

Meteorologie und Segelflug

Ausgearbeitet nach einem Vortrag, gehalten vor der Medizinisch-Naturwissenschaftlichen Gesellschaft (Naturwissenschaftliche Abteilung) in Münster, Westfalen, am 25. Juni 1963
 von H. Wachter.*

In memoriam

Four years ago, on April 27, 1960, Dr. August Raspet, a great American pioneer and innovator lost his life while doing experimental flying aimed at improving aerodynamic efficiency at low and high speeds. As far as OSTIV is concerned, his work on detailed aerodynamic improvements for sailplanes which resulted in unexpectedly great advances in performance, was particularly valuable. Reflections of this work are seen in most modern high performance sailplanes throughout the world. In «OSTIV» Publication VI and «Aero Revue» 9/1960 is a longer appreciation of his work, and the following paper is dedicated to his memory.



Dr. August Raspet †

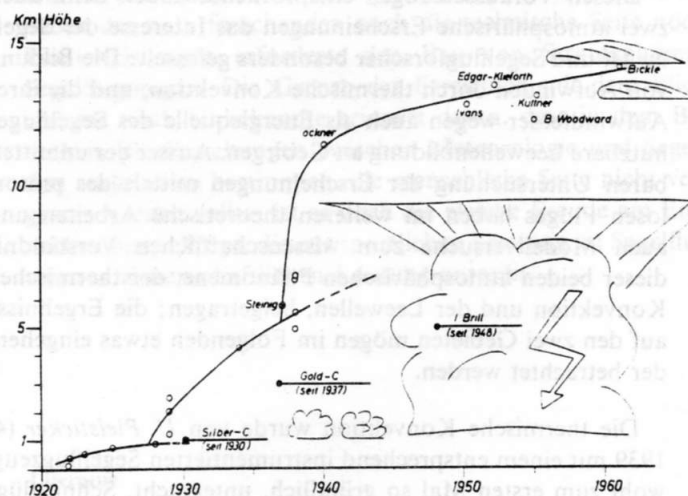
Vor vier Jahren, am 27. April 1960, verlor Dr. August Raspet, ein grosser amerikanischer Pionier und Neuerer, anlässlich eines Versuchsfluges zur Verbesserung der aerodynamischen Wirksamkeit bei niedrigen und hohen Geschwindigkeiten.

sein Leben. Für die «OSTIV» war sein Werk zur Verbesserung aerodynamischer Einzelheiten an Segelflugzeugen, die sich in einer überraschend grossen Leistungsförderung auswirkten, von besonderer Bedeutung. Die Berücksichtigung dieser Arbeiten wirkte sich auf die modernsten Leistungssegelflugzeuge der ganzen Welt aus. Eine ausführlichere Würdigung von Raspets Wirken findet sich in der «OSTIV» Publication VI und in der Schweizer «Aero Revue» 9/1960. Der nachstehende Vortrag ist seinem Gedenken gewidmet.

*

Die Entwicklung der Welt-Höhenrekorde (1) des Segelfluges seit 1920 zeigt Zeitabschnitte einer relativ geringfügigen Steigerung und solche, in denen überraschend viel grössere Höhen erreicht wurden; die bedeutenden Steigerungen rührten jedesmal von der Entdeckung einer neuen Energiequelle in der Atmosphäre her. In Abbildung 1 sind die grössten, jeweils im motorlosen Flug erreichten Höhen ihrer geschichtlichen Entwicklung nach aufgetragen; dabei wurde für diese Betrachtung nicht darauf geachtet, ob die erreichten Höhen als sportlicher Rekord anerkannt wurden oder ob dies, etwa

Abb. 1, Zeitliche Entwicklung der Höhenrekorde



* Adresse des Verfassers: Dr. Heinz P. Wachter, Institut für Meteorologie und Geophysik, 6000 Frankfurt a. M. 1, Feldbergstrasse 47; und Akademische Fliegergruppe der Universität, ebendort, Mertonstrasse 17

wegen zu grosser Ausklinkhöhe, nicht der Fall war. Die Entwicklung der Höhenrekorde gliedert sich, wie die eingezeichnete Kurve zeigt, offensichtlich in drei Abschnitte. In der ersten Periode, ungefähr bis 1928, spielte neben der thermischen Konvektion gewiss auch der Hangaufwind eine bedeutende Rolle. Mit dem Wagnis, in die Wolken zu fliegen, wurde die thermische Energiequelle in ihrer durch Kondensation verstärkten Form, den kräftigen Aufwinden der Cumulonimben (Schauer- und Gewitterwolken) erschlossen. Diese Phase der Rekordflüge dauerte etwa von 1928 bis 1937; bei den so erreichten Höhen ist es im Rahmen der vorliegenden Betrachtung schon kaum mehr wichtig, zwischen der Höhe über Start oder Ausklinkhöhe und Höhe über Grund oder Meeresniveau zu unterscheiden. (Das Diagramm enthält nur die geringeren Höhen als Startüberhöhungen.) Mit dem Jahr 1937 schliesst sich als dritte Phase die des Wellensegelfluges an, der Ausnutzung jener Aufwinde, die durch eine eigenartige Form der Luftströmung im Lee von Gebirgen entstehen und, da sie bis zu einem Vielfachen der Kammhöhe des Gebirges reichen, motorlose Flugzeuge bis in Höhen von 12 km und mehr emportragen.

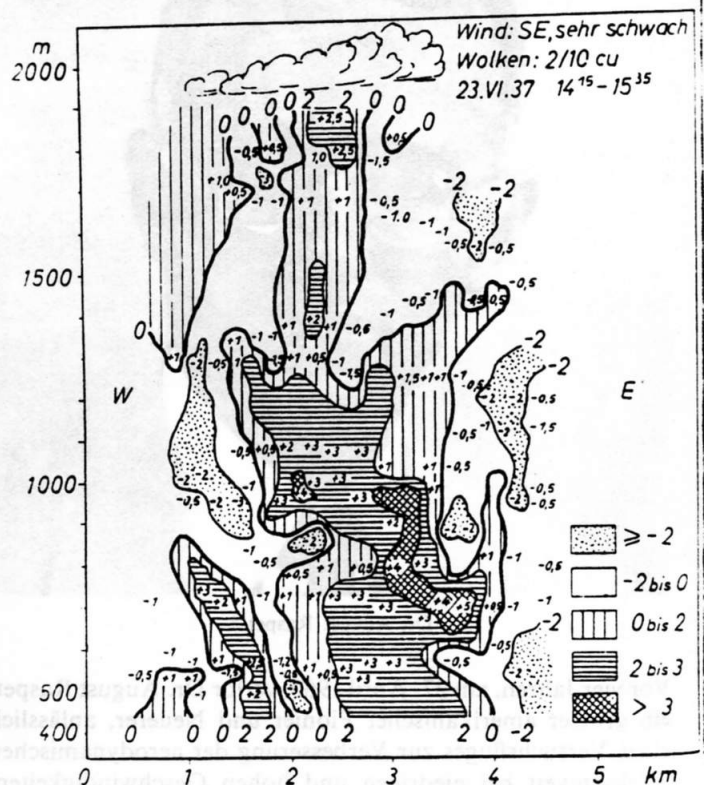
Fragt man sich, was der Segelflug zur meteorologischen Forschung beigetragen hat oder heute beiträgt, so wird oft das Segelflugzeug als ein «Messträger» mit anderen Flugkörpern, die Messinstrumente in die freie Atmosphäre tragen, verglichen (2). Der Besonderheit des Segelflugzeuges wird aber wohl eine andere Auffassung gerechter, die der leider am 27. April 1960 bei einem Flug tödlich verunglückte, verdiente amerikanische Segelflugforscher Doktor August Raspet formulierte «the sailplane as a meteorological probe», das Segelflugzeug als eine meteorologische Sonde (3). Das Segelflugzeug mit seinem vergleichsweise geringen Gewicht und seiner dementsprechend niedrigen Flächenbelastung folgt vertikalen Bewegungen der atmosphärischen Luft in besonders empfindlicher Weise; da zudem die aerodynamischen Eigenschaften recht genau vermessen und angegeben werden können, lassen sich aus dem Flugverhalten einer solchen «meteorologischen Sonde» quantitative Aussagen über atmosphärische Grössen, besonders also die Vertikalbewegung der Luft, gewinnen.

Diesen Voraussetzungen entsprechend, haben denn auch zwei atmosphärische Erscheinungen das Interesse der Segelflieger und Segelflugforscher besonders gefesselt: Die Bildung von Aufwinden durch thermische Konvektion, und die ihrer Aufwindfelder wegen auch als Energiequelle des Segelfluges nutzbare Leewellenbildung an Gebirgen. Ausser der unmittelbaren Untersuchung der Erscheinungen mittels des motorlosen Fluges haben im weiteren theoretische Arbeiten und auch Modellversuche zum wissenschaftlichen Verständnis dieser beiden atmosphärischen Phänomene, der thermischen Konvektion und der Leewellen, beigetragen; die Ergebnisse auf den zwei Gebieten mögen im Folgenden etwas eingehender betrachtet werden.

Die thermische Konvektion wurde von U. Pielsticker (4) 1939 mit einem entsprechend instrumentierten Segelflugzeug, wohl zum ersten Mal so gründlich, untersucht. Schnittflüge durch die Aufwindgebiete unter Cumuluswolken zeigten, dass diese Aufwindzellen unregelmässige, ungefähr horizontale Wirbelringe sind, als welche sie V. Bjerknes (5) schon 1900 theoretisch angesehen hatte. Wie verträgt sich diese dyna-

mische Auffassung mit der thermodynamischen Vorstellung einer aufsteigenden Warmluft-«blase»? (Anscheinend haben übrigens die Meteorologen länger an der Vorstellung eines in der Senkrechten langen Aufwind-«schlauches» festgehalten als die Segelflieger, denen die Erfahrung zeigte, dass man aus einem Aufwindgebiet recht rasch nach unten in nichtsteigende Luft herausgleiten kann.) Malkus und Witt (6) gelang es, durch numerische Integration der Bewegungsgleichungen auf der Stockholmer BESK-Rechenanlage, Schnittbilder zu gewinnen, die erkennen lassen, wie die Blase erhöhter potentieller Temperatur als am schnellsten steigender Kern das Innere des Wirbelringes ausfüllt. Zu ähnlichen Bildern führt der experimentelle Weg. Eine Salzlösung, die, weil spezifisch schwerer, im umgebenden Wasser sinkt, erlaubt, die natürliche Konvektion durch Auftriebskräfte unter Vertauschung von oben und unten abzubilden; auf diese Weise führte B. Woodward (7), (8) interessante Modellversuche durch. Nach beschleunigungsfreiem Einbetten der Salzlösung, die durch einen Niederschlag markiert war, in das Wasser konnte sie die Teilchenbahnen vom ruhenden Anfangszustand aus verfolgen und, vom Modellversuch aus schliessend, das Steigverhalten eines Segelflugzeuges in einer Thermikblase quantitativ beschreiben. Das dynamische Bild der Thermikblase mit Wirbelring lässt auch verstehen, in wie hohem Mass der konvektiv aufsteigenden, potentiell wärmeren Luft Umgebungsluft beigemischt wird, jener Vorgang, den Stommel als «entrainment» bezeichnet hat und der vor allem in dem amerikanischen Thunderstorm Project (Byers and Brahm) (9) zum Verstehen der konvektiven Vorgänge in den Cumulonimben herangezogen wurde. Das Mass der Beimischung, die sowohl den Temperaturüberschuss wie den Wasserdampfgehalt der aufsteigenden Luft mindert, hängt von der Grösse der Thermikzelle ab, für die die Labilität der atmosphärischen Schichtung nicht allein massgebend ist. So wird verständlich, dass die besonders hochreichende Konvektion

Abb. 2, nach Georgii, Flugmeteorologie, Abb. 35, S. 46



der tropischen Cumulonimben (*Malkus* (10)) stark durch eine synoptische Bedingung bestimmt wird, nämlich durch die Konvergenz der bodennahen Luftströmung, die die Bildung grösserer aufsteigender Luftkörper fördert.

Als zweites Problem seien die Aufwindfelder betrachtet, die, oft an charakteristischen Lenticulariswolken zu erkennen, bei bestimmten Wetterlagen auf der Leeseite langgestreckter Gebirgszüge zustandekommen, wenn ein solcher Gebirgszug quer vom Wind überweht wird. Die «Leewellen» bilden nicht nur einen bevorzugten Forschungsgegenstand der Segelflugmeteorologie, sondern man verdankt auch ihre Entdeckung erst dem Segelflug. An dem das böhmische Becken nach Nordosten abschliessenden Riesengebirge, wo die ortsfesten Lenticulariswolken von fast flügelprofilartigem Querschnitt im schlesischen Dialekt den Namen «Moazagotl» trugen, fand *Wolf Hirth* (11) als erster 1933 in der Umgebung dieser Wolken segelfliegerisch nutzbare Aufwindfelder. Einen erheblichen Schritt zur Klärung dieses atmosphärischen Vorganges trug *J. Kuettner* (12), (13) 1939 bei, als er erkannte, dass es sich dabei um vertikale Schwingungsvorgänge handelt, bei denen in einer mässig stabil geschichteten Atmosphäre Luftmengen um ihre Gleichgewichtslage auf- und abpendeln. Nicht ganz geklärt blieb, warum das Zustandekommen der Erscheinung noch an weitere meteorologische Bedingungen geknüpft ist, insbesondere daran, dass in nicht zu grosser Höhe über dem Gebirgskamm eine Temperaturinversion besteht. Ein Forschungs- und Messflug, der der Untersuchung einer Leewelle an den Alpen diente, führte *Klößner* 1940 in zuvor mit dem Segelflugzeug nicht erreichte Höhen hinauf; es war der erste Segelflug, der in Höhen über 10 km führte (11 460 m). *U. Krug-Pielsticker* (14) gewann aus den Messergebnissen und Beobachtungen des Klößner'schen und eigener Flüge ein grundlegendes Querschnittsbild der Gebirgsüberströmung mit der Leewellenbildung in höheren Schichten, während in Bodennähe leeseitig der als Föhn bekannte, warme Abwind herrscht. Dem Göttinger Mathematiker *Lyra* (15), (16) gelang es 1940–1942, durch eine eindeutige Lösung der unbestimmten Randwertaufgabe, die das theoretische Problem bildet, eine aerodynamische Theorie der Gebirgsüberströmung aufzustellen: in der Folge erschienen eine Reihe verschiedenartiger, theoretischer Behandlungen (*Scorer*, *Queney*, *Zierep* – von letzterem vor allem Erweiterungen der *Lyra*'schen Theorie auf allgemeinere Bedingungen), unter anderem auch von russischer Seite (*Dorodnizin* (17)). Unbefriedigend blieb jedoch noch immer, dass die nach meteorologischer und segelfliegerischer Erfahrung zur Leewellenbildung erforderliche Temperaturinversion in gewisser Höhe über dem Gebirgskamm nach den dynamischen Theorien nicht notwendig schien. Da erkannte *Schweitzer* (18) 1953 die Analogie des Föhns, der ein Gebirge überweht, mit einer überkritischen (schiessenden) Strömung in flachen Gewässern und baute diesen Gedanken zu einer sehr einleuchtenden Erklärung dafür aus, dass der Föhn als warme Luftströmung entgegen dem Archimedischen Auftrieb in die Täler hinabströmt; der kritischen Spiegelhöhe des Wassers über dem Hindernis, die zur schiessenden Strömung führt, entspricht die Inversionshöhe über dem Kamm des Gebirges. So ergänzen offenbar zwei Mechanismen einander: in den unteren Schichten die (nach *Schweitzer*) schiessende Strömung des Föhns, und oberhalb der Inversion, die nun ihrerseits für die Schichten darüber als Hindernisprofil dient, der wohl nach

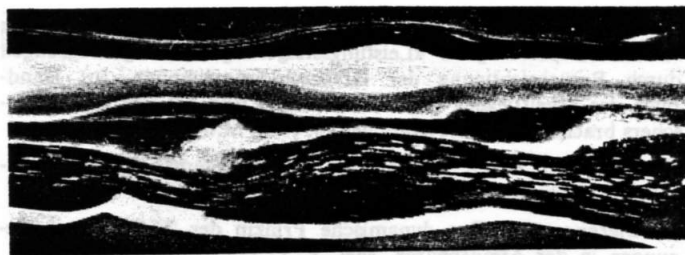


Abb. 3, nach R. R. Long, Fig. 12, S. 379 Rossby Vol.

der dynamischen Theorie (*Lyra*) zu verstehende Schwingungsvorgang, in dem eine der Ausbreitungsgeschwindigkeit entgegengesetzt gleiche Windstärke die «Berge» und «Täler» der Luftströmung – und zwischen ihnen die Auf- und Abwindgebiete – ortsfest im Lee des Gebirges hält. Nachdem *Kuettner* in dem amerikanischen Sierra Wave Project (19) die Erscheinung der Leewellen und -wolken in ihrer wohl grossartigsten Ausprägung an den Gebirgen im Westen des nordamerikanischen Kontinents eingehend studiert hatte, zog er die gleiche Erklärung der überkritischen Strömung, die dann in einem «Schwall» (hydraulic jump) in den normalen Flusszustand zurückfällt, für die Rotoren, extrem turbulente Wolken in tieferen Schichten, heran (20). Auch zur Leewellenbildung sind ebenfalls Modellversuche angestellt worden. In einer der experimentellen Anordnungen benutzte *R. R. Long* (21) ein Bodenprofil, das einem in Windrichtung gelegten Querschnitt durch die Sierra Nevada und das Owens Valley (bei Bishop, California) entsprach, und liess darüber über einer bodennahen Schicht von Salzlösung, die die schiessende Strömung lieferte, fünf weitere nach ihrer Dichte geschichtete, miteinander nicht mischbare Flüssigkeiten strömen. Das Ergebnis, Abbildung 3, ähnelt ausgezeichnet dem Strömungsvorgang über den Sierras, wenn sich dort Leewellen bilden.

Ein Blick auf noch kaum Erforschtes möge die Betrachtung schliessen. Auch an den «jet stream»-Starkwindfeldern der hohen Atmosphäre finden sich Aufwindzonen (*Kuettner* und *McLean* (22)). Hier aber geraten wir in ein Gebiet, wo neben der naturforschenden auch die technische Seite noch Pionierleistungen erfordert: den Bau von Stratosphären-Segelflugzeugen. Die Grenze des Erreichten mit dem Blick auf das noch Unbekannte erinnert daran, dass in dem Bemühen, die Beziehungen zwischen Meteorologie und Segelflug sachlich zu bestimmen, die menschliche Seite nicht vergessen werden sollte; ist es doch die gleiche Freude am Entdecken neuer Wege, die zur sportlichen Leistung im Segelflug wie zur wissenschaftlichen Leistung antreibt.

Literatur

- (1) *Hirth Wolf*: «Handbuch des Segelfliegens». 8. Auflage, Stuttgart 1960. Darin: Welthöhenrekorde des Segelfluges.
- (2) *Georgii W.*: «Das Segelflugzeug als Messträger aerologischer Forschung». In: Handbuch der Aerologie, herausgegeben von W. Hesse, Leipzig 1961, S. 250–282.

- (3) In der deutschsprachigen Literatur erschien zum Beispiel seine Arbeit: *Raspet August*: «Leistungssteigerung von Segelflugzeugen durch Berücksichtigung der Grenzschichtforschung». In: Handbuch des Segelfliegens (1), S. 125. — Ein Bild des verdienten Forschers brachte Thermik (Göttingen) 4, 1951, M 64.
- (4) *Pielsticker Ursel*: «Ueber den Aufbau thermischer Aufwindgebiete». Beitr. Physik fr. Atmosph. 27 (1942), S. 1—22.
- (5) *Bjerknes V.*: «Das dynamische Prinzip der Zirkulationsbewegungen in der Atmosphäre». Met. Z. 17 (1900), bes. S. 149.
- (6) *Malkus Joanne S., a. Gg. Witt*: «The evolution of a convective element: a numerical calculation». In: The Atmosphere and the Sea in Motion (Rossby Memorial Volume), New York 1959, p. 425—439.
- (7) *Woodward Betsy*, «The motion in and around isolated thermals». Quarterly J. Roy. Met. Soc. 85, 1959, p. 144—151.
- (8) — —, «Penetrative convection in the sub-cloud régime». In: Cumulus Dynamics (Proc. of the First Conference on Cumulus Convection, edited by Charles E. Anderson), Pergamon Press 1960, p. 28—38.
- (9) *Byers H. R., and Braham R. R.*, «The Thunderstorm». Washington, D. C., 1949.
- (10) *Malkus Joanne S.*, «Recent developments in studies of penetrative convection and an application to hurricane cumulonimbus towers». Cumulus Dynamics (8), p. 65—84.
- (11) «Handbuch des Segelfliegens» (1), S. 217.
- (12) *Kuettner J.*, «Moazagotl und Föhnwelle». Beitr. Physik fr. Atm. 25 (1939), S. 79—114.
- (13) — —, «Zur Entstehung der Föhnwelle. Untersuchung auf Grund von Wellensegelflügen und Beobachtungen an der Moazagotl-Wolke.» Beitr. Physik fr. Atm. 25 (1939), S. 251—299.
- (14) *Krug-Pielsticker Ursel*, «Beobachtungen der hohen Föhnwelle an den Ostalpen». Beitr. Physik fr. Atm. 27 (1942), S. 140—164. — Vertikalschnitt der Atmosphäre reproduziert in (1), S. 222.
- (15) *Lyra G.*, «Ueber den Einfluss von Bodenerhebungen auf die Strömung einer stabil geschichteten Atmosphäre». Beitr. Physik fr. Atm. 26 (1940), S. 197—206. (Dazu von *H. Stümke*: Bemerkungen über die horizontalen Störungsgeschwindigkeiten der in vorstehender Arbeit behandelten Strömung, S. 207—208.)
- (16) — —, «Theorie der stationären Leewellenströmung in freier Atmosphäre». Z. Angew. Math. Mech. 23 (1943), S. 1—28.
- (17) *Dorodnizin A. A.*, «Einfluss des Bodenprofils auf Luftströmungen». Arbeiten des Zentr. Inst. f. Wettervorhersagen, Lieferung 21 (1948), Fragen der dynam. Met., unter der Redaktion von *I. A. Kibel*, herausgeg. v. d. Hauptverw. des Hydrometeorolog. Dienstes, Leningrad 1950.
- (18) *Schweitzer H.*, «Versuch einer Erklärung des Föhns als Luftströmung mit überkritischer Geschwindigkeit». Arch. Met. Geophys. Bioklim. A 5 (1953), S. 350—371.
- (19) *Holmboe J., and Klieforth H.*, «Final Report», Mountain Wave Project, Univ. of California, Contract AF 19 (604)—728, 1957.
- (20) *Kuettner J.*, «The rotor flow in the lee of mountains». GRD Research Note Nr. 6, Bedford, Mass., Jan. 1959. (Publication Air Force Cambridge Research Laboratories TN-58-626 and ASTIA Doc. Nr. AD-208862.)
- (21) *Long R. R.*, «A Laboratory Model of Air Flow over the Sierra Nevada Mountains». In: The Atmosphere and the Sea in Motion (Rossby Memorial Volume), New York 1959, p. 372—380.
- (22) *Kuettner J. P., a. McLean G. S.*, «Instability and vertical motions in the jet stream». GRD Research Note Nr. 57, Bedford, Mass., May 1961. (Publication AFCRL 473.)