sinken liegen bei niedrigen Geschwindigkeiten, was gerade beim Kreisflug von grossem Vorteil war. Die anderen geprüften Segelflugzeuge der Standardklasse haben durchweg einen besseren Schnellflug. Sie reichen teils sogar an den Phönix heran. Der Langsamflug wurde jedoch merklich vernachlässigt. Es wird nun verständlich, wieso die Kreisflugpolaren dieser Flugzeuge soviel ungünstiger sind als die der Ka 6.

Trotz kleiner Flächenbelastung ist der Phönix auch in einem grossen Bereich des Schnellfluges noch überlegen. Der Polarenverlauf der Skylark 3 F konnte nicht mehr eingezeichnet werden. Er liegt bei höheren Geschwindigkeiten nahe der Ka 6, jedoch ist auch hier der Langsamflug infolge der grossen Flügelstreckung und der geringen Flächenbelastung stark betont.

Nachdem wir bisher Kreisflug und Geradeausflug getrennt betrachtet haben, können wir diese zusammenfassen und die Reiseleistungen der Segelflugzeuge ermitteln. In einem der Kreisflugdiagramme waren zwei verschiedene Aufwindverteilungen dargestellt. Beide Arten, die enge und die weite Thermik, wurden für zentrale Aufwindgeschwindigkeiten von 1,5 bis 4 m/sec variiert. Für jedes Segelflugzeug wurde für all diese Aufwindverteilungen mit Hilfe der individuellen Kreisflugpolare jeweils die maximale effektive Steiggeschwindigkeit ermittelt.

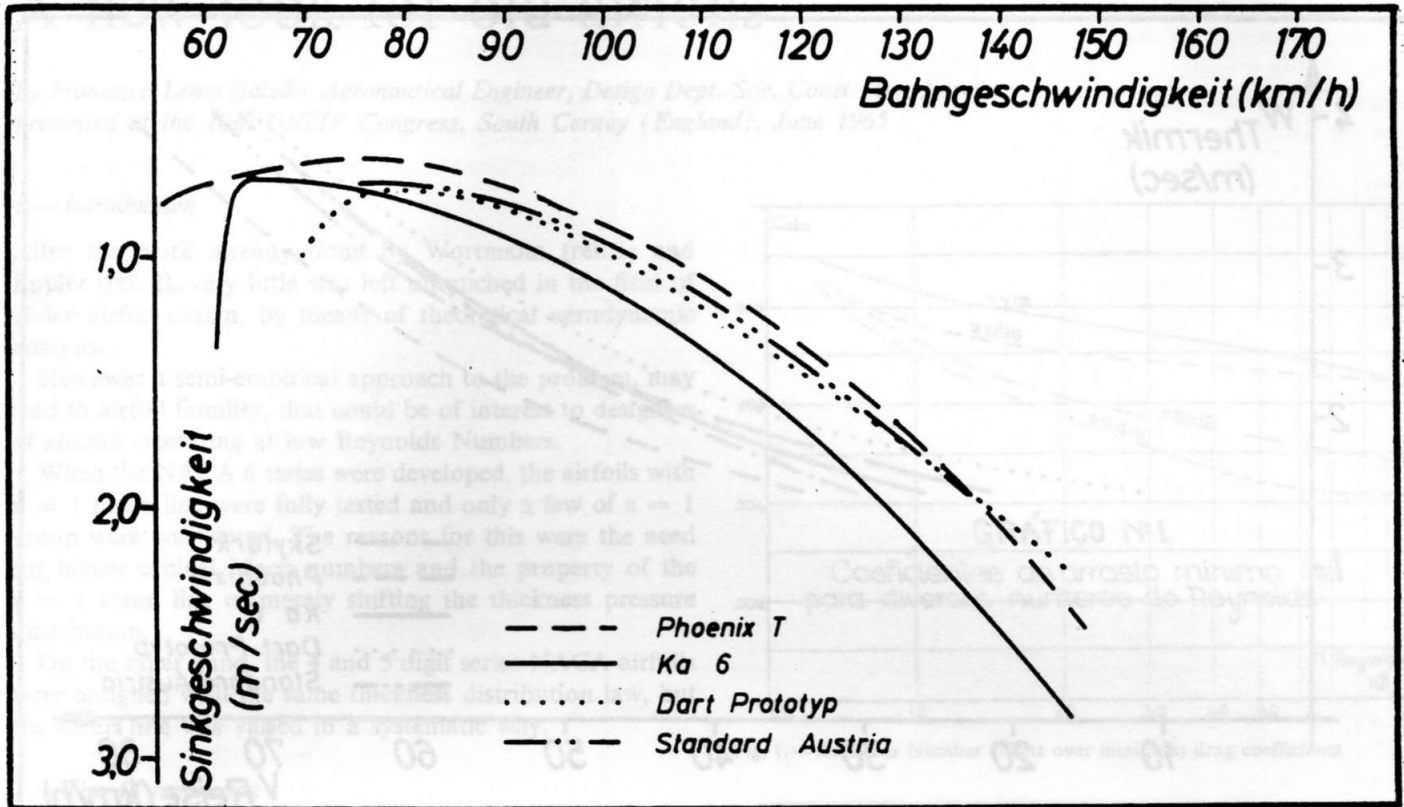
Ist die effektive Steiggeschwindigkeit in der Thermik für ein Segelflugzeug bestimmt, so kann man in bekannter Weise die Geradeausflugpolare zum Auffinden der zugehörigen optimalen Fluggeschwindigkeit und der Reisegeschwindigkeit benutzen. Man braucht lediglich jede der ge-

fundenen effektiven Steiggeschwindigkeiten im Nullpunkt des Geschwindigkeitsdiagrammes nach oben abzutragen und vom jeweiligen Endpunkt eine Tangente an die Polare zu legen. Der Schnittpunkt mit der Geschwindigkeitsachse liefert unmittelbar die zugehörige Reisegeschwindigkeit.

Sehen wir uns zunächst die Ergebnisse für enge Thermik an. Es ist selbstverständlich, dass bei kleinem Aufwinddurchmesser für alle Aufwindstärken eine starke Differenzierung der Segelflugzeuge im Kreisflug auftritt. Diesen Nachteil müssen alle Segelflugzeuge mit hoher Flächenbelastung in Kauf nehmen (Bild 12). Man erkennt, dass dieser Nachteil mit guten Schnellflugeleistungen nicht auszugleichen ist. Auch die minimale Sinkgeschwindigkeit der Geradeausflugpolare ist nicht entscheidend, wie wir am Beispiel der Skylark 3 F feststellen können. Die Überlegenheit des Phönix beruht allein auf seiner Fähigkeit, enge Kreise mit mässigen Widerstandsbeiwerten zu fliegen. Die Ka 6 kann, obwohl sie im Geradeausflug durchweg ungünstiger abschneidet, bei enger Thermik mit der Skylark 3 F konkurrieren. Die anderen Flugzeuge der Standardklasse liegen durchweg schlechter.

Legen wir eine etwas weitere Thermik zugrunde (Bild 13), so werden die Leistungsunterschiede kleiner, da jetzt auch bei grösseren Kreisen noch gute Aufwindbedingungen herrschen. Nur bei dieser weiten Thermik kann für die Segelflugzeuge hoher Flächenbelastung das geringere Steigen im Kreis durch die Schnellflugeleistungen ausgeglichen werden. Wir sehen bei kleinen Aufwindstärken aber auch hier noch die gleiche Reihenfolge der Flugzeuge in der Reisegeschwindigkeit. Wird jedoch die weite Thermik stark genug, so sind mehr und mehr die hohen Flächenbelastungen im Vor-

Bild 11: Geradeausflug-Polaren



teil. Ka 6 und Skylark 3 F werden zurückgedrängt. Es ist die weit verbreitete Gepflogenheit, Segelflugzeuge nach ihrer besten Gleitzahl und nach dem minimalen Sinken zu beurteilen. Ich glaube, diese einseitige Betrachtungsweise sollte aufgegeben werden.

Die Untersuchungen über den Kreisflug haben bewiesen, dass der Langsamflugbereich besonders wichtig ist zur Erzielung hoher Reisefluggeschwindigkeiten. Keinesfalls sollten die Schnellflugeleistungen durch hohe Flächenbelastungen auf Kosten des Langsamfluges einseitig betont werden.

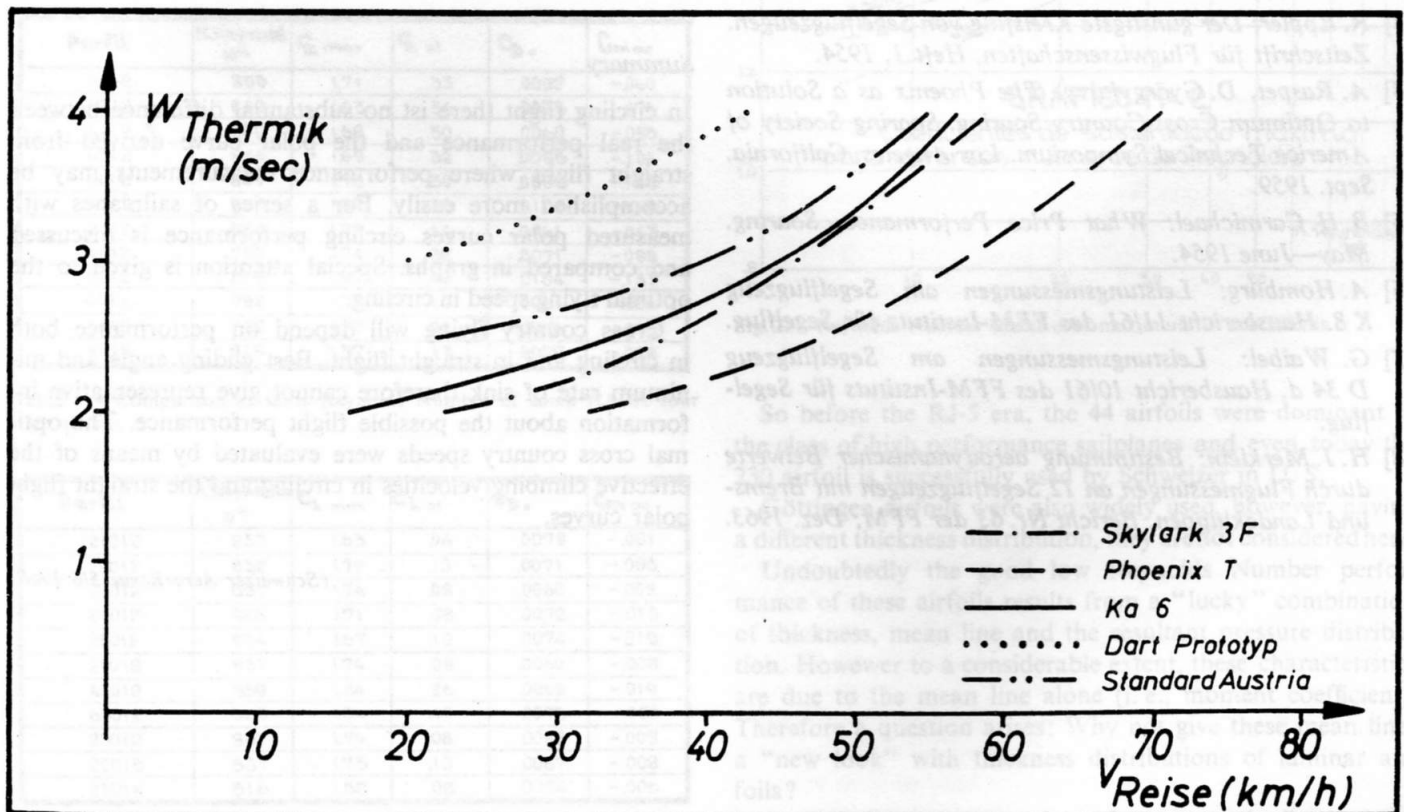
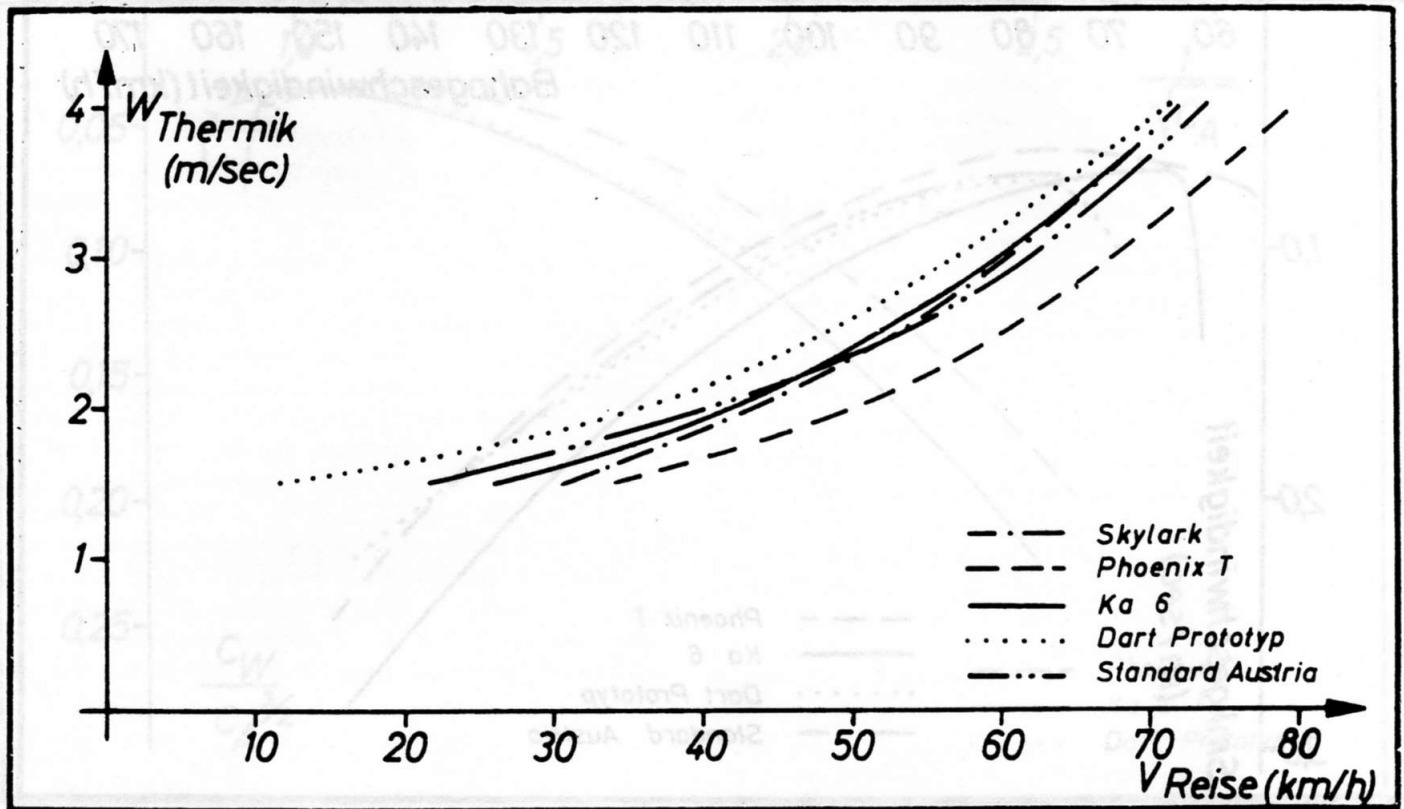


Bild 12: Reiseleistungen für enge Thermik

Bild 13: Reiseleistungen für weite Thermik



Literatur

- [1] H. Zacher: Der Kurvenflug der Segelflugzeuge. Thermik, Januar 1950.
- [2] H. Zacher: Zur Frage der Klappen an Segelflugzeugen. Thermik, Februar 1950.
- [3] R. Eppler: Der günstigste Kreisflug von Segelflugzeugen. Zeitschrift für Flugwissenschaften, Heft 1, 1954.
- [4] A. Raspet, D. Györgyalvy: The Phoenix as a Solution to Optimum Cross-Country Soaring. Soaring Society of America Technical Symposium. Los Angeles, California, Sept. 1959.
- [5] B. H. Carmichael: What Price Performance. Soaring, May—June 1954.
- [6] A. Homburg: Leistungsmessungen am Segelflugzeug K 8. Hausbericht 11/61 des FFM-Instituts für Segelflug.
- [7] G. Waibel: Leistungsmessungen am Segelflugzeug D 34 d. Hausbericht 10/61 des FFM-Instituts für Segelflug.
- [8] H. J. Merklein: Bestimmung aerodynamischer Beiwerte durch Flugmessungen an 12 Segelflugzeugen mit Brems- und Landeklappen. Bericht Nr. 63 der FFM; Dez. 1963.

Comparison of the Circling Flight Performance of Some Sailplanes on the Basis of Measured Polar Curves

Summary

In circling flight there is no substantial difference between the real performance and the polar curve derived from straight flight where performance measurements may be accomplished more easily. For a series of sailplanes with measured polar curves circling performance is discussed and compared in graphs. Special attention is given to the optimal flying speed in circling.

Cross country flying will depend on performance both in circling and in straight flight. Best gliding angle and minimum rate of sink therefore cannot give representative information about the possible flight performance. The optimal cross country speeds were evaluated by means of the effective climbing velocities in circling and the straight flight polar curves.

(Schweizer Aero-Revue 5/6 1966)