Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 113/114 (1939)
Heft: 4

Artikel: Untersuchungen am Modell eines Windkraftwerkes
Autor: Ackeret, J. / Caille, Ch.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-50542

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

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

INHALT: Untersuchungen am Modell eines Windkraftwerkes. — Aus der schweizerischen Flugindustrie. — Miethaus «Steinwies» in Zürich. — Von der Tätigkeit des schweizerischen Vereins von Dampfkessel-Besitzern. — Mitteilungen: Bauhandwerkerpfandrecht und Architektenhonorar. Neue Lautsprecheranlage im Hauptbahnhof Zürich. Kleine Triebwagen der schwed. Staatsbahnen. Die Steuerungen selbsttätiger Wasserkraftanlagen. Garten-Sonnenuhren. Kolbenfedern aus Aluminium-Silicium-Legierung. Das Kingsbury-Traglager. Zementhalle der Abteilung Bauen. Skilifts. Baumesse an der Basler Mustermesse. Eidg. Techn. Hochschule. — Wettbewerbe: Neubau eines Kirchgemeindehauses und Vergrösserung der evang. ref. Kirche Neuhausen. — Nekrologe: Emil Huber-Stockar. Edouard Roth. Henri Naville. Johann Metzger. — Mitteilungen der Vereine.

Band 114 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet Nr. 4

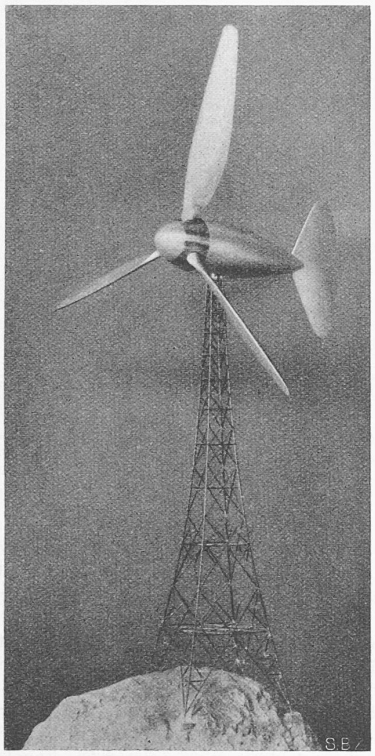
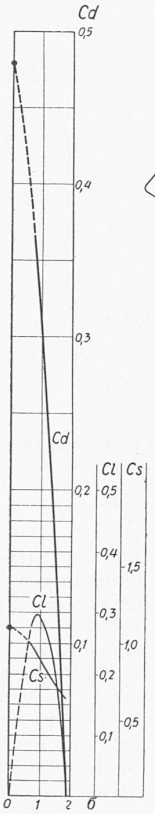


Abb. 1. Windkraftwerk-Modell an der LA in Zürich



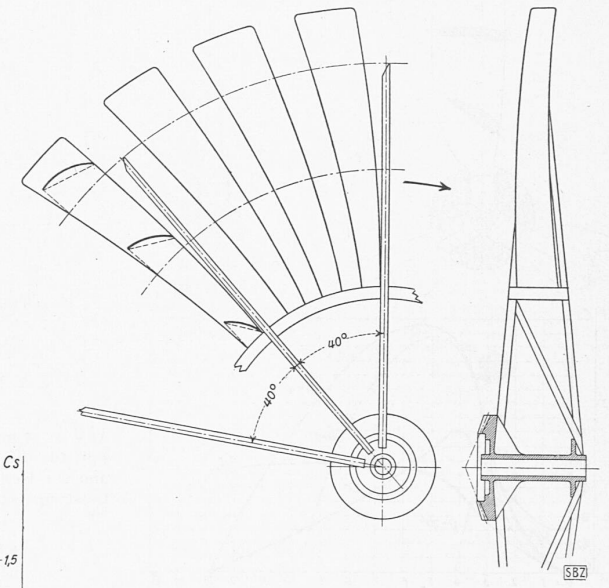


Abb. 2. Windturbine üblicher Bauart mit zahlreichen Schaufeln, links: ihre Leistungs-, Drehmoment- und Schub-Zahlen in Abhängigkeit von der Laufzahl σ

Untersuchungen am Modell eines Windkraftwerkes

Von Prof. Dr. J. ACKERET und Dipl. Ing. CH. CAILLE, E.T.H.

An der Schweiz. Landesausstellung ist vom Institut für Aerodynamik E. T. H. u. a. ein Modell eines Windkraftwerkes ausgestellt, das wir vor einiger Zeit im Windkanal untersuchten. Wenngleich es sich um eine Studienarbeit handelt, dürfte eine kurze Mitteilung über jene Versuche von Interesse sein. Das neue Windrad unterscheidet sich von früheren Entwürfen durch Einführung der *Flügelverdrehbarkeit* ähnlich wie bei Luft- und neuerdings auch bei Schiffschrauben. Ferner ist es den Erfordernissen der Stromerzeugung entsprechend für möglichst *raschen Lauf* konstruiert worden (Abb. 1).

In Abb. 2 sind nach älteren Göttinger Messungen die Eigenschaften einer sogenannten «Windturbine» aufgetragen[1]). Solche werden noch vielerorts verwendet. Es handelt sich um Räder mit zahlreichen gebogenen Blechschaufeln in einfacher Eisenkonstruktion. Wie in der Aerodynamik üblich, werden die Betriebsgrössen durch dimensionslose Zahlen dargestellt.

Mit den Bezeichnungen

$\varrho = \gamma/g$	= Luftdichte	in kg/s² m⁻⁴
D	= Rad-Aussendurchmesser	m
$F = \pi/4\ D^2$	Radscheibenfläche	m²
V	= Windgeschwindigkeit im ungestörten Raum ausserhalb des Rades	m/s
$q = \varrho/2\ V^2$	= Staudruck	kg/m²
M	= Rad-Drehmoment	mkg
L	= Leistung $= M\,\omega$	mkg/s
ω	= Winkelgeschwindigkeit	1/s
S	= Schub auf das Rad in Achsrichtung	kg

werden diese folgendermassen definiert:

$$C_s = \frac{S}{q\,F} = \text{Schubzahl}, \qquad C_l = \frac{L}{q\,F\,V} \text{ Leistungszahl}$$

$$C_d = \frac{M}{q\,F\,D/2} \text{ Drehmomentzahl}, \qquad \sigma = \frac{u}{V} = \frac{\omega\,D/2}{V} \text{ Laufzahl}$$

[1]) Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen, Verlag Oldenbourg, München und Berlin 1927, III. Lieferung, S. 140.

Man erkennt, dass die Leistungszahl C_l einen Höchstwert von nicht ganz 0,3 erreicht bei einem σ von 0,9. Das Rad ist ein sogenannter «Langsamläufer», es hat aber den Vorteil einer nach kleinen Drehzahlen stetig steigenden Momentenkurve, die ein sicheres Anfahren auch bei relativ schwachen Winden ergibt. Es dürfte dies der Hauptgrund für die ziemlich grosse Verbreitung solcher Windturbinen sein.

Lange Zeit herrschte Unklarheit darüber, ob eine grosse oder kleine Flügelzahl günstiger ist. Schon *Euler* hat sich darüber gewundert, dass die vierflügligen holländischen Windmühlen nicht einfach durch Einsetzen weiterer Flügel leistungsfähiger gemacht wurden. Natürlich beruht die holländische Windmühle auf jahrhundertealten Erfahrungen und es war den Windmühlenkünstlern lange vor der Formulierung des Energiesatzes geläufig, dass durch Vergrösserung der Flügelzahl die Leistung nicht oder nur unwesentlich verändert werden kann.

Die volle Aufklärung erfolgte eigentlich erst in der letzten Zeit. Man erkannte, dass es eine *maximale* Leistung für ein scheibenförmiges Windrad gegebener Fläche bei gegebener Windstärke gibt[2]). Das theoretisch grösste C_l beträgt $\frac{16}{27} = 0{,}593$, und der Vergleich mit dieser Zahl ist ein Mass für die «Güte» des Rades. (Von einem Wirkungsgrad des Rades zu reden, hat keinen eindeutigen Sinn, da an sich praktisch unbegrenzte Energiemengen ungenützt am Rade vorbeifliessen.) Die Gütezahl der Windturbine wäre somit $\frac{0{,}296}{0{,}593} = 0{,}50$.

Denkt man weniger an Mühlenbetrieb mit den hohen Anfahrmomenten, sondern mehr an Elektrizitätserzeugung, so spielt das Anfahrmoment nicht mehr die grosse Rolle; hingegen wird es wichtig, die Laufzahl σ hoch zu treiben bei möglichst guter Leistung. Grosses σ bedingt eine kleinere Uebersetzung bis zur elektrischen Maschine und wesentliche Kostenersparnis. Nun ergeben Theorie und Versuch übereinstimmend, dass hohe Schnelläufigkeit nur bei kleiner Gesamtflügelfläche möglich ist, dass also wenige und schmale Flügel verwendet werden müssen. In Abb. 1 u. 3 ist die von uns verwendete Konstruktion ersichtlich; die drei Flügel sind einstellbar, der Einstellwinkel wird auf einem bestimmten Radius (hier 0,36 D) gemessen und mit β bezeichnet. In Abb. 3 sind die C_l-Kurven für die festen Einstel-

[2]) Besonders anschaulich abgeleitet in dem bemerkenswerten Buch von *Betz:* Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Verlag Vandenhoek und Ruprecht, Göttingen 1926.

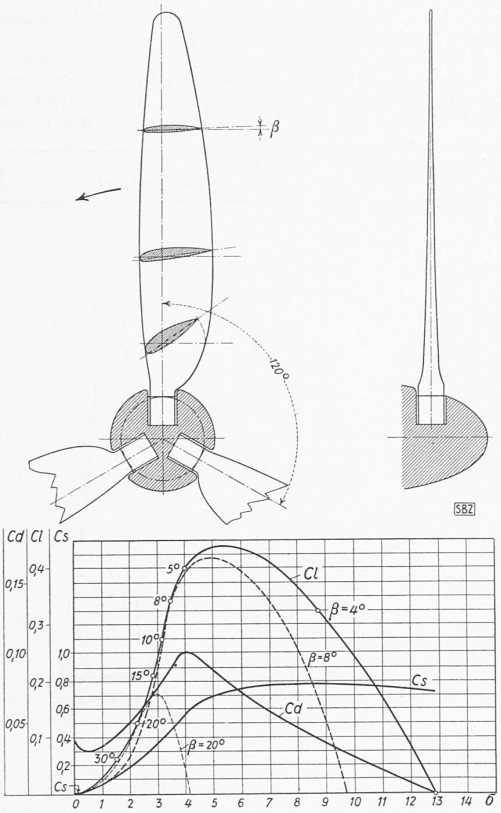


Abb. 3. Untersuchter Schnelläufer mit drei verstellbaren Flügeln. Einstellwinkel β veränderlich

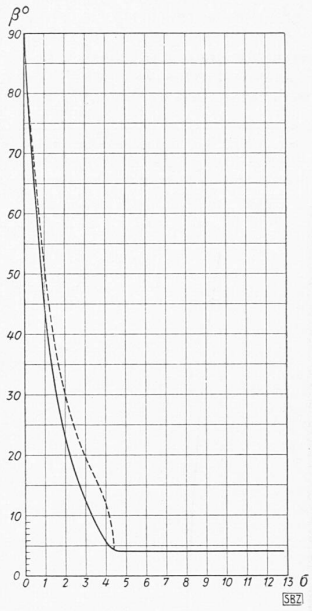


Abb. 4. β in Abhängigkeit der Laufzahl für die Einhüllende (ausgezogen) und für Regulierung auf konstante Leistung (gestrichelt)

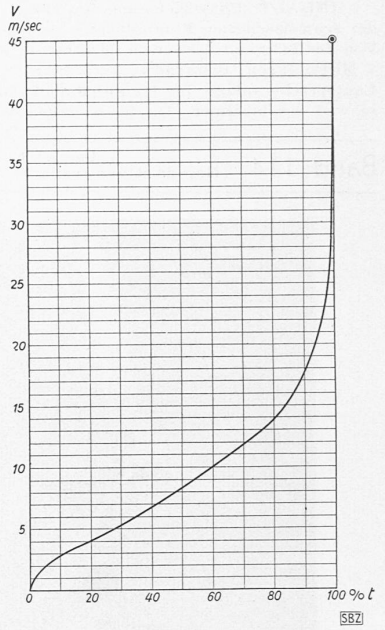


Abb. 5. Verteilung der Windgeschwindigkeiten über die Zeit, für den Brocken (Norddeutschland)
100 % = 8760 Stunden

lungen $\beta = 8^0$ und $\beta = 20^0$ (gestrichelt) und ferner die Hüllkurve der C_l-Werte mit den zugehörigen C_s und C_d eingetragen. Die Einstellwinkel sind angeschrieben; die Gütezahl beträgt $\frac{0{,}44}{0{,}593} = 0{,}74$.

Der C_l-Gewinn gegenüber fester Einstellung ist nur bei grösseren σ bedeutend. Sonst aber liegt der Hauptvorteil der Verstellung darin, dass sie ermöglicht, bei starkem Wind das Drehmoment bei gleichbleibender Drehzahl auf der maximal zulässigen Höhe zu halten, indem man durch weiteres Verdrehen zu grösseren β und damit zu niedrigeren C_d, als der Hüllkurve entspricht, übergeht.

Gerade die Beherrschung der Stürme hat stets grosse Schwierigkeiten gemacht. Durch Einklappen, durch Ausdrehen des Rades aus der Normalebene zur Windrichtung, durch besondere aerodynamische oder mechanische Bremsen hat man das Durchbrennen des Rades mit seinen gefährlichen Beanspruchungen zu verhindern versucht. Bei genügendem Verstellbereich ist es durchaus möglich, das Rad auch bei starkem Sturm ohne Bremsung still zu setzen; der dazu nötige Verstellwinkel beträgt nach der Abb. 4 rund 90°. Der Widerstand des Rades allein ist dann vernachlässigbar klein. Der Turm ist im wesentlichen nur durch den Eigenwinddruck und durch den Widerstand der Generator- und Lagerverschalung beansprucht. Der nötige Verstellbereich geht aus Abb. 4 hervor, wo die Einstellwinkel für die Leistungszahl-Einhüllende angegeben sind. Für den praktischen Betrieb mit begrenztem Höchstmoment muss bei kleinen σ (grossen Windgeschwindigkeiten) mit grösserem β gefahren werden.

Um eine Vorstellung von den Anwendungsmöglichkeiten zu geben, nehmen wir die Windverhältnisse, wie sie für den 1142 m hohen Brocken in Norddeutschland vorliegen. Abb. 5 gibt die Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Zeit geordnet nach wachsenden Geschwindigkeiten an. Man sieht z. B., dass während 80 % der Zeit die Windgeschwindigkeit unter 13,8 m/s bleibt und dass während 58 % der Zeit mit mehr als 7 m/s gerechnet werden darf. Nehmen wir einen Durchmesser von 50 m an, was vielleicht die heutige Grenze der wirtschaftlichen Ausführbarkeit darstellt (Honnef rechnet allerdings in seinen Projekten mit nicht weniger als 160 m), so ergeben sich bei Annahme von Drehstromerzeugung und bei Einsetzung wahrscheinlicher Werte für Getriebe- und Generatorwirkungsgrade die Kurven der Abb. 6. Es ist vorausgesetzt, dass die Anlage keinen Strom mehr nach aussen abgibt, wenn ihre Erzeugung unter 100 kW sinkt, da ja zum Betrieb ein gewisser Eigenbedarf an Energie erforderlich ist. Für die Getriebe wurde eine Konstruktion angenommen, die ein allmähliches Zuschalten einzelner Generatoren erlaubt. Ferner ist gezeigt, welche elektrischen Leistungen der Anlage entnommen werden können, falls man ohne Rücksicht auf das Drehmoment mit veränderlicher Drehzahl stets auf dem günstigsten C_l fährt. Bei den stärksten Stürmen würde die Energieerzeugung, dem V^3-Gesetz entsprechend, sehr gross. Ein Ausbau auf solche Leistungen ist natürlich ausgeschlossen, da diese ja nur für kurze Zeit zur Verfügung stehen. In der Abb. 7 wird die elektrische Ausbauleistung variiert und dazu die günstigste, konstant zu haltende Drehzahl angegeben. Die Laufzeiten gehen immerhin auf über 50 % der Zeit und die Jahreserzeugung an kW-Stunden erreicht Werte zwischen vier und fünf Millionen.

Bevor über die Wirtschaftlichkeit einigermassen brauchbare Aussagen gemacht werden können, ist natürlich eine genaue Kostenberechnung notwendig. Unserer Meinung nach dürfte es sich lohnen, der Frage auch diesbezüglich näher zu treten. Die aerodynamische Seite ist natürlich bei weitem nicht erschöpfend behandelt. So müsste beispielsweise das Verhalten bei böigem Wind, die günstigste Turmhöhe, der Anlauf der Räder noch gründlich untersucht werden, weiterhin die Vereisung im Winter, Einfluss von Regen und Hagel, usw.

Aus der schweizerischen Flugindustrie

Dem Maiheft der neuen schweizerischen Zeitschrift «Flugwehr und -Technik», das eine Artikelserie über die schweizerische Flugindustrie enthält, entnehmen wir im Auszug zwei Aufsätze, deren Verfasser besonders auf die Notwendigkeit eigener Entwicklung in unserer Flugindustrie hinweisen.

Schweizerische Flugmotoren (von Dipl. Ing. *H. Wild*, Arbon). Schon im Jahre 1912 brachte die Werkzeugmaschinenfabrik Oerlikon einen 50 PS-Flugmotor heraus, der für damalige Verhältnisse beachtliche Einzelheiten aufwies[1]). Die Aufstellung einer schweizerischen Militärfliegerabteilung verlangte eine Vereinheitlichung des Materials. Als Flugmotor wurde in den Jahren 1915/16 in der Schweiz. Lokomotiv- u. Maschinenfabrik Winterthur der 120 PS Argus-Motor in Lizenz gebaut.

Der Weltkrieg brachte dann grosse Schwierigkeiten in der Beschaffung stärkerer Motoren. Die Firma Adolph Saurer, Arbon erhielt von der Kriegstechnischen Abteilung den Auftrag, die Fabrikation des damals sehr berühmten Hispano-Suiza-Motors von 150 PS, der nur in vereinzelten Exemplaren und unter grossen Schwierigkeiten beschafft werden konnte, aufzunehmen. Anhand eines Mustermotors wurden mehrere Serien von diesem Typ, für den erst nach dem Kriege eine Baulizenz erworben werden konnte, gebaut und in unsern DH 3-Flugzeugen verwendet.

[1]) Siehe «SBZ» Bd. 59, S. 231* (27. April 1912).