

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 125/126 (1945)
Heft: 18

Artikel: Aufgaben und Aussichten des Flugzeug-Verstellpropellers
Autor: Roth, Franz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-83744>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Aufgaben und Aussichten des Flugzeug-Verstellpropellers

Von Dipl. Ing. FRANZ ROTH, Forschungsabteilung der Firma Escher Wyss A.-G., Zürich

1. Einleitung

Die stürmische Entwicklung des Flugwesens ist weitgehend eine Folge der fortwährenden Verbesserung der Triebwerke. Die Fluggeschwindigkeiten und Triebwerk-Einheitsleistungen haben, wie Abb. 1 und 2 zeigen, im Laufe der Jahre stark zugenommen. Die dort dargestellten Kurven lassen gleichzeitig auch einen Blick in die nächste Zukunft werfen. Da der Propeller ein integrierender Bestandteil der klassischen Triebwerk-Anordnung ist, mussten auch auf diesem Teilgebiet grosse Entwicklungsarbeiten geleistet werden. Sie sind unter anderem gekennzeichnet durch die Einführung des vollautomatischen Verstellpropellers. Noch vor etwa zehn Jahren stellte er eine von der Fachwelt angestaunte Seltenheit dar; heute gehört er schon zur üblichen Ausrüstung eines Flugzeuges. Er ist neben seiner Hauptaufgabe, bei allen praktisch vorkommenden Fluggeschwindigkeiten das Drehmoment des mit voller Leistung arbeitenden Motors mit bestem Wirkungsgrad in Schubkraft umzuwandeln, zu verschiedenen neuen Aufgaben herangezogen worden. In der Schweiz wurde während des Krieges an der Entwicklung dieses wichtigen Triebwerkelementes intensiv weiter gearbeitet, in der Erkenntnis, dass die allgemeine Einführung des Verstellpropellers als aerodynamische Bremse nicht nur für militärische Zwecke, sondern auch für Verkehrsflugzeuge von ausserordentlicher Bedeutung ist. Er bietet eine Möglichkeit, die Wirtschaftlichkeit des Fernfluges weiter zu steigern. Da diese schweizerische Pionierarbeit heute ihre Früchte zu tragen beginnt, indem der Bremspropeller nunmehr auch im Ausland zur Geltung kommt, scheint es angebracht, über die sich hier stellenden Probleme zusammenfassend zu berichten.

2. Die Wirkungsweise des Propellers

Die *Hauptaufgabe* eines Flugzeug-Propellers ist das Erzeugen einer der Motorleistung entsprechenden Zugkraft. Dies geschieht nach dem Rückstossprinzip, Abb. 3: die durch den Propellerkreis strömende Luft wird durch die Wirkung der Propellerblätter beschleunigt. Die Reaktion der hierzu erforderlichen Beschleunigungskräfte ist die Zugkraft des Propellers. Auf diesem Prinzip beruhen nicht nur sämtliche Propellerarten, sondern auch der Antriebmechanismus der Düsenflugzeuge und Raketen [1] ¹⁾.

Die aerodynamischen Vorgänge können am Blattelement, Abb. 4, veranschaulicht werden. Die aus der Bahngeschwindigkeit und der Umfangsgeschwindigkeit u , sowie der Störgeschwindigkeiten Δu und Δv resultierende Anströmgeschwindigkeit w erzeugt am Profil eine Luftkraft dR , die in die Komponenten Auftrieb dA und Widerstand dW zerlegt wird. Das Verhältnis von Widerstand zu Auftrieb ist die Gleitzahl $\epsilon = dW/dA$; sie ist ein Mass für die aerodynamische Güte des Profils.

Wir zerlegen die Luftkraft dR in ihre tangentielle Komponente dT und ihre axiale Komponente dS ; die Summe der Kräfte dS über die radiale Ausdehnung des Blattes und über die Zahl der Blätter ergibt den Propeller-Schub. Die über das gleiche Gebiet gebildete Summe der Momente der Kräfte dT ergibt das resultierende Drehmoment der Luftkräfte, das im Beharrungszustand mit dem Motordrehmoment im Gleichgewicht stehen muss. In Abb. 4 sind auch die Störgeschwindigkeiten Δu und

¹⁾ Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf das Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

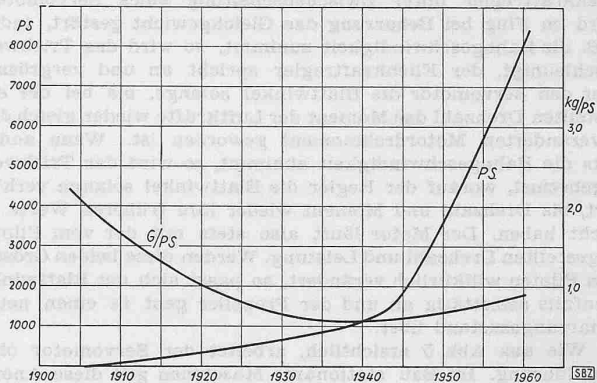


Abb. 2. Entwicklung von Leistung und Leistungsgewicht im Verlauf der Jahre 1900 bis 1960 (aus SBZ Bd. 125, S. 54).

Δv eingezeichnet, die neben der aerodynamischen Güte ϵ den Wirkungsgrad des Propellers bestimmen. Durch die Beschleunigung der Luft entsteht die axiale Störgeschwindigkeit Δv , während die Rotation des Propellers der Luft einen Drall erteilt, der durch die tangentielle Störgeschwindigkeit Δu dargestellt wird.

Die Luftkräfte sind einerseits dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit w proportional; andererseits sind sie eine Funktion des Anstellwinkels α . Bei einem Festpropeller ist der Blattwinkel ϕ unveränderlich. Nimmt im Beharrungszustand beispielsweise die Bahngeschwindigkeit v zu, so wächst der Winkel β und dementsprechend nehmen der Winkel α und mit ihm die Luftkraft dR ab; die Summe der Momente der Luftkräfte ist nicht mehr im Gleichgewicht mit dem vom Motor entwickelten Drehmoment, sodass das Triebwerk beschleunigt wird. Da dies wegen Beschädigung des Motors bei starken Ueberdrehzahlen unzulässig ist, muss das Antriebsmoment durch Drosselung des Motors verringert werden. Nimmt umgekehrt die Bahngeschwindigkeit v ab, so wird β kleiner, der Anstellwinkel α wächst und die Momentensumme der Luftkräfte übersteigt das Antriebsmoment, so dass das Triebwerk abgebremst wird, bis die mit abnehmender Drehzahl sinkende Momentensumme der Luftkräfte wieder gleich dem Antriebsmoment geworden ist. Der Motor läuft also langsamer und seine Leistung ist entsprechend kleiner. Man erkennt, dass beim Festpropeller der Motor nur bei einer bestimmten Bahngeschwindigkeit seine volle Leistung abgeben kann, bei allen andern Betriebsverhältnissen müssen entweder die Drehzahl oder das Drehmoment verringert werden. Beim Verstellpropeller kann hingegen der Blattwinkel in weiten Grenzen verändert werden, so dass die vom Piloten gewählte Motorleistung bei allen Bahngeschwindigkeiten voll ausgenutzt wird, sofern er oder ein Regler dafür sorgen, dass der Blattwinkel fortlaufend den richtigen Wert einnimmt.

Die Verstellung der Propellerflügel kann mechanisch, elektrisch oder hydraulisch (mit Drucköl) erfolgen. Sie kann vom Piloten von Hand vorgenommen oder einem Drehzahlregler anvertraut werden. Mechanische Verstellsysteme eignen sich nur für kleine Propeller von Sportflugzeugen, die dann meist von Hand eingestellt werden. Wenn man sich vorstellt, dass z. B. die Fliehkraft eines Propeller-

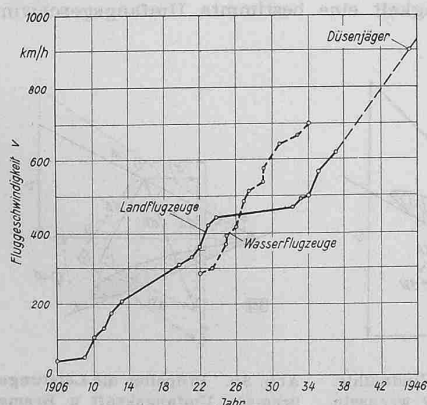


Abb. 1. Entwicklung der maximalen Fluggeschwindigkeit

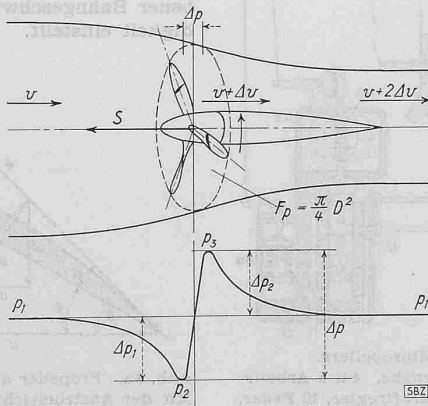


Abb. 3. Zur Strahltheorie des Propellers

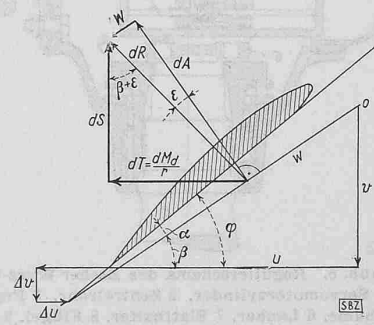


Abb. 4. Kräfte und Geschwindigkeiten am Blattelement

flügels in Leichtmetall der Leistungsklasse 1000 bis 1500 PS bei voller Drehzahl etwa 40 t beträgt und bei mehrmotorigen Flugzeugen die Drehzahl nicht nur konstant gehalten werden muss, sondern alle Propeller auch zu synchronisieren sind, versteht man, weshalb ein moderner Verstellpropeller nur vollautomatisch gesteuert werden kann. Diese Steuerung erfolgt durch einen Fliehkraftregler unter Zwischenschaltung eines Servomotors. Wird im Flug bei Beharrung das Gleichgewicht gestört, indem z. B. die Bahngeschwindigkeit zunimmt, so wird das Triebwerk beschleunigt, der Fliehkraftregler spricht an und vergrößert über den Servomotor die Blattwinkel solange, bis bei der eingestellten Drehzahl das Moment der Luftkräfte wieder gleich dem unveränderten Motordrehmoment geworden ist. Wenn anderseits die Bahngeschwindigkeit abnimmt, so wird das Triebwerk abgebremst, worauf der Regler die Blattwinkel solange verkleinert, bis Drehzahl und Moment wieder ihre früheren Werte erreicht haben. Der Motor läuft also stets mit der vom Piloten eingestellten Drehzahl und Leistung. Werden diese beiden Grössen vom Piloten willkürlich verändert, so passt sich der Blattwinkel ebenfalls selbsttätig an und der Propeller geht in einen neuen Beharrungszustand über.

Wie aus Abb. 5 ersichtlich, arbeitet der Servomotor ohne Rückführung. Im Bau stationärer Maschinen gilt diese Anordnung als das klassische Beispiel der instabilen Regulierung. Dank der besonders ausgeprägten *Selbstregelung* des Flugzeug-Propellers [2] ist aber das einfache Getriebe ohne Rückführung nicht nur brauchbar, sondern zeichnet sich durch besonders gute Stabilitätseigenschaften aus. Die Arbeitsweise der Verstelleinrichtung ist aus dem Funktionsschema Abb. 5 ersichtlich; wir werden in Abschnitt 5 auf sie zurückkommen. Abb. 6 und 7 zeigen die robuste und einfache Bauart von Servomotor und Propeller [3].

3. Die Arbeitsbereiche des Verstellpropellers

Wie wir gesehen haben, muss der Propeller zur Bewältigung seiner Hauptaufgabe verstellbar sein. Für die Geschwindigkeitspanne zwischen Start und beschleunigtem Gleitflug (bzw. Sturzflug) benötigt er einen Verstellbereich von 30 bis 35° und kann dann bei allen Flugzuständen und Motorleistungen den grösstmöglichen Schub erzeugen. Diese Blattwinkelspanne, in der der Propeller in der Regel unter der Kontrolle des Geschwindigkeitsreglers steht, wird der normale, *positive Regulierbereich* genannt. Obwohl moderne Triebwerke sehr zuverlässig arbeiten, können trotzdem im Fluge Pannen auftreten. Einmotorige Flugzeuge müssen alsdann sofort notlanden, während mehrmotorige Apparate mit den verbleibenden Motoren weiterfliegen können. Um diesen Weiterflug sicher zu ermöglichen und dabei die beschädigten Motoren stillsetzen zu können, weist jeder moderne Verstellpropeller Einrichtungen auf, die gestatten, die Flügel in die *Fahren- oder Segelstellung* zu bringen. Hierzu wird der Blattwinkel bis auf etwa 90° vergrößert, sodass die Propellerblätter parallel zur Luftströmung stehen, und bei stillstehendem Motor minimalen Luftwiderstand aufweisen. Die noch arbeitsfähigen Motoren werden dadurch entlastet.

Man kann nun aber die Blattwinkel nicht nur über den positiven Regulierbereich hinaus vergrößern, sondern auch unter die

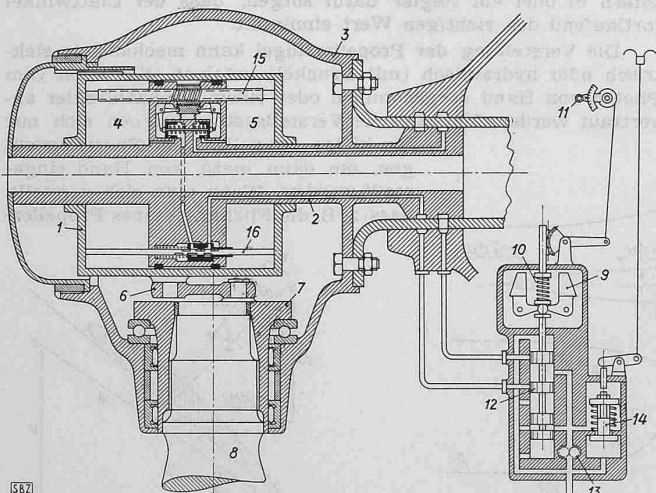


Abb. 5. Regulierschema des Escher Wyss-Verstellpropellers.

1 Servomotorzylinder, 2 Zentralrohr, 3 Propellernabe, 4 u. 5 Arbeitsräume, 6 Lenker, 7 Blatthalter, 8 Flügel, 9 Fliehkraftregler, 10 Feder, 11 Drehzahlverstellvorrichtung, 12 Steuerschieber, 13 Druckölpumpe, 14 Blockierventil, 15 Blockiervorrichtung, 16 Hubbegrenzevorrichtung



Abb. 7. Vierflügliger Escher Wyss-Verstellpropeller auf einem Schweizer Militärflugzeug

Startstellung verkleinern. Wie man aus Abb. 4 erkennt, erreicht man durch Verkleinern von φ bei gegebenen Geschwindigkeiten u und v sehr bald eine Stellung, in der α negativ wird, und die Kräfte dS und dT ihre Richtung umkehren, wie das z. B. in Abb. 8a dargestellt ist. Der Propeller wird dabei durch die Luftkräfte mit der vollen Drehzahl in Umlauf gehalten und zieht den leer mitlaufenden Motor mit; man spricht hier von *Windmühlenbetrieb*. Die Luftkräfte sind dabei verhältnismässig klein, entsprechend dem kleinen Bremswiderstand des Motors. Verkleinert man die Blattwinkel weiter, so gelangt man bei kleinen noch positiven Winkeln in ein Gebiet, in dem bei schwachen Umfangskräften, die eben zum Mitziehen des Motors ausreichen, grosse negative Schubkräfte auftreten; in dem also das Flugzeug stark abgebremst wird. Diese sog. *Windmühlenbremse* findet demnach bei leer laufendem Motor statt und ist auf einen kleinen Blattwinkelbereich (von etwa $+1$ bis -3°) beschränkt.

Das zum Antreiben des Motors nötige Drehmoment ist bei normalen Fluggeschwindigkeiten gegenüber dem Drehmoment der Luftkräfte verschwindend klein; vernachlässigt man es ganz, so kann man den Windmühlenbetrieb durch das Verschwinden des Drehmomentes der Luftkräfte, also durch das Erfüllen der Bedingung $k_d = 0$ kennzeichnen. Da es sich hierbei um stabile Betriebszustände handelt, sagt man, der Propeller rotiere im *Stabilisierungspunkt*. Bei Betrachtung der Geschwindigkeitsdreiecke ist leicht einzusehen, dass sich beim Windmühlenbetrieb zu jedem positiven Blattwinkel ein eindeutig bestimmtes Verhältnis der Geschwindigkeiten v/u , also bei gegebener Bahngeschwindigkeit eine bestimmte Umfangsgeschwindigkeit einstellt.

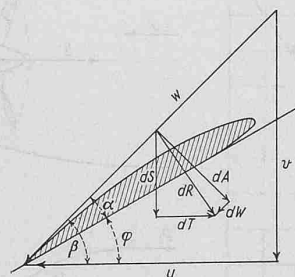


Abb. 8a. Propeller als Windmühle. Mit der Anströmrichtung wechseln die Luftkräfte; die Umfangskraft treibt den Propeller an

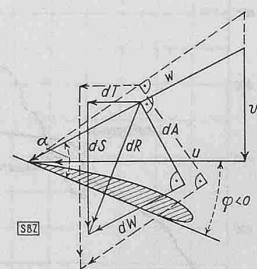


Abb. 8b. Propeller als Leistungsbremse. Umfangskraft u. Bremschub wachsen mit der Bahngeschwindigkeit

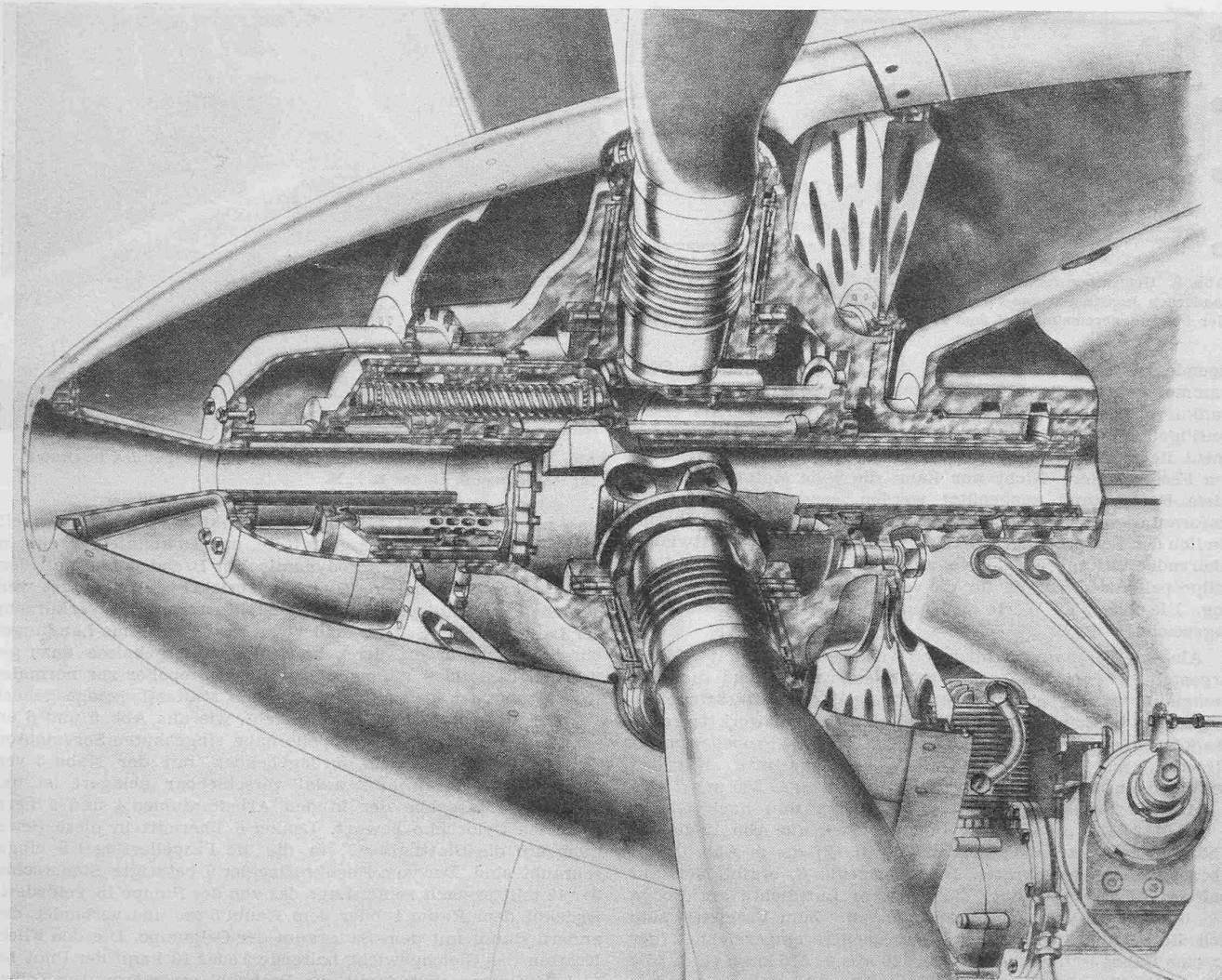


Abb. 6. Schnitt durch die Nabe eines Escher Wyss-Verstellpropellers

Man kann den Blattwinkel über den Bereich der Windmühlensbremsung hinaus soweit verkleinern, dass die Richtung der Umfangskraft erneut wechselt, Abb. 8b, und der Propeller vom Motor angetrieben werden muss. Da der Propeller nunmehr so angestellt ist, dass die Strömung vollständig abreisst, ergeben sich verhältnismässig kleine Auftriebskräfte dA und sehr grosse Widerstände dW . Die Bremswirkung nimmt also zu. Da dabei der Antriebsmotor das Propellerdrehmoment aufbringen muss, wird von einer *Leistungsbremse* gesprochen. Das Verhalten des Propellers als aerodynamische Bremse ist aber grundsätzlich von der normalen Arbeitsweise verschieden. Während nämlich die Schubkraft des positiv angeströmten Propellers mit der Bahngeschwindigkeit abnimmt, wächst die Bremskraft mit zunehmendem negativem Blattwinkel stark an (siehe die gestrichelten Linien in Abb. 8b); sie kann ein Mehrfaches des Startschubes erreichen, unter Umständen sogar noch grösser werden, als das gesamte Flugzeuggewicht. Der als Bremse arbeitende Propeller ist bestrebt, Luft in die Fahrtrichtung, also gegen die Bahngeschwindigkeit auszustossen; es ist, wie wenn der Propeller durch eine Scheibe ersetzt worden wäre, die sich mit der Bahngeschwindigkeit des Flugzeuges gegen den Luftstrom fortbewegt. Offensichtlich nimmt dabei der Flugwiderstand, d. h. die vom Propeller ausgeübte Bremskraft mit der Bahngeschwindigkeit stark (quadratisch) zu. Die dabei auftretenden Strömungsverhältnisse können qualitativ durch Modellversuche abgeklärt werden, indem man dem Luftstrom Rauchfäden beimischt. Die quantitative Bestimmung der Kräfte erfolgt mit Vorteil im Windkanal durch Wägung.

Dieser kurze Ueberblick zeigt bereits eine Fülle von Problemen, die gelöst sein müssen, bevor der Propeller als aerodynamische Bremse betriebssicher verwendet werden kann. Dazu kommen die Fragen der Festigkeit, der zuverlässigen und raschen Verstellung, sowie der zweckmässigsten Bedienung. Wie ausserordentlich wirksam sich die aerodynamische Bremse alsdann erweist, zeigt Abb. 9.

4. Die charakteristischen Kennwerte des Propellers

Auf Grund der Luftschraubentheorie [4] kann nur der gewählte Betriebspunkt des Propellers mit hinreichender Genauigkeit vorausberechnet werden. Da aber sein Verhalten bei den verschiedensten Flugzuständen und im ganzen Verstellbereich bekannt sein sollte, ist man auf Modellversuche angewiesen. Dazu setzt man das Propellermodell im Windkanal einem der Flugeschwindigkeit entsprechenden Luftstrom aus, Abb. 10, treibt es durch einen speziellen, hochtourigen Elektromotor an und bestimmt nun durch Auswägen die gesamte Schubkraft S in kg und das Drehmoment der Luftkräfte M_d in mkg. Diese Messungen werden für verschiedene Geschwindigkeitsverhältnisse $\lambda = v/u$ (Fortschrittsgrad genannt) und für verschiedene Blattwinkel φ durchgeführt. Um die Ergebnisse auf alle geometrisch ähnlichen Propellertypen anwenden zu können, ist es üblich, mit den folgenden dimensionslosen Kennwerten zu rechnen [5]:

$$\text{Schubbeiwert } k_s = \frac{2S}{\rho u^2 F} \quad \dots \quad (1)$$

$$\text{Drehmomentbeiwert } k_d = \frac{2M_d}{\rho u^2 F R} \quad \dots \quad (2)$$

Die Luftdichte ρ ist dabei der Abb. 11 zu entnehmen. $F = \pi R^2$ bedeutet die von der Propellerspitze umschriebene Kreisfläche in m^2 .

Die Energieumsetzung des Motordrehmomentes in Schubleistung erfolgt nicht verlustfrei, sondern mit einem gewissen «Propulsions»-Wirkungsgrad, für den gesetzt wird:

$$\eta = \frac{Sv}{M_d \omega} = \frac{SR}{M_d} \frac{v}{\omega} = \frac{k_s}{k_d} \lambda \quad \dots \quad (3)$$

Die durch Auswägen in der beschriebenen Art bestimmten Kennwerte k_s und k_d ergeben für eine bestimmte vierflügelige Propellerklasse für positive, im Regulierbereich liegende Blattwinkel die Kurven der Abb. 12, für kleine positive und negative, d. h. im Bereich der Windmühlen- und der Leistungsbremse

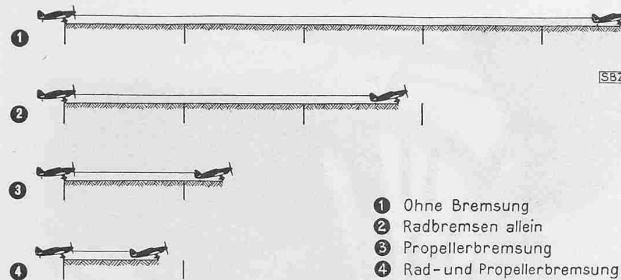


Abb. 9. Gemessene Ausrollstrecken bei der Landung eines modernen Jagdflugzeuges veranschaulichen die Wirksamkeit der Leistungsbremse mit dem Propeller

liegende Blattwinkel die Kurven der Abb. 13. Zu diesen Diagrammen gehören die nach Gleichung (3) berechneten Wirkungsgradkurven, Abb. 14b, während Abb. 14a sinngemäss für einen dreiflügeligen Propeller gilt²⁾. Diese Wirkungsgradkurven zeigen erneut die grosse Überlegenheit des Verstellpropellers gegenüber dem Festpropeller: Nicht nur kann die volle Motorleistung in jedem Flugzustand ausgenutzt werden, sondern die Energieumformung vollzieht sich mit bestem Wirkungsgrad. Während nämlich der Festpropeller nur eine, zu seinem festen Blattwinkel gehörende Wirkungsgradkurve aufweist, bewegt sich der Verstellpropeller den Kurven für die verschiedenen Blattwinkel entlang. Die optimalen Werte sind auf Abb. 14a und b gestrichelt eingezeichnet.

Als eine der hauptsächlichsten Anwendungen der in Abb. 12 dargestellten Propellercharakteristik sei nachfolgend die dem Fachmann längst bekannte Berechnung der Schubkräfte eines Flugzeuges in Erinnerung gebracht, dessen Triebwerk folgende Hauptdaten aufweist: Motorleistung 1000 PS, Propellerdurchmesser 3,1 m, Flughöhe 3000 m ($\rho = 0,09 \text{ kgs}^2/\text{m}^4$). Für den vierflügeligen Verstellpropeller wählen wir $u = 250 \text{ m/s}$, also $\omega = 161/\text{s}$, woraus $M_d = N_e 75/\omega = 465 \text{ mkg}$ und nach Gl. (2) $k_d = 0,0142$. Für diesen k_d -Wert suchen wir aus Abb. 12 die zugehörigen k_s -Werte und erhalten mit Gl. (2) die in Abb. 15 mit S bezeichneten Schubkräfte. Der Startschub S_0 ergibt sich auf analoge Weise, wobei aber die grössere Luftdichte am Boden ($\rho = 0,12 \text{ kgs}^2/\text{m}^4$) zu berücksichtigen ist. Zum Vergleich sind auch die Schubkräfte S_f eines Festpropellers eingezeichnet, der für eine Bahngeschwindigkeit von $160 \text{ m/s} = 575 \text{ km/h}$ ($\varphi = 45^\circ$) gebaut ist. Sie können ebenfalls aus Abb. 12 bestimmt werden. Indem man den Luftwiderstand W eines dem betrachteten Triebwerk entsprechenden Apparates aufzeichnet, stellt man fest, dass dieser Apparat beim unbeschleunigten Horizontalflug eine Geschwindigkeit von rd. 640 km/h (Schnittpunkt A der Kurven S und W) annimmt, während bei kleineren Bahngeschwindigkeiten die durch die vertikale Schraffur hervorgehobenen Schubkraftüberschüsse für Steigen oder Beschleunigen verfügbar sind.

5. Der Propeller als aerodynamische Bremse

Es ist schon seit geraumer Zeit bekannt, dass der negativ angestellte Propeller beträchtliche Bremskräfte erzeugen kann. Bereits 1921 hat die Luftwaffe der U. S. A. Bremsversuche in dieser Richtung unternommen, was ihr umso wertvoller erschien, als die damaligen Flugzeuge keine Radbremsen aufwiesen [6]. 1932 wurden Flugversuche durchgeführt, wobei im Sturzflug mit der flachgestellten und freilaufenden Luftschraube gebremst wurde (Windmühlenbremsung). Die Resultate dieser Messflüge wurden im NACA-Report 599 veröffentlicht [7].

1937 wurde der Gedanke von Prof. Dr. J. Ackeret, E. T. H. Zürich erneut aufgegriffen [8]. Die Zeit war nun für die Verwirklichung reif. In enger Zusammenarbeit mit ihm entwickelte Escher Wyss

²⁾ Vgl. auch SBZ, Bd. 121, S. 171*, Abb. 1 (1943).

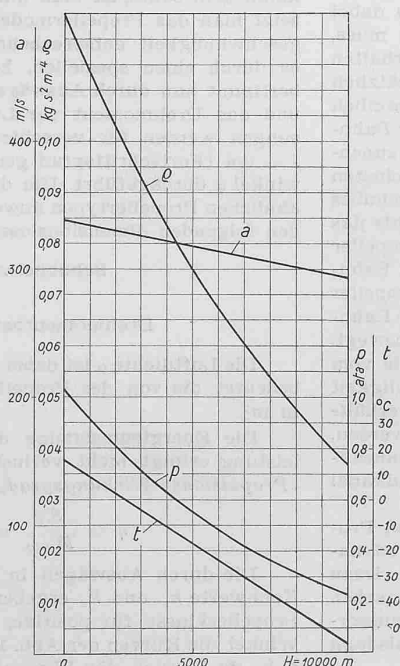


Abb. 11 (links). Zustandsgrössen der Luft in Abhängigkeit der Höhe nach den internationalen Normen.

a Schallgeschwindigkeit, p Druck, t Temperatur, rho Dichte

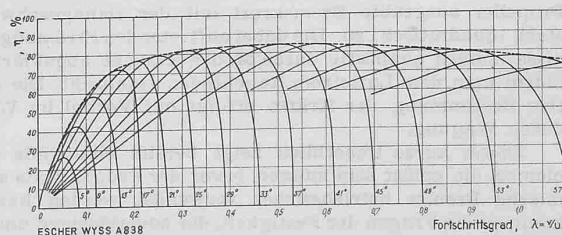
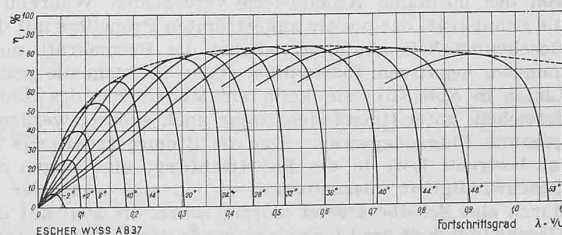


Abb. 14. Propulsionswirkungsgrade. a (oben) dreiflügeliger Modellpropeller, b (unten) vierflügeliges Modell

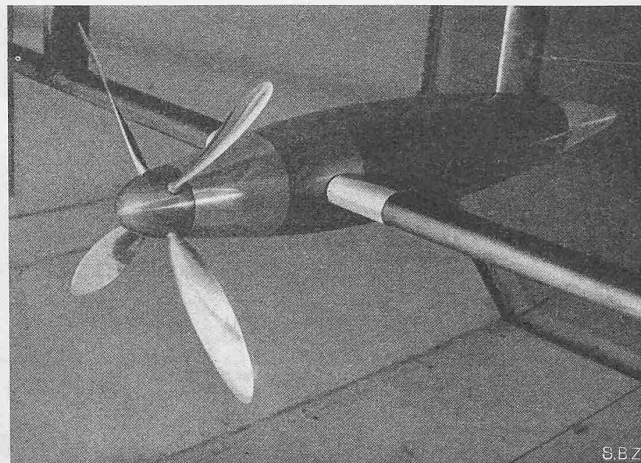


Abb. 10. Vierflügliger Modellpropeller im Windkanal des Institutes für Aerodynamik an der E. T. H.

eine zuverlässige und gefällige Konstruktion, die eine Schnellverstellung des Propellers gestattete, und so konnten bereits im Jahre 1941 die ersten aerodynamischen Bremsungen mit dem negativ angestellten Propeller betriebsicher durchgeführt werden. Sie ergaben die in Abb. 9 dargestellte wesentliche Verkürzung der Landestrecke. Seither sind viele hundert Brems-Landungen durchgeführt worden, deren befriedigende Ergebnisse dazu geführt haben, dass nunmehr der Bremspropeller zur normalen Ausrüstung der neuen schweizerischen Militärflugzeuge gehört.

Der Verstellmechanismus besteht, wie aus Abb. 5 und 6 ersichtlich, aus dem in die Propellernabe eingebauten Servomotor-Zylinder 1, der auf dem durchgehenden, mit der Nabe 3 verschraubten Zentralrohr 2 axial verschiebbar gelagert ist und sich nach Massgabe der in den Arbeitsräumen 4 und 5 herrschenden Oeldrücke bewegt. Lenker 6 übermitteln diese Bewegung auf die Blatthalter 7, in die die Propellerflügel 8 eingeschraubt sind. Der vom Fliehkraftregler 9 betätigte Steuerschieber 12 teilt je nach seiner Lage das von der Pumpe 13 geförderte Drucköl dem Raum 4 oder dem Raum 5 zu und verbindet den andern Raum mit dem Saugraum der Oelpumpe. Die den Fliehkraften das Gleichgewicht haltende Feder 10 kann der Pilot bei 11 beeinflussen und damit die Drehzahl verändern. Im Kolben ist eine Blockiervorrichtung 15 eingebaut, die die ganze Verstellvorrichtung selbsttätig in der momentanen Lage festhält, wenn ein Regulierungsvorgang abgeschlossen ist, oder wenn der Oeldruck zufolge Undichtheit oder Versagen der Oelpumpe abfallen sollte. Der Pilot kann die Blockierung durch Öffnen des Ventiles 14 vornehmen, wenn er für besondere Zwecke, z. B. bei Versuchsflügen, mit festgestellten Blattwinkeln fliegen will.

Eine Hubbegrenzungs Vorrichtung 16 grenzt den normalen positiven Regulierbereich gegen die noch weiter möglichen Verstellbereiche ab (Segelstellung, Bereiche der Windmühlen- und Leistungsbremung) und verhindert so Fehlmanöver. Die Ölpumpe ist für eine Verstellgeschwindigkeit im Regulierbereich von 6 bis 8°/s gebaut.

Für die eigentliche Schnellverstellung vom normalen Regulierbereich in die Bremsstellung und wieder zurück, wird zusätzlich Öl unter höherem Druck einem unter Pressluft stehenden Speicher entnommen, wobei Geschwindigkeiten bis 50°/s und momentane Verstellleistungen bis 15 PS erzielt werden. Der Pilot löst diesen Vorgang an einem Einhebel-Kommandogerät aus, durch dessen Betätigung augenblicklich die nötigen Schaltungen der Ölwege erfolgen und gleichzeitig die Energiezufuhr zum Motor, der Ladedruck und die Propellerdrehzahl im gewünschten Sinne und Mass beeinflusst werden.

Nachdem der Erfolg dieses Erzeugnisses der schweizerischen Maschinenindustrie in der ausländischen Fachpresse anerkannt wurde³⁾, sind in letzter Zeit auch amerikanische und englische Propellerfirmen dazu übergegangen, ihre Luftschrauben für Bremsmanöver auszurüsten. Beim amerikanischen «Curtiss»-Propeller erfolgt die Verstellung elektrisch, wobei für die Schnell-Verstellung der Elektromotor höhere Spannung erhält, also «übertoltet» wird [9]. Aus der für den Uebergang in die Bremsstellung angegebenen Verstellzeit von 5 s kann auf eine Verstellgeschwindigkeit von nur 8°/s geschlossen werden. Der amerikanische «Hamilton»- und der englische «de Havilland»-Propeller sind mit Drucköl verstellbar, so dass sie wesentlich höhere Verstellgeschwindigkeiten erreichen können. Verschiedene schwere Bombardierungs- und Verkehrsflugzeuge sind schon mit Bremspropellern ausgerüstet⁴⁾, und man spricht bereits von einer Berücksichtigung dieses neuen Triebwerkelementes in der Zivil-Luftfahrtgesetzgebung (CAA) der U. S. A.⁵⁾

Diese Andeutungen lassen erkennen, dass die Bedeutung der aerodynamischen Bremsung mit dem Propeller nunmehr allgemein anerkannt wird. Da sich daraus weitere Folgerungen

³⁾ Aircraft Engineering: August, Sept. 1944; Aeronautics: Dez. 1944; Flight: 5. April 1945.

⁴⁾ Verschiedene Meldungen der Interavia, sowie z. B. The De Havilland «Dove» in Flight, 12. April 1945.

⁵⁾ Johnson und Colman: Influence of Performance Characteristics on Airport Requirements. Aero Digest 15 June 1945.

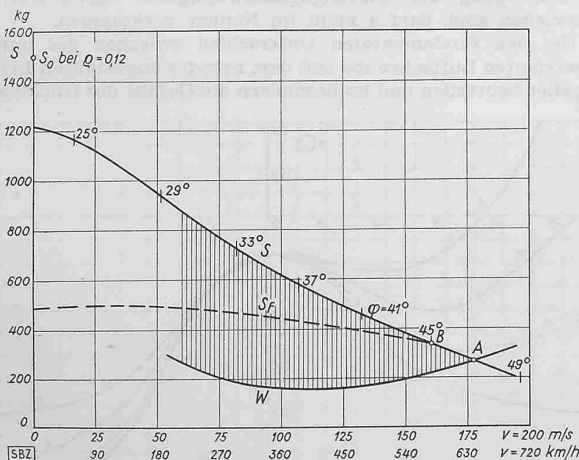


Abb. 15. Schubkräfte eines vierflügeligen Verstellpropellers von 3,1 m Durchmesser in Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit bei $N = 1000$ PS, $u = 250$ m/s, $\rho = 0,09$ kg s²/m⁴ (rd. 3000 m Höhe). S_0 Standschub am Boden, S_f Schubkräfte des gleichen Propellers bei fester Blattstellung entsprechend einer Reisegeschwindigkeit von 160 m/s. W Luftwiderstand des zugehörigen Flugzeuges. A Betriebspunkt bei stationärem Horizontalflug u. voller Leistung

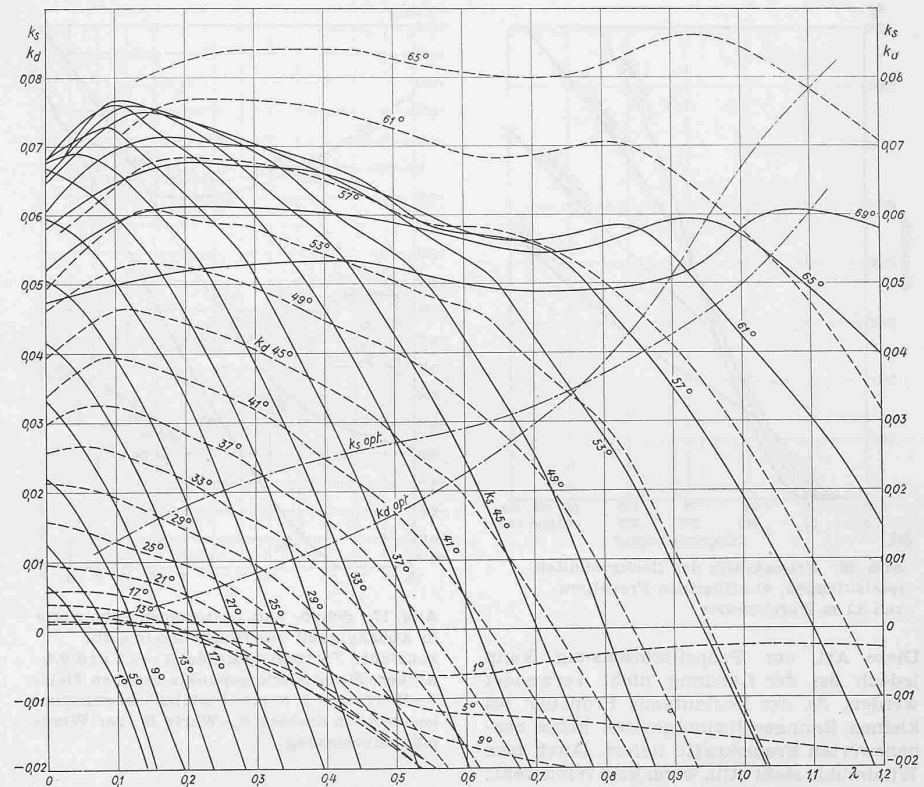


Abb. 12. Schubbeiwerte k_s (ausgezogen) und Drehmomentbeiwerte k_d (gestrichelt) eines vierflügeligen Modellpropellers im Bereich positiver Blattwinkel

ergeben, möchten wir auf einige Einzelheiten etwas ausführlicher eingehen.

6. Windmühlen- oder Leistungsbremung

Es könnte zweckmässig erscheinen, im Sturzflug die Windmühlen-Bremung anzuwenden. Dazu müssten die Flügel aus dem normalen positiven Verstellbereich mit möglichst grosser Verstellgeschwindigkeit auf so kleine Anstellwinkel gebracht werden, dass sie vom Fahrtwind angetrieben werden und den Motor mit der gewünschten Betriebsdrehzahl in Umlauf halten. Bei grossen Bahngeschwindigkeiten können auf diese Weise, wie aus Abb. 16 hervorgeht, bereits beträchtliche Bremskräfte erzielt werden.

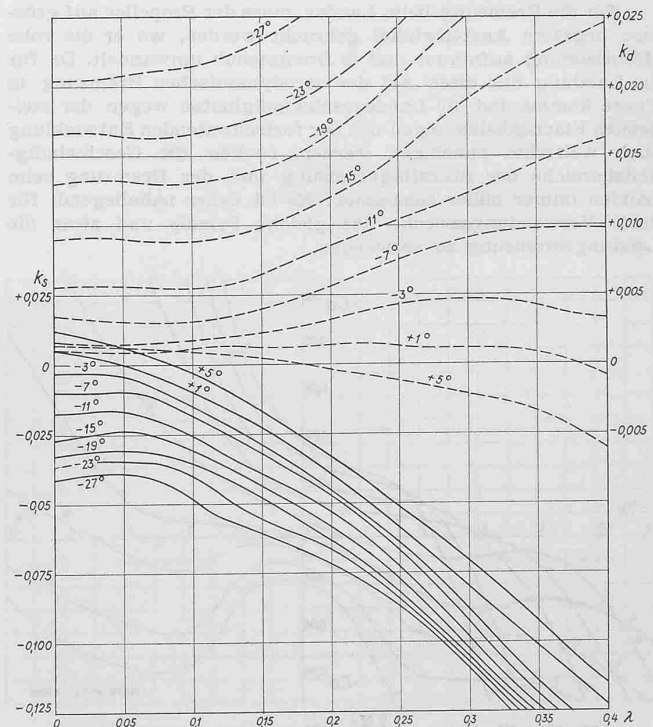


Abb. 13. Schub- und Drehmomentbeiwerte eines vierflügeligen Modellpropellers im Bereich der Windmühlen- u. Leistungsbremung

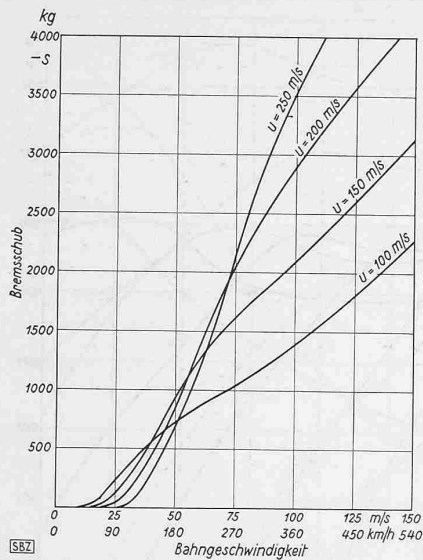


Abb. 16. Bremskräfte des flachgestellten leerlaufenden, vierflügligen Propellers von 3,1 m Durchmesser

Diese Art der Propellerbremsung kann jedoch bei der Landung nicht verwendet werden, da der leerlaufende Propeller bei kleinen Bahngeschwindigkeiten keine nennenswerten Bremskräfte liefert. Auch eine Windmühle steht still, wenn kein Wind weht!

Die zahlenmässige Bestimmung der bei der Windmühlen-Bremsung auftretenden Bremskräfte ist auf Abb. 17 durchgeführt. Für zwei verschiedene Fortschrittsgrade ($\lambda = 0,3$ und $\lambda = 0,4$) ist der Verlauf der Propellerbeiwerte k_s und k_d in Funktion des Blattwinkels φ aus dem Diagramm Abb. 13 übertragen worden. Für jeden Fortschrittsgrad treten zwei Stabilisierungspunkte A und B auf. Der obere Punkt A liegt beim Uebergang aus dem positiven Verstellbereich in den Windmühlenbereich und liefert, wie aus dem zugehörigen Diagramm der am Blattelement angreifenden Kräfte ersichtlich ist, nur geringe Bremskräfte. In der Tat sind die durch die Punkte A' dargestellten k_s -Werte nur sehr klein. Der untere Stabilisierungspunkt liegt beim Uebergang aus dem Windmühlenbereich in den Bremsbereich bei sehr kleinen Winkeln φ und liefert die grossen, durch die Punkte B' dargestellten Werte k_s , denen die hohen Bremskräfte der Windmühlen- oder Leerlaufbremsung entsprechen.

Für die Bremsung beim Landen muss der Propeller auf grössere negative Anstellwinkel gebracht werden, wo er die volle Motorleistung aufnimmt und in Bremsschub umwandelt. Da für die Landung nur diese Art der aerodynamischen Bremsung in Frage kommt und die Landegeschwindigkeiten wegen der steigenden Flächenbelastungen mit der fortschreitenden Entwicklung auch weiterhin zunehmen werden, rücken die Geschwindigkeitsbereiche der Sturzflugbremsung und der Bremsung beim Landen immer näher zusammen. Es ist daher naheliegend, für beide Verwendungszwecke das gleiche Prinzip und zwar die Leistungsbremsung zu verwenden.

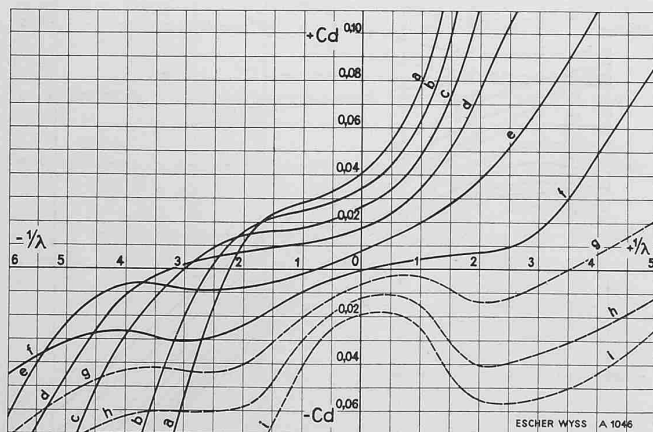


Abb. 18b. Werte $C_d = \frac{2 M_d}{\rho v^2 F R}$ für positive (Kurven g bis i) und negative (Kurven a bis f) Umfangsgeschwindigkeiten

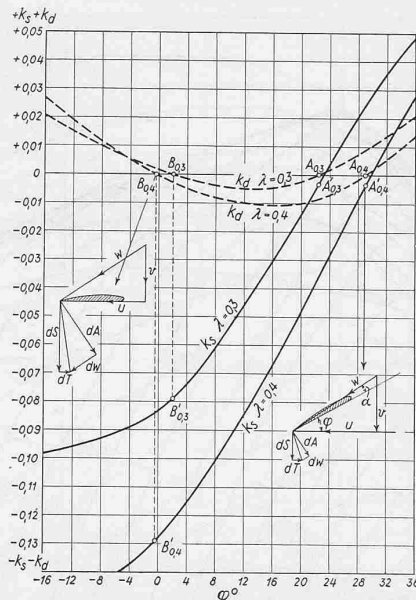


Abb. 17. Schub- und Drehmomentenbeiwerte in Abhängigkeit des Blattwinkels φ für konstante Fortschrittsgrade ($\lambda = 0,3$ und $\lambda = 0,4$). A obere Stabilisierungspunkte ergeben kleine k_s -Werte A'. B untere Stabilisierungspunkte ergeben die grossen k_s -Werte B' der Windmühlenbremsung

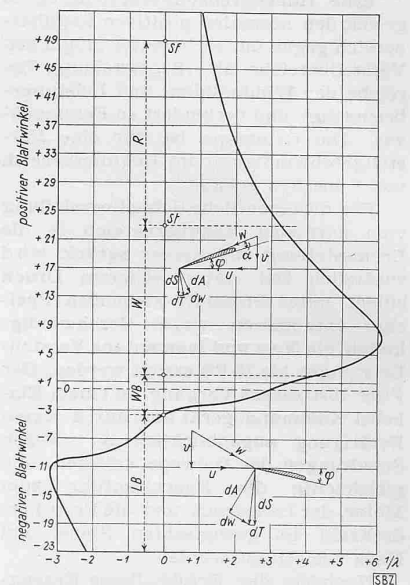


Abb. 20. Durch Modellversuche bestimmte Stabilisierungspunkte (Werte $1/\lambda = u/v$) in Abhängigkeit des Blattwinkels für $k_d = 0$. R positiver Regulierbereich; W Windmühlenbereich, der rasch zu durchlaufen ist; WB Windmühlenbremsbereich; LB Leistungsbremsbereich

Wenn man bei hohen Bahngeschwindigkeiten die Propellerblätter auf grössere negative Anstellwinkel bringt, nehmen sie ein beträchtliches Drehmoment auf. Die entsprechende Leistung muss der Antriebsmotor aufbringen. Fällt er aus irgend einem Grunde aus, so wird der Propeller von den Luftkräften abgebremst und in entgegengesetzter Richtung wieder angetrieben. Dieses Rückwärtsdrehen des Triebwerks muss aber unter allen Umständen vermieden werden, da es unfehlbar starke Beschädigungen des Motors verursachen würde. Da einerseits die Leistungsbremsung grosse Vorteile verspricht, andererseits aber die Gefahr des Rückwärtsdrehens vermieden werden muss, wurden bei Escher Wyss die Betriebsbedingungen, unter denen der Propeller bei negativen Blattwinkeln arbeitet, durch Modellversuche weitgehend abgeklärt. Ein erstes Ergebnis dieser Versuche bilden die Diagramme Abb. 18a und 18b, die eine vollständige «negative Charakteristik» des vierflügligen Modellpropellers, Abb. 19, darstellen. Die Schub- und Drehmomentenbeiwerte sind dabei nicht mehr auf die Umfangsgeschwindigkeit, sondern auf die Bahngeschwindigkeit bezogen und über dem reziproken Fortschrittsgrad aufgetragen. Diese Darstellungsweise ist notwendig, um Unstetigkeiten in der Abbildung zu vermeiden. Da nämlich die Bedingungen für das Rückwärtsdrehen, also für den Durchgang der Umfangsgeschwindigkeit durch Null zu untersuchen sind, darf u nicht im Nenner vorkommen.

Um den fundamentalen Unterschied zwischen der normal angeströmten Luftschaube und dem negativ angestellten Bremspropeller beurteilen und im besondern die Gefahr des Rückwärts-

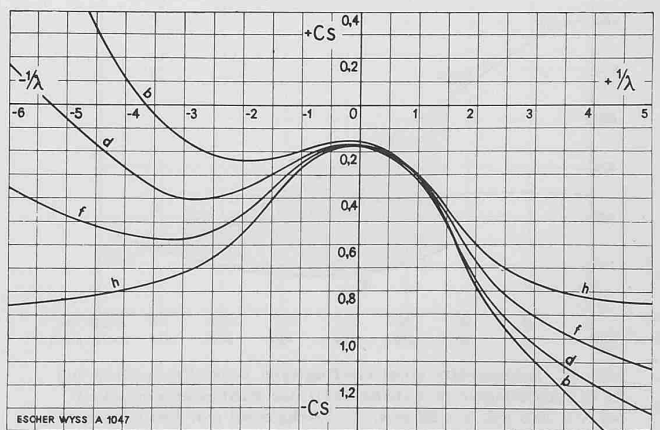


Abb. 18a. Werte $C_s = \frac{2 S}{\rho v^2 F}$ für positive (Kurve h) und negative (Kurven b, d und f) Umfangsgeschwindigkeiten

drehens richtig verstehen zu können, denken wir uns nochmals einen normal arbeitenden Festpropeller. Dieser nimmt ein gewisses Drehmoment auf, das vom Antriebsmotor aufgebracht werden muss. Fällt der Motor aus, so sinkt die Drehzahl soweit, bis der Anstellwinkel negativ wird und die Luftkräfte ein «Windmühlen-Moment» erzeugen, das den leer laufenden Motor mitzieht. Der Propeller läuft dabei auf seinem durch den eingestellten Blattwinkel φ eindeutig bestimmten positiven Stabilisierungspunkt. Dieser Punkt kann aus der Propellercharakteristik, Abb. 13, bestimmt werden, indem der Fortschrittsgrad $\lambda = v/u$ aufgesucht wird, bei dem der Drehmomentenbeiwert k_d bei der betrachteten Flügelstellung φ durch Null geht. Diese Werte sind in Abb. 20 in Abhängigkeit des Blattwinkels dargestellt.

Beim negativ angestellten Blatt sinkt die Drehzahl, bis der Propeller stillsteht, und nimmt dann in der anderen Richtung wieder zu, bis der «negative» Stabilisierungspunkt erreicht ist.

Wie aus den auf Abb. 20 eingezeichneten Diagrammen hervorgeht, geben grosse Blattwinkel kleine Drehzahlen und zwar sowohl im positiven wie im negativen Drehsinn. Bemerkenswert ist, dass die grösste positive Stabilisierungsdrehzahl (Wert u/v) etwa doppelt so gross ist, wie der entsprechende negative Maximalwert. (Fortsetzung folgt)

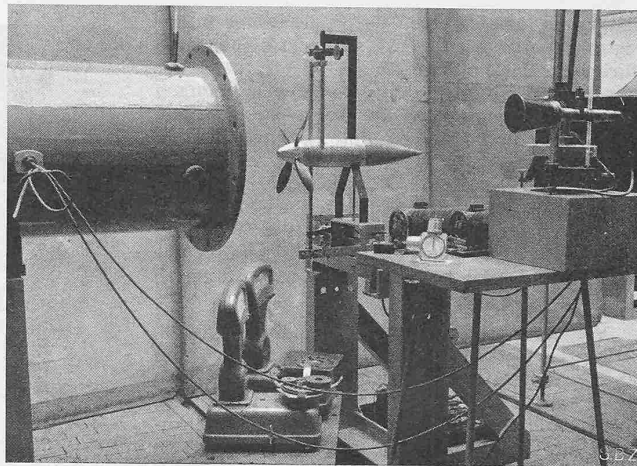


Abb. 19. Messung der negativen Charakteristik im aerodynamischen Laboratorium von Escher Wyss A.-G. Zürich

Nikolaus Riggenbach, Sylvester Marsh und das Rigi-Zahnradbahnsystem

Bei den Vorstudien zu meinem Werk «Wir durchbohren den Gotthard» stiess ich im Bundesarchiv auf einige Dokumente, die geeignet sind, die Frage zu beantworten, ob Riggenbach tatsächlich der Erfinder des an der Rigi verwendeten Zahnradsystems sei.

Riggenbach selber schildert die Entstehung seiner Erfindung folgendermassen¹⁾: «Die Erfindung des Bergbahnsystems verdankt ihren Ursprung meinen Erfahrungen, die ich als technischer Chef des Betriebes der Schweiz. Centralbahn zu sammeln in der Lage war. Wir machten nämlich beim Betrieb der Bahn durch den Hauensteintunnel, die bis 26 ‰ Steigung hat, sehr missliche Erfahrungen. Bei der starken Steigung zwischen Olten und dem Beginn des Tunnels kann das Gleiten der Räder auf den Schienen selbst durch das Streuen von Sand nicht immer gehoben werden. Um diesem Uebelstande abzuweichen, sann ich auf allerlei Mittel und kam dabei auf den Gedanken, dass eine Abhilfe nur zu erlangen sei mittelst einer Zahnstange, in die ein Zahnrad eingreift. Sofort stand mir aber auch klar vor Augen, dass vermittelst dieser Konstruktion gewiss auch wesentlich grössere Steigungen sich leicht werden überwinden lassen.

Ich zögerte nicht, ein Modell einer solchen Bahn zu konstruieren und allen mich besuchenden Technikern zu zeigen, zumal Herrn Professor Dr. Culmann vom zürcherischen Polytechnikum, der mich in meinen Gedanken sehr bestärkte. Freilich fanden meine Ansichten nicht allenthalben die gleiche Anerkennung, und je mehr ich mit meinen Plänen und Modellen herumreiste, umso mehr wurden mir die Schwierigkeiten der Ausführung vorgestellt. In der Schweiz wollte jedenfalls niemand etwas von der Sache wissen.....

Wie ein Sonnenstrahl erhellte dieses Dunkel ein prophetisches Wort des schweizerischen Generalkonsuls in Washington, Herrn John Hitz. Dieser wackere Mann war bei Anlass eines Besuches in der Schweiz..... nach Olten gekommen, und als ich nun auch ihm, wie allen Besuchern meines Bureau, die Bergbahnmodelle vorwies, rief er aus: «Well, Mr. Riggenbach, Sie bauen eine Eisenbahn auf die Rigi!» Damit war meinen bisherigen, mehr theoretischen Studien und Plänen zum erstenmal ein praktisches Ziel gegeben. Auch machte mir das Wort des trefflichen Mannes Mut, meine Ideen immer weiter zu verfolgen und auf eine immer sorgfältigere Verbesserung der Pläne und Modelle hinzuwirken.

Das erste Patent für meine Erfindung erhielt ich in Frankreich am 12. August 1863, sechs volle Jahre, bevor ich von einer ähnlichen Erfindung des Amerikaners Marsh Kunde erhielt, zwei Jahre, bevor ich Amerika bereiste. Die boshafte Aussage meiner späteren Konkurrenten, ich habe mein System in Amerika abgesehen, ist geradezu lächerlich; meine Erfindung war schon im Sommer 1863 patentiert, meine amerikanische Reise fand 1865 bis 1866 statt, der Amerikaner Marsh aber trat erst 1869 am Mount Washington mit seiner Erfindung hervor!..... Uebrigens hat Marsh selbst keinerlei Einwendungen erhoben, als ich später, am 13. Februar 1872 ein amerikanisches Patent erhielt, obwohl ich ihn davon in Kenntnis setzte. Er hat mich

ausdrücklich als selbständigen Erfinder meines Bergbahnsystems anerkannt..... Während wir (Riggenbach, Naeff und Zschokke) 1869 (an der Rigi) an der Arbeit waren, erhielt der Bundesrat durch Herrn Hitz Nachricht, dass ein amerikanischer Ingenieur Marsh nach einem ähnlichen System eine Bahn auf den Mount Washington baue. Sofort sandten wir einen jungen Techniker hinüber, allein es zeigte sich, dass zwar Marsh nach ähnlichen Prinzipien wie wir arbeite, wir aber seine etwas provisorische Ausführung nicht zum Muster nehmen konnten».

*

Wenn wir uns auf das Wichtigste beschränken, so behauptet Riggenbach: 1. Sein an der Rigi verwendetes Zahnradsystem sei identisch mit jenem, das er 1863 in Frankreich patentieren liess. 2. Er habe erst 1869 während der schon begonnenen Erstellung der Rigi-Bahn vom ähnlichen System Marsh Kenntnis erhalten. Diesen Behauptungen stehen folgende Tatsachen gegenüber:

1. Im September 1866 (also nach der Rückkehr aus Amerika) hielt Riggenbach an der Jahresversammlung des Schweiz. Ingenieur- und Architektenvereins in Glarus einen Vortrag über «Ein neues Lokomotiv-System zur Ueberwindung starker Steigungen²⁾». Unter Vorweisung einer Zeichnung und eines Modells sprach er von einer zwischen den Schienen gelegenen Zahnstange, in die eine Schraube (Schnecke) eingreift; diese wird durch die Dampfmaschine in drehende Bewegung gesetzt. «Die Lokomotive samt dem Zug wird daher bei jeder Umdrehung der Schraube um die Steigung der Schraube vorwärts geschoben». Riggenbach empfahl also noch im Herbst 1866 als seine Erfindung ein System (wobei er sich auf die damals noch nach dem gleichen technischen Prinzip gehobenen amerikanischen Aufzüge berief), das in einem von den Professoren Zeuner und Weith³⁾ abgefassten Gutachten des Polytechnikums (Mai 1869) an das Departement des Innern über das Wetli'sche Schraubenrad mit den Worten abgetan wird: «Etwas Unvollkommeneres könnte man sich gar nicht denken; denn bei einer belasteten Schraube, die sich rotierend und parallel zu ihrer Achse in einer Mutter fortbewegt, ist die Reibung enorm gross».

2. Am 31. Mai 1867 schrieb der schweizerische Generalkonsul John Hitz in Washington (der «wackere Mann» Riggenbachs) an den hohen schweizerischen Bundesrat einen Bericht über die Zahnradbahn auf den Mount Washington (1917 m) in den White Mountains im Staate New Hampshire, etwa 300 km nördlich von Boston. Hitz erzählt, wie Sylvester Marsh in Boston, das System Fell (Friktrionsrollen) wegen des Kraftverlustes durch die grosse Reibung abgelehnt habe und endlich auf die Idee gekommen sei, «eine leiterartige Mittel-Kammschiene aus geschmiedetem Eisen» zu verwenden, in die ein an der Lokomotive angebrachtes Kammrad eingreife (eine Bleistiftzeichnung gibt ein Bild dieser Mittel-Schiene). Hitz besuchte im April 1867 Marsh auf der Baustelle, der ihm die Zeichnungen und die im Bau befindliche Lokomotive mit vertikalem Dampfkessel und einer von ihm erfundenen und patentierten «atmosphärischen Bremse» zeigte (einer einfachen

²⁾ Verhandlungen des Schweiz. Ingenieur- und Architekten-Vereins 1866.

³⁾ Bundesarchiv, Mappe: «Technische Erfindungen und Schriften, neue Eisenbahnsysteme».

¹⁾ N. Riggenbach, Erinnerungen eines alten Mechanikers, Zweite Auflage 1887.