E UND M

ELEKTROTECHNIK UND MASCHINENBAU

INHALT:

Die Messung des Lichtbogenabfalles von Quecksilberdampf-Gleichrichtern. Von G. Reinhardt. S. 497.

Höhenwindkraftwerke. Von H. Honnef. S. 501.

RUNDSCHAU:

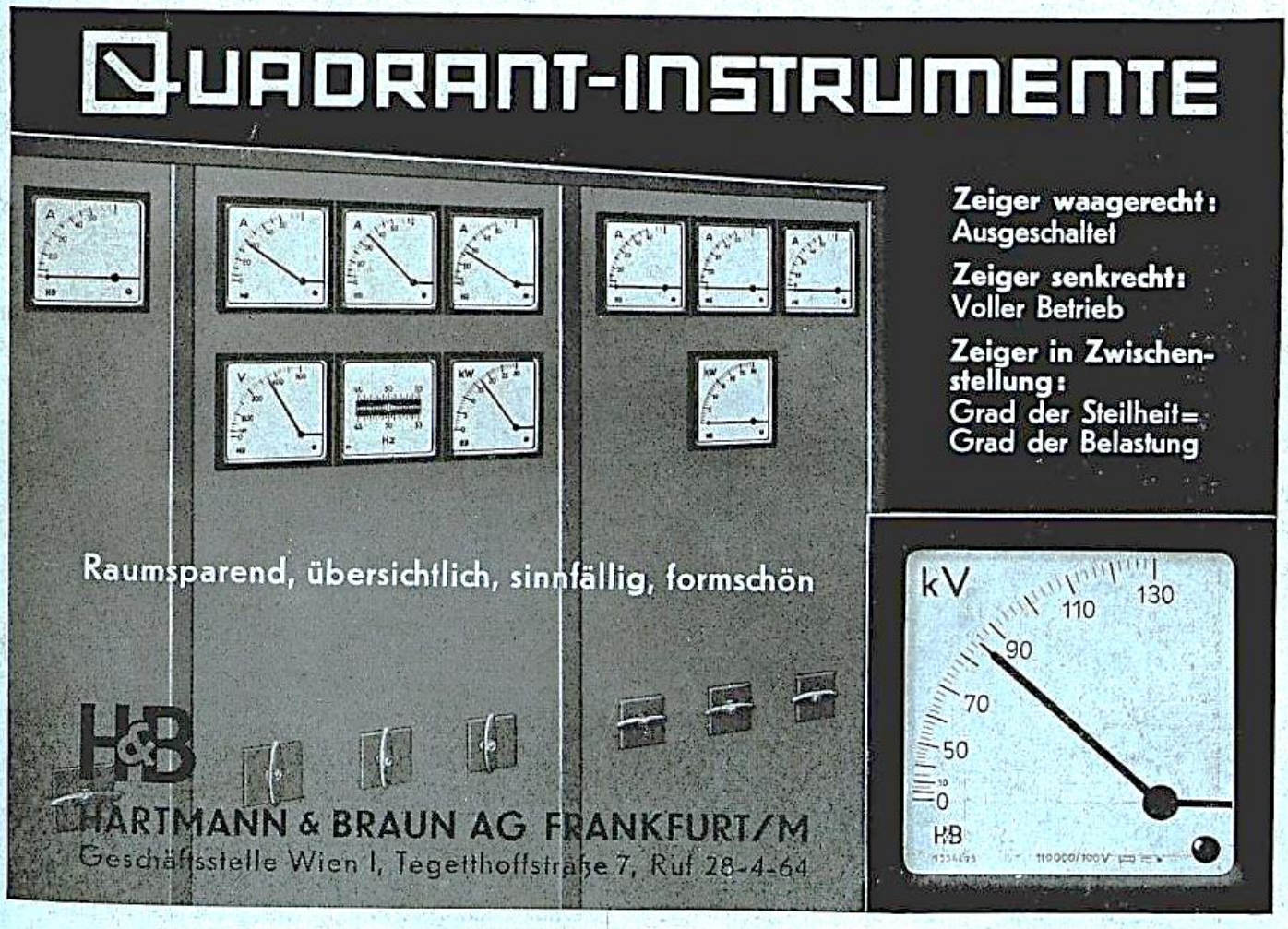
Auslauf- und Senkbremsung eines Asynchronmotors mit Gleichstromerregung und durch Gegenstrom. S. 507.

Kontaktbelag aus verschleißfestem Stahl für Drehstrom-Kransteuerwalzen. S. 507.

Fühlergesteuerte Werkzeugmaschinen. S. 507.

Pyranol-isolierte Leistungs-Transformatoren. S. 508.

BUCHBESPRECHUNGEN. S. 508.



E und M · 57. Jahrg. · Heft 41/42 · Seite 497...508 · Berlin, 13. 10. 1939

Postverlagsort Wien

Elektrotechnik und Maschinenbau

Herausgegeben vom Verband Deutscher Elektrotechniker

Zeitschrift des Elektrotechnischen Vereines in Wien von 1883 bis 1938

57. Jahrgang | Wien, 13. Oktober 1939 | Heft 41/42

Höhenwindkraftwerke.

Von H. Honnef, Berlin.

DK 621.548.4-181.2

Übersicht. Gegenüber bisher üblichen Kraftwerken, bei denen die Maschinen in besonderen Bauten untergebracht sind, wird das Höhenwindkraftwerk als Kraftspender beschrieben, bei welchem das Bauwerk sich im Ganzen zur Maschine bildet. Neuartige Großkonstruktionen sind Träger von Stromerzeugern mit großem Durchmesser, aber sonst kleinen Abmessungen. Die Ausnutzung der vorteilhaften Höhenwindströme führt zu außergewöhnlich hohen Bauten, die aber vollkommen sturm- und standsicher, wie auch wirtschaftlich sind. Es werden Einzelheiten der gegenläufigen Turbine und einige Versuchsergebnisse gezeigt.

A. Der Gang der Winde.

Höhenwindkraftwerke unterscheiden sich von Windmühlen und den bekannten kleinen Einzelturbinen. Mehrere große Turbinen sind hoch über der Erde vereinigt zusammengelegt, aber so, daß die untersten Kanten der Flügel noch über 100 m oberhalb des Erdbodens liegen. Die Großturbinen sollen in der Höhenzone arbeiten und den Störungen der Erdwirbelzone entzogen sein.

Bei Beurteilung der Winde muß zwischen beiden Zonen unterschieden werden. Durch die Untersuchungen der bekannten Meteorologen Aßmann[1]) und Hellmann[2]) sind wertvolle Messungen über den Gang der Winde bekannt geworden. Während Aßmann als Erster die Ergebnisse 20 bis 30jähriger Messungen deutscher Wetterdienststellen bearbeitete, stellte Hellmann zum erstenmal den Gang der Winde in der Höhe fest. Die Messungen Hellmanns wurden von den Meteorologen Pilgrim (Stuttgart), Grosse (Bremen), Bradtke, Laske und H. Bongards bestätigt, die auch neue Formeln für Zunahme der Windgeschwindigkeiten mit der Höhe über Erde aufstellten. Die Formelwerte stützten sich auf Messungen in Nauen und Potsdam. Spätere Messungen in anderen Gebieten zeigten in der Höhenzone größere Geschwindigkeiten, als von Hellmann unter anderem festgestellt. Eine Nachprüfung der Zahlen über Veränderung der Windgeschwindigkeiten an Hand der Veröffentlichungen der „Aerodynamischen Berichte" des Flugwetterdienstes ergab höhere Werte[3]). Auch die in den letzten Jahren vom Reichswetterdienst ausgeführten 30 000 Kontrollmessungen haben die ersten Ergebnisse noch verbessert.

In der Erdwirbelzone ist die Geschwindigkeit im Jahresdurchschnitt mit 5 bis 6 m/s festgestellt. In der Höhenzone verdoppelt sich diese. Außerdem ändert sich dabei der Tagesgang. Bild 1 zeigt den Höhengang für Zonen von 2 m über Erde bis zu 124 m. Während in der unteren Zone noch erhebliche Schwankungen mit den stärksten Abweichungen zur Mittagszeit vorliegen, wird der Tagesgang mit zunehmender Höhe gleichmäßiger.

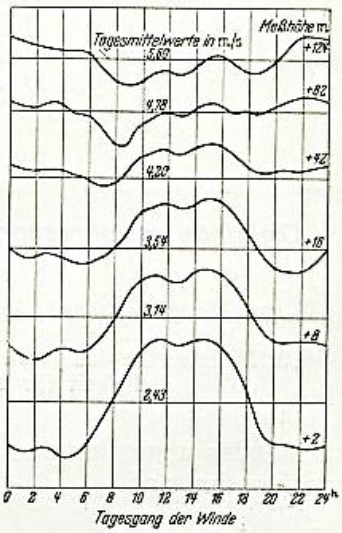


Bild 1. Mittelwerte des Tagesganges der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Höhen.

In etwa 100 m über Erde verschwindet die Amplitude der Mittagszeit. In größerer Höhe, bei 300 m zeigt der Jahresdurchschnitt eine schwache Einsenkung im Tagesgang, die bei starken Winden fast ausgeglichen wird. Die Arbeit des Windes wächst mit v^3, ist also in der Höhenzone bei doppelter Windgeschwindigkeit achtmal stärker als in der Erdwirbelzone. Diese achtfache Leistung ist im Jahresdurchschnitt mit einer höheren Gleichmäßigkeit verbunden. Ein weiterer Ausgleich wird möglich, wenn die Hauptwindgebiete unter sich in Verbindung gebracht werden. Größt- oder Kleinstleistungen treten niemals in allen Gebieten gleichzeitig auf. Bild 2

[1]) Assmann, Die Winde in Deutschland, F. Vieweg, Braunschweig, 1910.

[2]) Hellmann, Sitzungsbericht der Akademie der Wissenschaften, Berlin 1914, 1917 und 1919.

[3]) H. Honnef, Windkraftwerke, S. 12. F. Vieweg, Braunschweig, 1932.

zeigt den Tagesgang der Winde für einige Orte, Bild 3 den Jahresgang für verschiedene Windgebiete Deutschlands und die Unterschiede, die zur selben Zeit in den einzelnen Gebieten vorhanden sind. Gleicht man die Schwankungen zur gleichen Zeit aus, dann erhält man eine sehr hohe Gleichmäßigkeit, die durch Auswahl zueinander abgestimmter Gebiete noch verbessert werden kann. Praktisch ist der Ausgleich durch Sammelschienen und Ringleitungen möglich. Nach Bild 3 ist eine Beschränkung der Schwankungen in der Jahresleistung auf etwa 4 vH durchführbar, wenn die

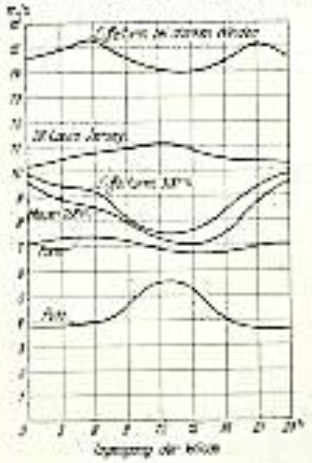


Bild 2. Mittelwerte des Tagesganges der Windgeschwindigkeit für einige Orte.

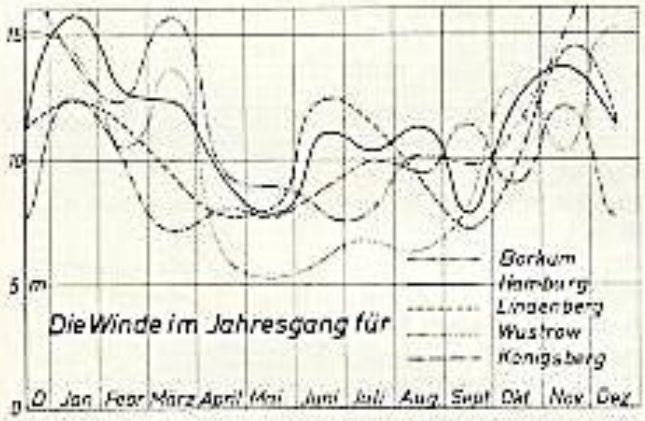


Bild 3. Mittelwerte des Jahresganges der Windgeschwindigkeit für einige Orte.

zueinander abgestimmten Windgebiete zusammengeschlossen sind.

B. Die Umwandlung der Windenergie in Elektrizität in der gegenläufigen Turbine.

Der Staudruck des Windes vor der Turbine erzeugt den Radschub:

$$H = 1/18 \cdot v^2 \cdot F$$

bei einer Leistung von

$$L = \eta/27 \cdot v^3 \cdot F \text{ [4]}.$$

Der Wirkungsgrad η bestimmt sich aus Verlusten, die in der Turbine selbst, wie auch im Generator entstehen. Es sind hierzu rein aerodynamische Untersuchungen, wie auch Versuche mit der stromgebenden Turbine durchgeführt worden. Eine Wiedergabe derselben bleibt besonderer Veröffentlichung vorbehalten. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Zahl und Bauart der Flügel, von der Windgeschwindigkeit, von der Schnellaufigkeit, von Reibungs- und Stromverlusten. Schnellläufer haben schmale, leichtere Flügel. Die langsam laufende Turbine ist belastungsfähiger und fährt leichter an.

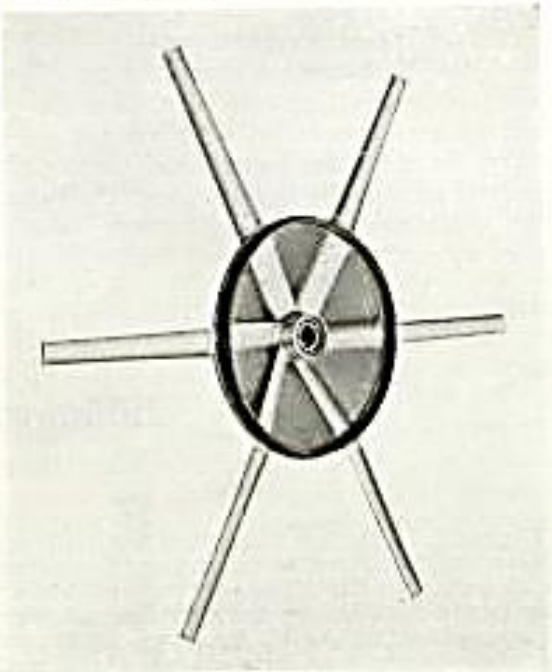


Bild 4. Modell des Polrades der Turbine.

Bei gegebener Flügelbauart, bedingt durch den Fortschrittsgrad U/v (Umfangsgeschwindigkeit/Windgeschwindigkeit) ist U für alle Durchmesser gleich. Daraus ergeben sich für die großen Turbinen des Höhenwindkraftwerkes trotz der Schnellaufigkeit kleine Drehzahlen bei großen Drehmomenten. Die Übertragung großer Leistungen bei kleiner Drehzahl führt zu unmäßigen und unwirtschaftlichen Getrieben. Die bei Windmühlen und kleineren Windrädern übliche mechanische Energieübertragung ist daher bei langsam laufenden Großturbinen nicht anwendbar. Die Ausnutzung der hohen Umfangsgeschwindigkeit der Großturbine führte zur Entwicklung der gegenläufigen Turbine, deren Flügel durch Ringe mit großem Durchmesser verbunden sind. Die Ringe dienen der unmittelbaren Stromerzeugung und sind deshalb als Hohlkörper mit geschlossener Außenwand ausgebildet, in deren Innerem auf der einen Seite Jochring und Pole, auf der anderen Seite der Anker mit den Ankerspulen untergebracht sind. Ringe und Flügel werden statisch vorteilhaft zueinander abgestimmt. Wesentlich ist dabei, daß



Bild 5. Modell des Ankerrades der Turbine.

[4]) H. Honnef, l. c., S. 34 bis 36.

Ringe und Flügel elastisch gleichlaufend zueinander liegen, also unter Fliehkraft-, Temperatur- und sonstigen Wirkungen sich nicht in Richtung der Achse gegeneinander bewegen. Infolgedessen kann bei sehr großem Durchmesser der Ringgeneratoren ein verhältnismäßig kleiner Luftspalt zugelassen werden. Bild 4 zeigt das Modell eines Turbinenrades mit dem Polring, Bild 5 das zweite Rad mit den Ankerspulen. Der Erregerstrom wird über Schleifringe an der Turbinennabe durch die Flügel zu den Polspulen geführt. Zur Erzeugung des Erregerstromes dienen besondere kleine raschlaufende Turbinen mit unmittelbar gekuppelten gegenläufigen Gleichstrommaschinen. Die Anordnung der Windräder zeigt Bild 6. In Bild 7 ist die Anlage zur Erzeugung des Erregerstromes dargestellt. Der erzeugte Drehstrom geht durch die Flügel des anderen Rades zu dem zweiten Satz der Schleifringe in der Radnabe. Die Anordnung der Stromüberführung ist in Bild 8, das einen Längsschnitt durch die Turbinenachse zeigt, dargestellt. Die Schleifringe mit den Kohlenbürsten liegen vollkommen wettersicher, geschützt und gut geführt zwischen den Fahrwerken an der Turbinenachse. Jede Turbinennabe hat zwei Lagerringe, jeder 6 Fahrwerke mit je 4 Stahlrädern in Tonnenlagern umfassend. Zwischen den Fahrwerksringen liegen tangentiale Radführungen, welche den Axialschub von der Turbine auf die feststehende Achse des Tragrahmens überleiten.

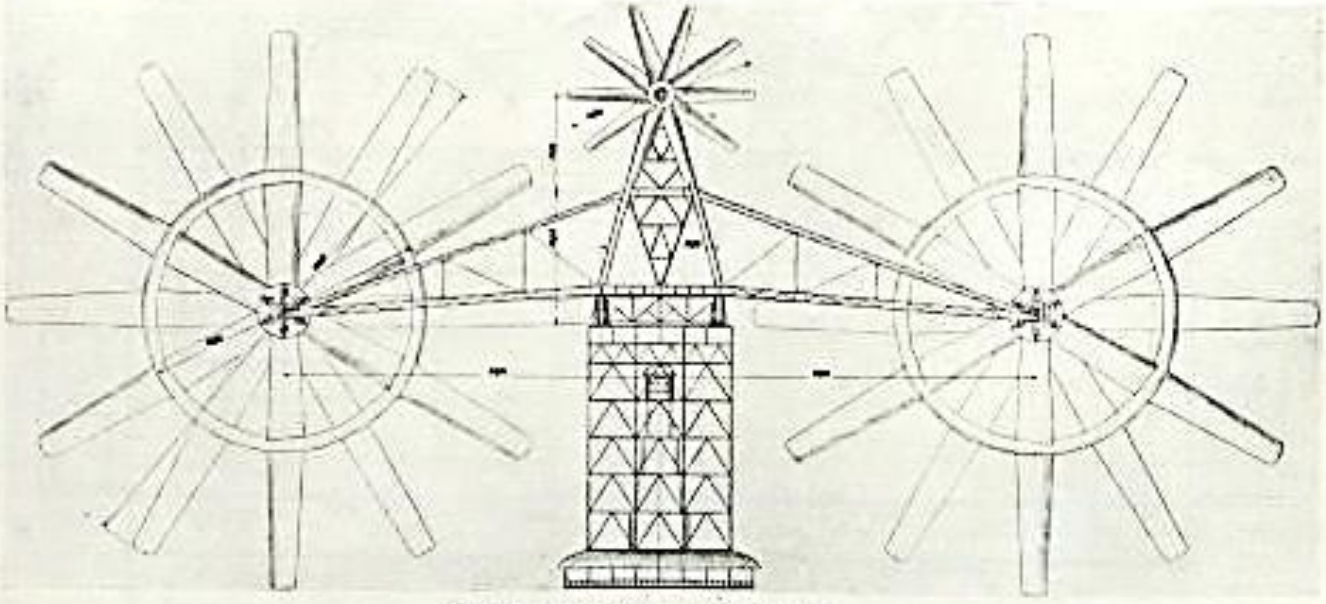


Bild 6. Anordnung der Windräder.

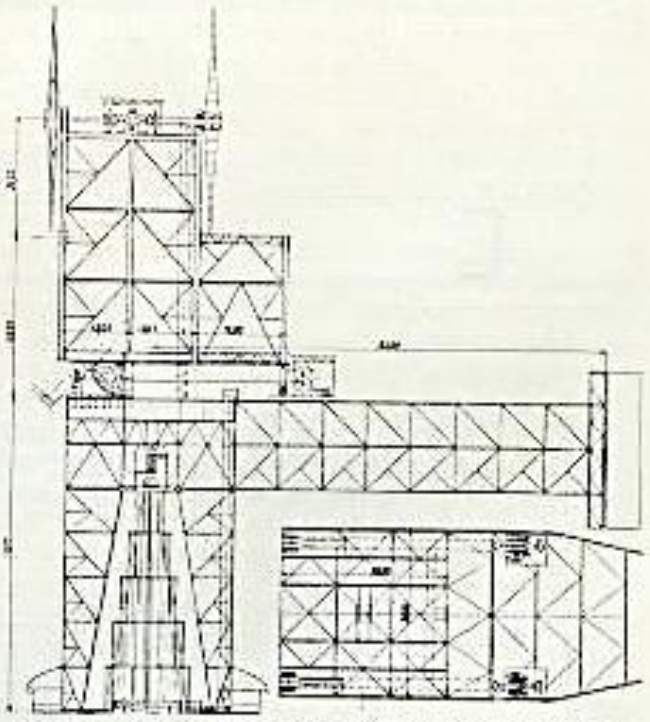


Bild 7. Turbine zur Erzeugung des Erregerstromes.

Der große Durchmesser des Ringgenerators führt bei den kleinen Drehzahlen zu einer Vielpolmaschine, deren Einzelheiten aus Bild 9 hervorgehen. Luftspalt, Mantelführung und Lüftung sind in dieser Abbildung erkennbar. Die Ankerspulen sind isoliert abgefangen. Beim Wetterschutz ist der Luftdurchtritt frei gelassen. Die Ankerlänge ist klein, so daß der Eisenaufwand gering wird. Einbauten, die zu Wirbelbildungen führen, sind vermieden. Der Hohlkörper der Ringe ist begehbar, so daß alle Teile zugänglich sind. Ein- oder Ausbau einzelner Spulen ist nicht schwierig. Die Erregerleitungen wie auch die Stromabführung liegen in den Hohlkörpern der gleichfalls begehbar eingerichteten Flügel. Der mit 5000 bis 6000 V erzeugte Drehstrom kann über Regeltransformatoren und einen Gleichstromzwischenkreis in bekannter Weise der Frequenz der Verbraucherleitung angepaßt werden. Zweckmäßig ist es, die Wicklung vielphasig auszuführen, um kleinere Oberwellen bei der Gleichrichtung zu erhalten. Eine Übersteigerung der Drehzahlen wie der Leistung wird durch Einschwenken der ganzen Turbine vor stärkeren Winden vermieden. Das Einschwenken beginnt bei $v = 15$ m/s. Die Schübe und Drehzahlen werden durch die Schräglage reguliert. Bild 10 zeigt den Verlauf der sich dann ergebenden Leistungen, die bei konstantem Axialschub und zunehmendem v noch anwachsen. Bei 36° Neigung gegen die Senkrechte ist eine weitere

Steigerung der Leistung bei wachsendem v ausgeschlossen. Geht der Wind in Sturm über, so reicht sich zwischen $v = 15$ bis $v = 36$ m/s zeigende Leistungssteigerung auszuschalten, wird man den

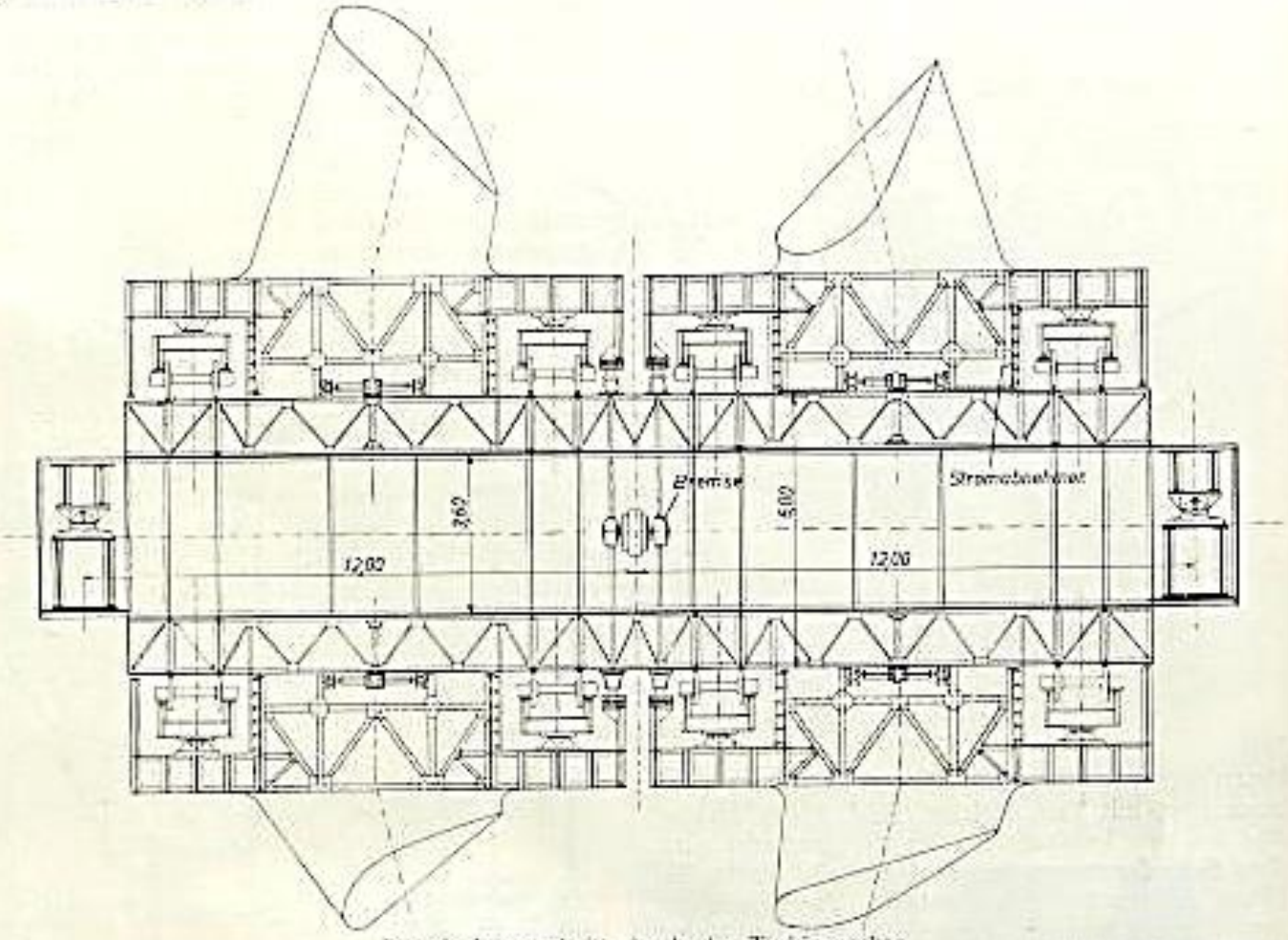


Bild 8. Längsschnitt durch die Turbinenachse.

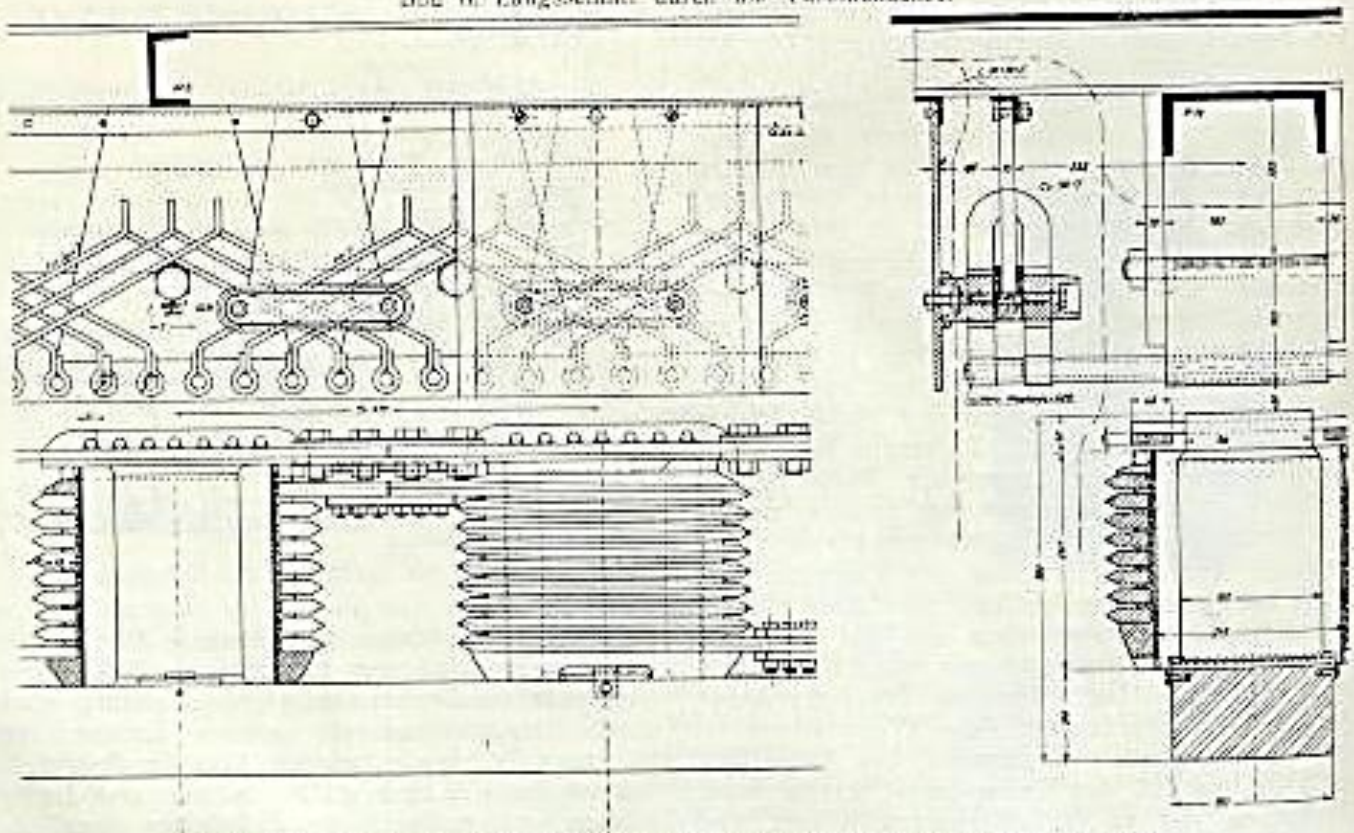


Bild 9. Einzelheiten der Pol- und Ankerwicklung eines Generators für 20 000 kW.

also eine Schräglage von 35° bis 40° schon aus, um Überlastungen zu vermeiden (Bild 11). Um die Schub der Turbine nicht konstant halten, sondern von $v = 15$ m/s ab senken. Auch die Nebenturbinen

machen die Schwenkbewegungen mit, so daß die Erregung sich dem Bedarf der Drehstromgeneratoren anpaßt. Das Verhalten der Turbinenräder

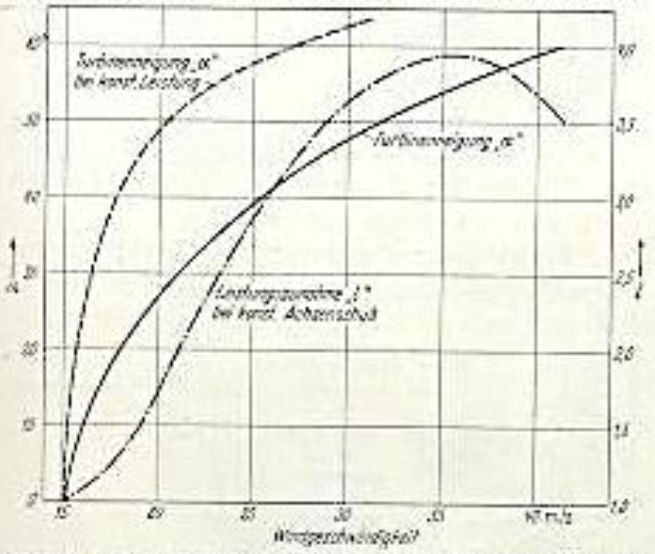


Bild 10. Leistungszunahme bei wachsender Windgeschwindigkeit bis zu $v = 15$ m/s und Verlauf der Leistung bei konstant gesteuertem Horizontalschub.

bei plötzlicher Entlastung oder Kurzschluß wurde auch untersucht und festgestellt, daß die Drehzahlen, die bei beiden Rädern wenig Unterschied

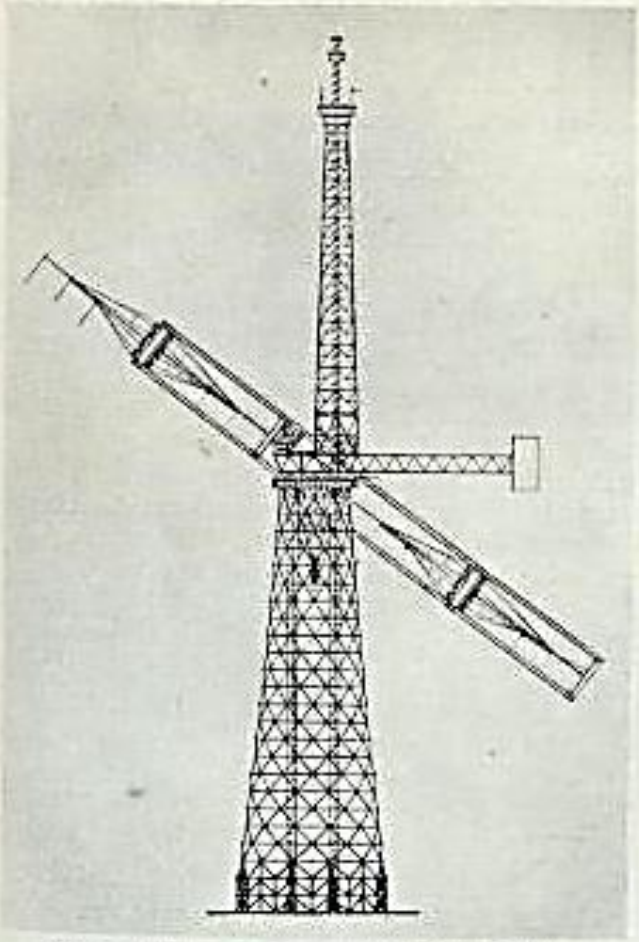


Bild 11. Höhenwindkraftwerk in Sturmstellung.

zeigen, um höchstens 70 vH gesteigert werden. Es ergeben sich also für die Großausführung günstige statische Verhältnisse, die auch eine vorteilhafte Materialausnutzung des Generators gestatten.

C. Der Turmbau.

Es ist wenig bekannt, daß Deutschland einen freistehenden Stahlturm besitzt, der die Höhe des nun 50 Jahre alten Eiffelturmes nicht ganz erreicht, aber bei wesentlich leichterer Konstruktion größere Kräfte aufnehmen kann. Die Erfahrungen beim Bau dieses Turmes und anderer Türme führten zur Entwicklung neuer Turmkonstruktionen. Die neue Bauart ist torsionssicher und bietet dem Winde kleinste Angriffsflächen. Der Turm wird, um die Turbinen dem Einfluß der Erdwirbelzone zu entziehen, rund 300 m hoch. Die Breite am Fuß beträgt dabei rund 100 m, so daß bei einem Schlankheitsgrad von 1 : 3 größte Steifigkeit bei kleinsten Schwankungen gesichert ist. Die Standsicherheit ist so groß, daß Verankerungen nicht nötig wären. Die Eigenschwingung führt zu keiner Resonanz, auch wenn außer den Turbinen andere Erreger, zum Beispiel wehrtechnischer Art, den Turm beanspruchen.

Bei 300 m Höhe setzt sich die Konstruktion aus 25 Stockwerken von je 12 m Höhe zusammen. Jedes Stockwerk wird durch 12 oder mehr senkrecht stehende Dreiecke gebildet, deren Spitzen jeweils die Füße der aufgesetzten Dreiecke tragen. So entsteht bei senkrechten Wandabschnitten eine Verjüngung nach oben, welche die Beanspruchung der Stäbe dem Verlauf der hauptsächlichsten Kräfte anpaßt. Die senkrechten Lasten verteilen sich auf alle Stäbe gleichmäßig. Die Beanspruchung durch Wind ist so, daß alle Stockwerke gleichzeitig ausgenutzt werden. Der Kopf des Turmes hat 50 bis 60 m Breite und wird durch einen starken Stahlring abgeschlossen. Unter dem Ring ist ein Trichter eingehangen, der eine drehbare Konstruktion aufnimmt. Der drehbare Teil ist rückwärts mit einem Steuerschwanz und oben mit einer Lagerplattform versehen, auf welche sich der Tragrahmen mit den Turbinen stützt. Der Rahmen liegt auf starken Wälzlagern (Bild 6). Zweckmäßig werden zu den Haupttraggliedern des feststehenden Turmteiles rohrartige Stahlkörper verwendet, was nicht ausschließt, daß bei Höhenwindkraftwerken kleinerer Leistung (Bild 7) auch Holz verwendet werden kann. Die Montage wird so ausgeführt, daß zunächst die Turbinen zu ebener Erde zusammengebaut und mit dem Tragrahmen verbunden werden. Dann kommen Hubwerke zur Anwendung, welche den Kopf mit den waagrecht liegenden Turbinen anheben und in ständigem Wechsel der Stützpunkte den Turm stockwerkweise unterbauen. Die Kosten der Hubwerke werden durch Abkürzung der Bauzeit wettgemacht.

D. Die Sturmsicherung.

In der Höhenzone Mitteleuropas können Windgeschwindigkeiten bis zu 50 m/s auftreten, die sich in anderen Erdteilen bis zu 60 m/s erhöhen. Nach den bekannten Vorschriften ist hiefür ein Winddruck von 250 kg/m² anzusetzen, für den die Stahlkonstruktion, die Fundamente und die Standsicherheit bestimmt werden. Die Turbinen sollen auch im Sturm mit der Höchstleistung arbeiten. Doch soll diese dabei auf die eingebaute Leistung für $v = 15$ m/s beschränkt und gleichmäßig bleiben.

Wie unter *B* schon erwähnt, werden die Turbinen schräg gestellt, und zwar so, daß die Schräglage sich der wachsenden Windgeschwindigkeit anpaßt, um eine Steigerung der Leistung, der Axial-Schübe und der Drehzahlen zu vermeiden. Ein Einschwenken um 35° bis 40° genügt bereits, kann also in kurzer Zeit bewältigt werden. Beim Einschwenken bewegen sich die Wälzlager gegen den Wind. Der Schwerpunkt aller Windflächen des Tragrahmens und der Turbinen liegt etwas unter der Lagerfläche des Wälzlagers. Der Schwerpunkt der senkrechten Lasten liegt etwas hinter dem Stützpunkt. Bis zu $v = 15$ m/s sind das Kippmoment des Windes und das aufrichtende Moment der senkrechten Lasten ausgeglichen. Bei höherer Windgeschwindigkeit wächst das Kippmoment und der Wind sucht die Turbinen mit Rahmen und Wälzlagern zu kippen. Dies wird aber durch Zugwinden geregelt, die durch besondere Windmesser über Relais gesteuert werden und das Wälzlager sicher führen. Um die Beschleunigung der Massen beim Kippen einzuleiten, ist ein Zylinder mit langem Druckkolben vorgesehen, der nach dem Kippen in Schräglage bleibt und die zurückschwingenden Massen abfängt.

Durch die vorbeschriebenen Maßnahmen kommen für den Axialschub der Turbinen nur zwei statische Belastungen in Frage: im Stillstand volle Sturmlast der Flügelflächen und während der Arbeit der $v = 15$ m/s entsprechende Schub, der bei größerem v durch Schräglegen gleich gehalten wird. Der Druck auf Rahmen und sonstige Konstruktionen wird mit den Höchstwerten eingesetzt.

Bei der statischen Behandlung der Turbinen sind noch die Zusatzkräfte aus Biegung, Fliehkraft, Kreisel-, Massenwirkung und elektrisches Feld zu berücksichtigen[5]).

Durch die Bewegung des Wälzlagers gegen den Wind tritt eine starke Entlastung des Turmes ein, verbunden mit einer Erhöhung der Standsicherheit, indem die oberen beweglichen Lasten sich nach vorn schieben und den Kippmomenten des Winddruckes entgegen wirken, wie das aus Bild 11 ersichtlich ist. Das Einschwingen der Turbinen gegen den Wind stellt also eine sehr wirksame Maßnahme zur Sicherung des Windkraftwerkes im Sturm dar.

E. Stromkosten.

Unter Zugrundelegung derzeitiger Preise für große Stahlkonstruktionen, Eisenbeton und elektrische Einrichtungen sind ausführliche Kostenberechnungen für Höhenwindkraftwerke aufgestellt worden. Je nach Leistung und Aufstellungsort stellen sich die Kosten für ein Kilowatt eingebauter Leistung auf RM 260.— bis RM 340.—. Die Kosten K für eine Kilowattstunde ergeben sich allgemein nach der Formel:

$$K = \frac{A \cdot (Z + U)}{t} + b,$$

wobei:

A = Kosten für ein kW eingebauter Leistung,
Z = Kapitaldienst,
U = Unterhaltungs- und Betriebskosten,
b = Energiekosten,
t = Benutzungsdauer der eingebauten Leistung.

Die Kosten K ermitteln wir vergleichsweise auch für Kohlen- und Wasserkraftwerke. Es seien angesetzt:

Windkraftwerke:
$A = 340$ RM/kW; $Z = 8$ vH; $U = 2$ vH; $b = 0$,
Kohlenkraftwerke:
$A = 200$ RM/kW; $Z = 8$ vH; $U = 4$ vH; $b = 0{,}8$,
Wasserkraftwerke:
$A = 1000$ RM/kW; $Z = 8$ vH; $U = 3$ vH; $b = 0$.

Der Vergleich der Stromkosten nach Bild 12 zeigt eine größere Überlegenheit der Höhenwind-

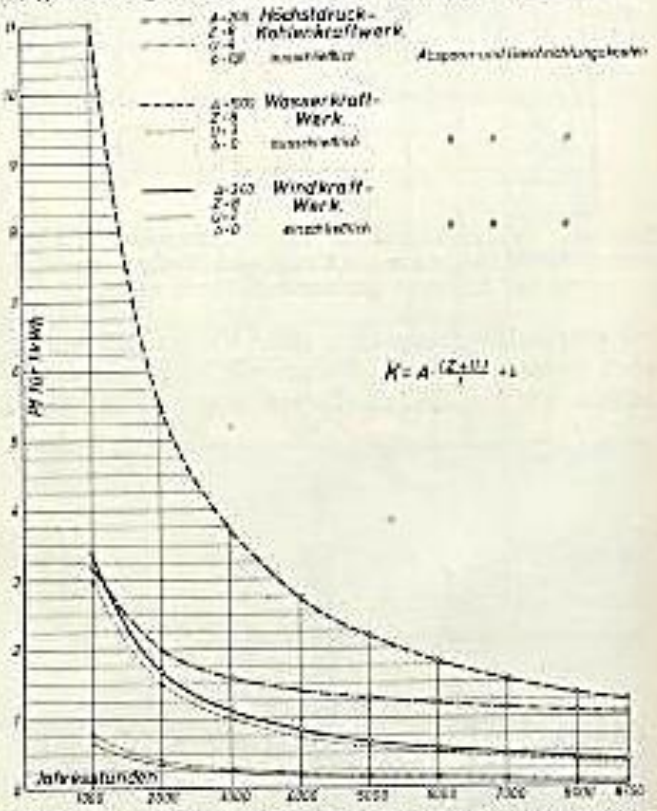


Bild 12. Vergleich der Stromkosten des Höhenwindkraftwerkes mit anderen Kraftwerksarten. (Die dünnen Linien geben die Kosten U an.)

kraftwerke. Diese Überlegenheit erstreckt sich gegenüber Wasserkraftwerken auch auf die Jahresleistung (Bild 13) und kleinere Anlagekosten.

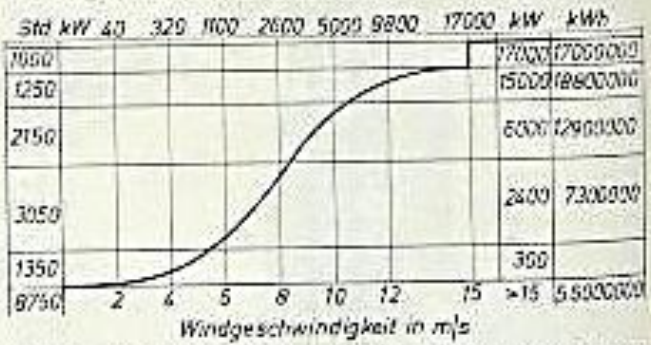


Bild 13. Jahresstromerzeugung für Turbinen von 160 m Durchmesser.

Zusammenfassung.

Durch Ausnutzung der Höhenwindströme treten die Höhenwindkraftwerke bei entsprechender Konstruktion in Wettbewerb mit den Wärme- und Wasserkraftwerken.

[5]) Vgl. H. Honnef, l. c., S. 61.

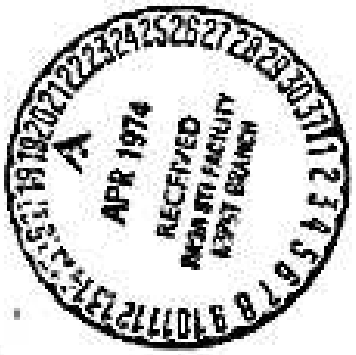
NASA TECHNICAL TRANSLATION NASA TT F-15,444

HIGH WIND POWER PLANTS

H. Honnef

(NASA-TT-F-15444) HIGH WIND POWER PLANTS (Scientific Translation Service) $6 ++ p HC CSCL 10A N74-19709 Unclas G3/03 34391

Translation of "Höhenwindkraftwerke", Elektrotechnik und Maschinenbau, Vol. 57, No. 41 and 42, October 13, 1939, pp. 501 - 506.



Reproduced by NATIONAL TECHNICAL INFORMATION SERVICE US Department of Commerce Springfield, VA. 22151

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
WASHINGTON, D.C. 20546 APRIL 1974

STANDARD TITLE PAGE

1. Report No. NASA TT F-15,444	2. Government Accession No.	3. Recipient's Catalog No.
4. Title and Subtitle: High Wind Power Plants		5. Report Date: April, 1974
		6. Performing Organization Code
7. Author(s): H. Honnef		8. Performing Organization Report No.
		10. Work Unit No.
9. Performing Organization Name and Address: SCITRAN, Box 5456, Santa Barbara, CA 93108		11. Contract or Grant No. NASW-2483
		13. Type of Report and Period Covered: Translation
12. Sponsoring Agency Name and Address: National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. 20546		14. Sponsoring Agency Code

15. Supplementary Notes
Translation of "Höhenwindkraftwerke", Elektrotechnik und Maschinenbau, Vol. 57, Nos. 41 and 42, October 15, 1939, pp. 501 - 506.

16. Abstract

In comparison to the usual power plants in which the machines are installed in special buildings, the high wind power plant is described as a power source in which the structure as a whole makes up the machine. Here large structures are supports for generators with large diameters but with the other dimensions small. The use of the advantageous high wind flow leads to unusually high structures, but these are completely storm-safe and stable, as well as economical. Details of the counter-rotating turbine and some experimental results are presented.

17. Key Words (Selected by Author(s))	18. Distribution Statement

HIGH WIND POWER PLANTS

H. Honnef

A. The Course of the Wind

/501

High wind power plants are different from windmills and the
-known single turbines. Several large turbines are combined
above the ground, but so that the lowest edges of the wings
still more than 100 m above the ground. The large turbines
intended to work in the high zone, and to be removed from
disturbances of the surface turbulence zone.

We must differentiate between the two zones in evaluating
wind. Valuable measurements about the course of the wind
become known through the investigations of the well-known
orologists, Assmann [1] and Hellmann [2]. Although Assmann
the first to work up the results from 20 to 30 years of
urements at German Weather Service stations, Hellmann was
first to establish the course of the high wind. The measure-
s by Hellmann were confirmed by the meteorologists Pilgrim
ttgart), Grosse (Bremen), Bradtke, Laske, and H. Bongards,
also set up new formulas for the increase of wind velocity
height. The formula values are supported by measurements at
n and Potsdam. Later measurements in other regions showed
ter wind speeds in the high zone than were established by
mann, among others. Testing of the numbers, with changing
he wind speeds by means of the publications of the
odynamic Reports" of the Flight Weather Service yielded higher
es [3]. Also, the 30,000 test measurements done in recent
s by the Reich Weather Service has improved the first results.

---

mbers in margin indicate pagination in original foreign text.

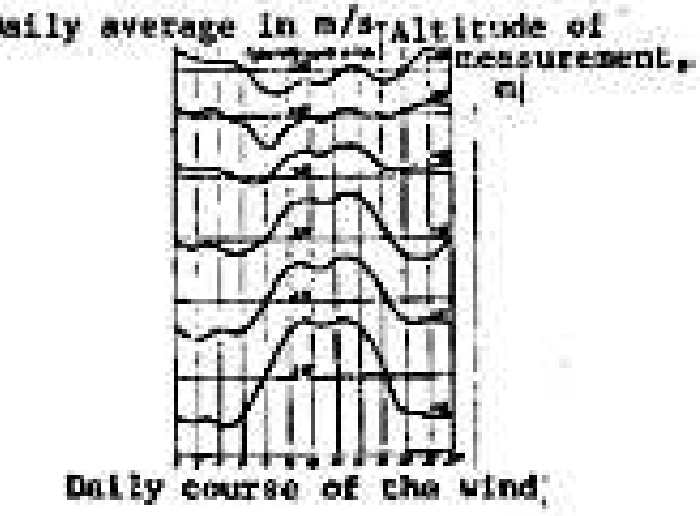


Figure 1. Averages of the daily course of the wind speed at different altitudes

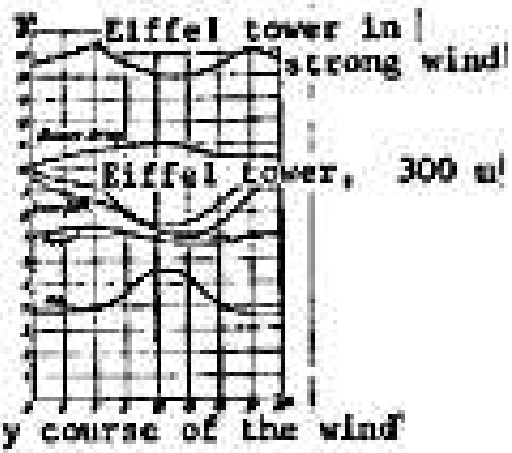


Figure 2. Averages of the daily course of the wind speed for some locations

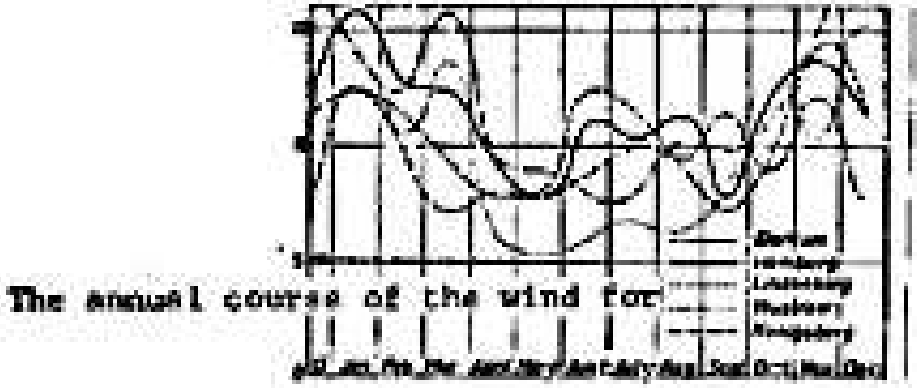


Figure 3. Averages of the yearly course of the wind speed for some locations

In the surface turbulence zone, the average annual velocity has been established as 5 to 6 m/s. This doubles in the high zone. The daily course also changes. Figure 1 shows the change with altitude for zones from 2 meters above the ground up to 124 m. While there are still considerable fluctuations in the lower zones, with the strongest deviations at noon, the daily course becomes more even with increasing altitude. At about 100 m above the ground, the noon amplitude disappears. At higher altitude, 300 m, the yearly average shows a weak depression in the daily course, which is almost compensated with strong winds. The power of the wind increases with v^2, and is therefore eight times stronger in the high zone with doubled wind speed than in the surface turbulence zone. This eight-fold power is combined with greater evenness in the yearly average. More compensation is possible if the major wind regions are connected with each other. Maximum and minimum powers never occur simultaneously in all regions. Figure 2 shows the daily course of the winds for /5
some locations, and Figure 3 shows the yearly course for different wind regions of Germany, and the differences existing between the individual regions at the same time. If one balances out the fluctuations at the same time, then one obtains very high uniformity, which can be improved even more by selection of regions matched to each other. Practically, compensation is possible by means of collecting lines and ring mains. According to Figure 3 it is possible to limit the fluctuations in the yearly power to some 4% if the matched wind regions are connected together.

B. Conversion of the Wind Energy into Electricity in Present Turbines

The stagnation pressure of the wind in front of the turbine generates the wheel thrust

$$H = 1/16 \cdot v^2 \cdot f$$

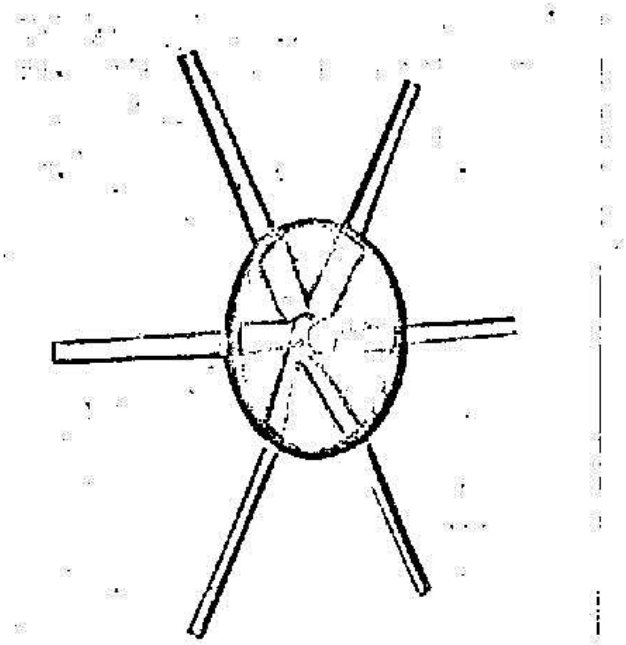


Figure 4. Model of the turbine field wheel

at a power of

$$L = \eta/27 \cdot v^3 \cdot F. \qquad [4]$$

The efficiency, η, is determined by the losses arising in the turbine itself as well as in the generator. Purely aerodynamic investigations as well as experiments with power-generating turbines, have been performed on this matter. Presentation of them is reserved for a special publication. The efficiency depends on the number and design of the vanes, on the wind velocity, on the operating speed, and on friction and current losses. High-speed systems have small, lighter vanes. The slow-running turbine carries a greater load and starts more easily.

For a given vane design, depending on the modulus U/v (peripheral velocity/wind velocity), U is the same for all diameters. Thus, the large turbines of the high wind power plant have low rotational speeds in spite of being high-speed systems, with large torques. Transfer of high powers at low rotational speed leads to oversized and uneconomical gears. Therefore, the mechanical power transfer which is common for windmills and smaller wind wheels is not applicable for slow-running large turbines. Utilization of the high peripheral speed of the large turbines led to development of the counter-rotating turbines, having vanes connected with large-diameter rings. The rings serve for direct power generation and are, therefore, designed as hollow bodies with closed outer walls. On one side of their interior they have the yoke ring and field, with the armature and armature coils on the other side. The rings and vanes are matched statically to each other for best results. It is important that the rings and vanes run elastically in parallel /503 so that they have no reciprocal movement in the direction of the axle under the effect of centrifugal force, temperature and other effects. As a result, a relatively small air gap can be allowable at very large diameters for the ring generators. Figure 4 shows a model of a turbine wheel with the field ring,



Figure 5. Model of the turbine armature wheel

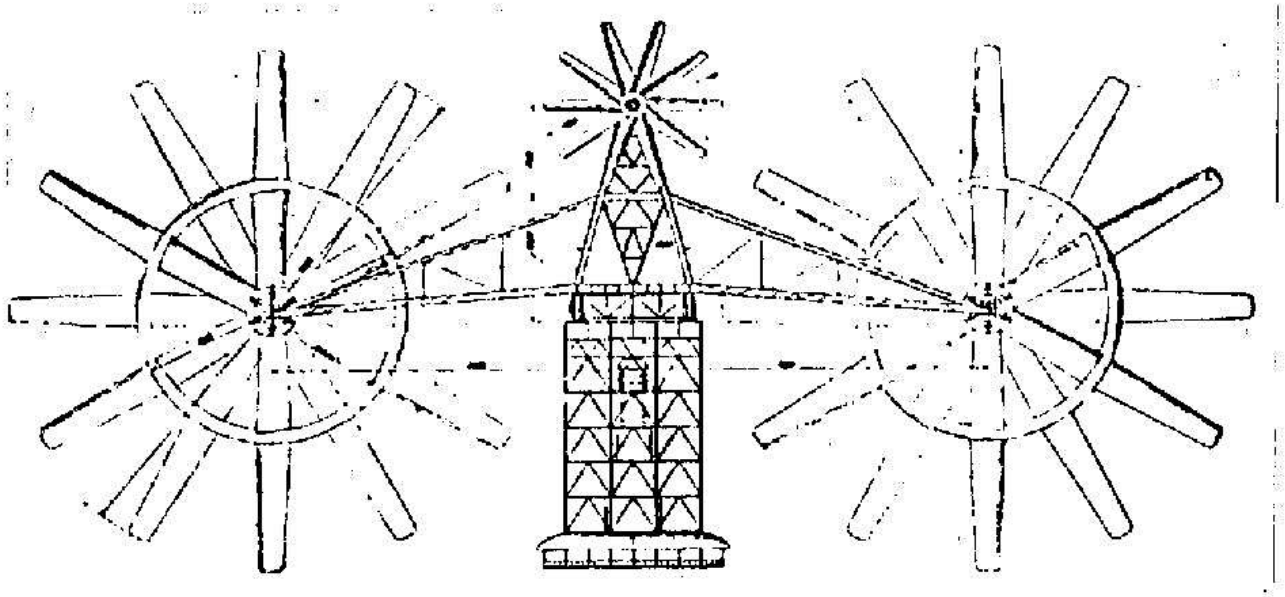


Figure 6. Arrangement of the wind wheels

and Figure 5 shows the second wheel with the armature coils. The exciter current is led through the vanes to the field coils by means of slip rings at the turbine hub. Special small, fast-running turbines with directly coupled counter-rotating direct current machines serve to generate the exciter current. Figure 6 shows the arrangement of the wind wheels. Figure 7 shows the system for generation of the exciter current. The three-phase current which is produced goes through the vanes of the other wheel to the second set of slip rings at the wheel hum. Figure 8, which presents a longitudinal section through the turbine axis, shows the arrangement for power transfer. The slip rings with the carbon brushes are safe from weather, protected, and well controlled between the wheels on the turbine axis. Each turbine hub has two bearing rings, each made up of 6 wheels of 4 steel rollers in self-aligning bearings. Between the wheel

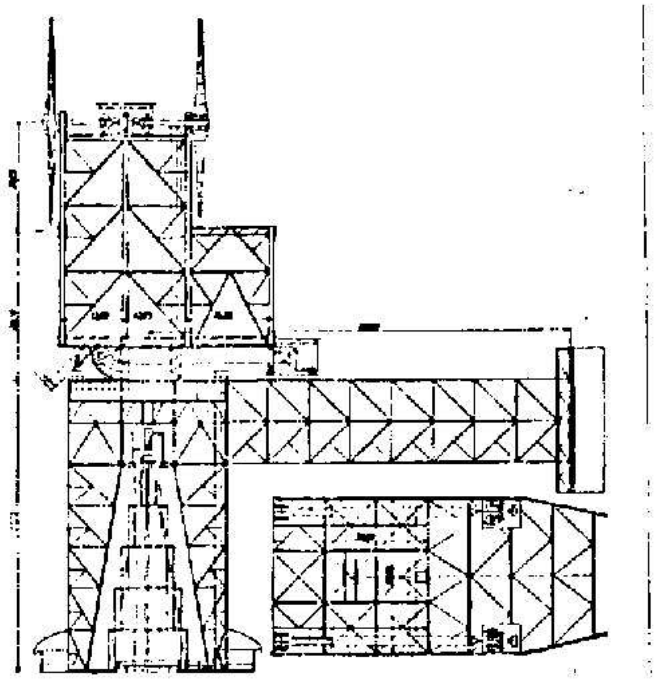


Figure 7. Turbine to generate the exciter current

rings there are tangential wheel guides which transfer the axial thrust from the turbine to the solid axis of the support frame.

With the low rotational rates, the large diameter of the ring generator leads to a multipole machine, the details of which can be seen in Figure 9. The air gap, cover guide, and ventilation can be seen in this figure. The armature coils are supported on insulators. The air flow through is left free with weather protection. The length of the armature is small, so that the cost of iron is small. Fittings which would produce turbulence are avoided. It is possible to pass through the hollow body of the rings, so that all parts are accessible. Installation or removal of individual coils is not difficult. The exciter leads, and the current takeoff, are in the hollow

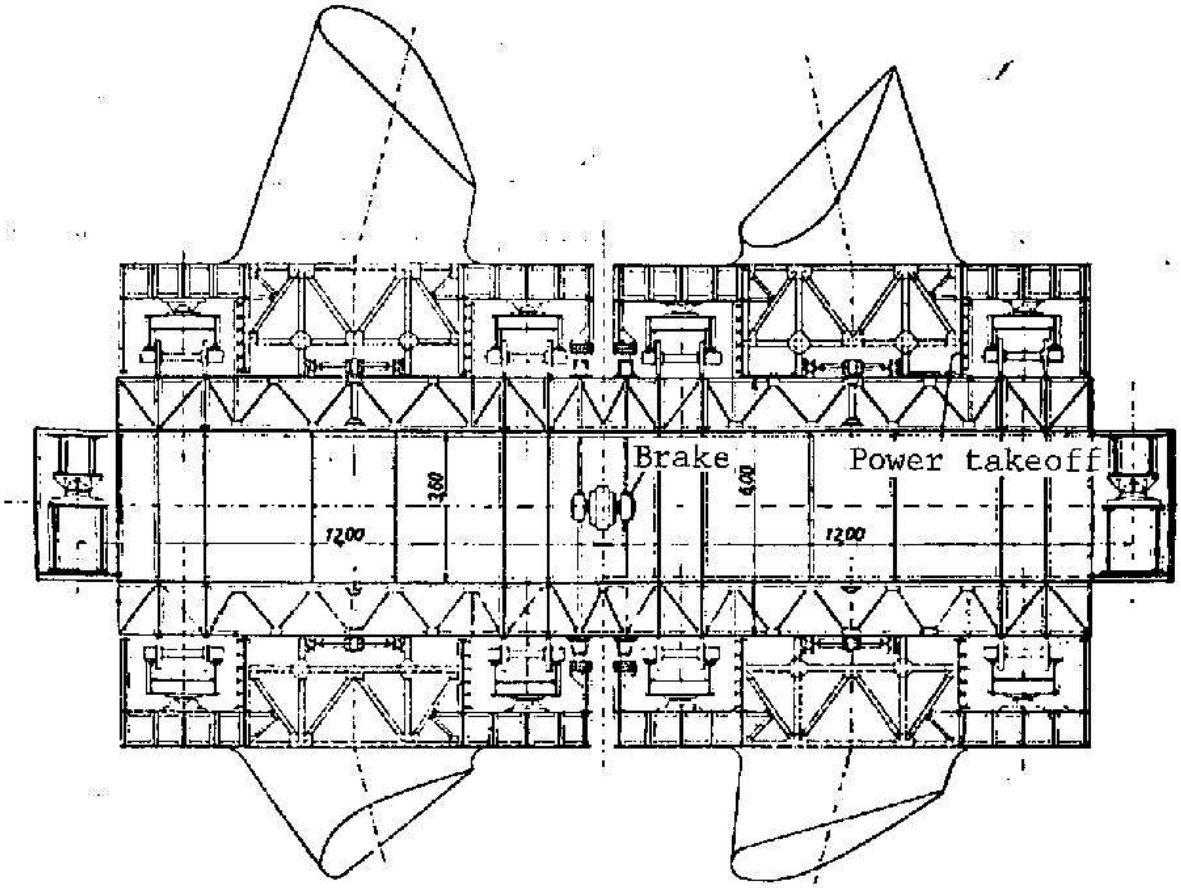


Figure 8. Longitudinal section through the turbine axis

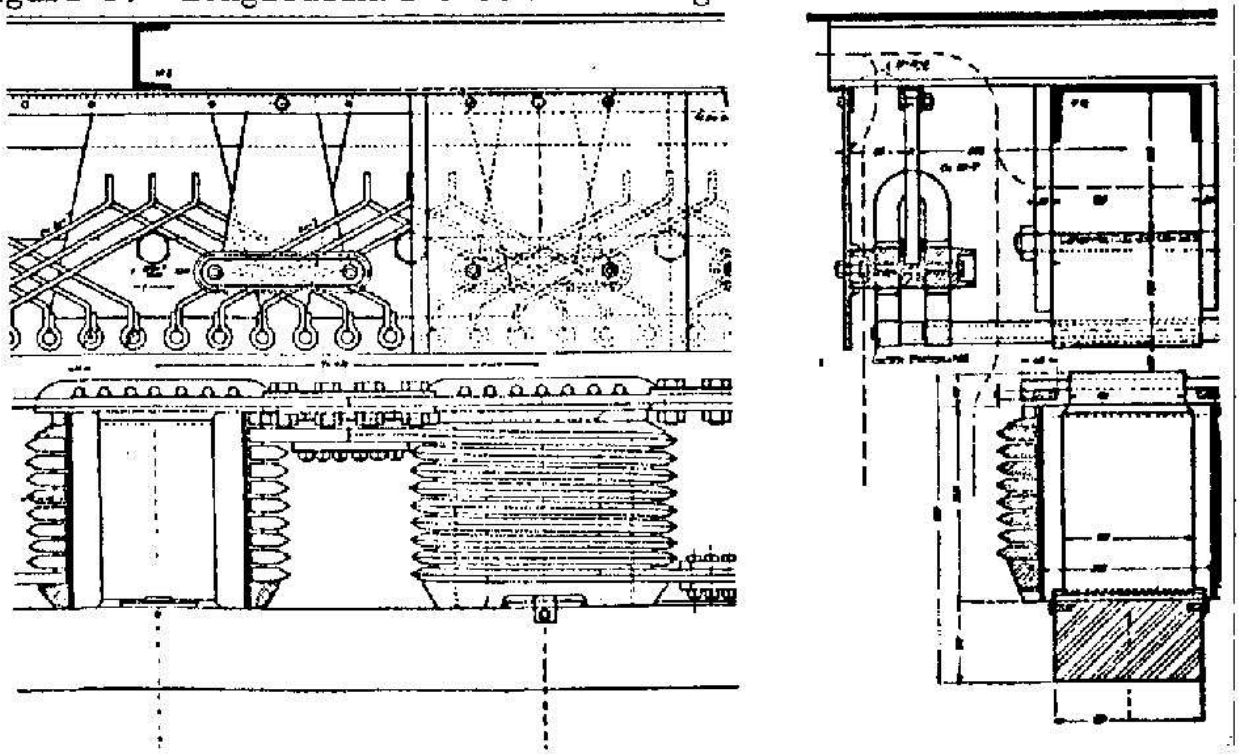


Figure 9. Details of a 20,000 kW generator field and armature winding

* Translator's note: Words in figure illegible.

structures of the vanes, which are likewise accessible. The three-phase current, generated at 5,000 to 6,000 volts, can be matched to the frequency of the consumer line in the well-known manner through control transformers and an intermediate direct current circuit. It is convenient to make the winding multi-phasic so as to obatin smaller harmonics in the rectification. Excessive rotational speeds and powers are avoided by pivoting the whole turbine sideways before strong winds. The pivoting begins at $v = 15$ m/s. The thrusts and rotational rates are regulated by the oblique position. Figure 10 shows the curve for the power generated, which still increases at constant axial thrust and increasing v. At a tilt of 36° from the vertical, further increase of power with rising v is prevented. If the wind becomes a storm, an oblique position of 35° to 40° is sufficient to avoid overloads (Figure 11). In order to eliminate

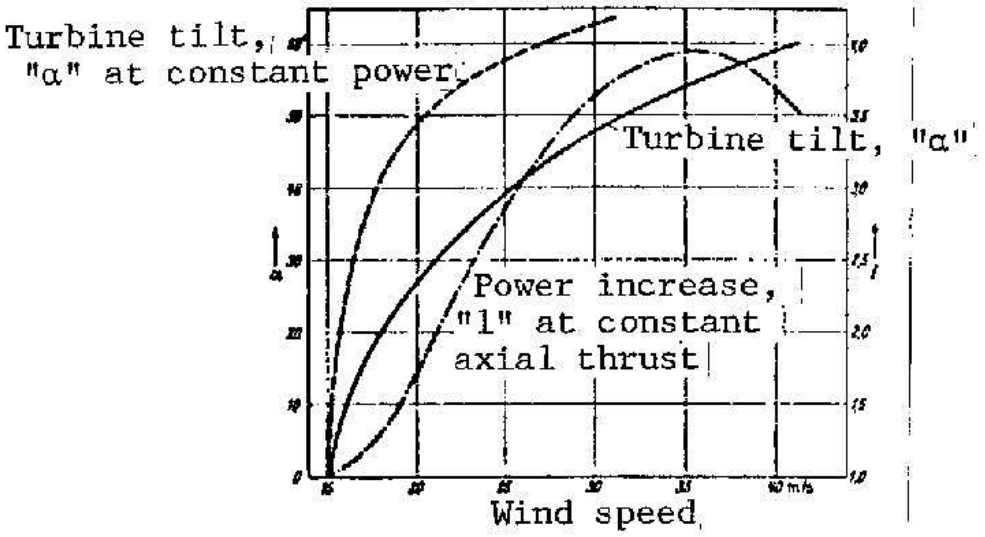


Figure 10. Increase in power with rising wind speed up to $v = 15$ m/s and the power curve with controlled constant horizontal thrust

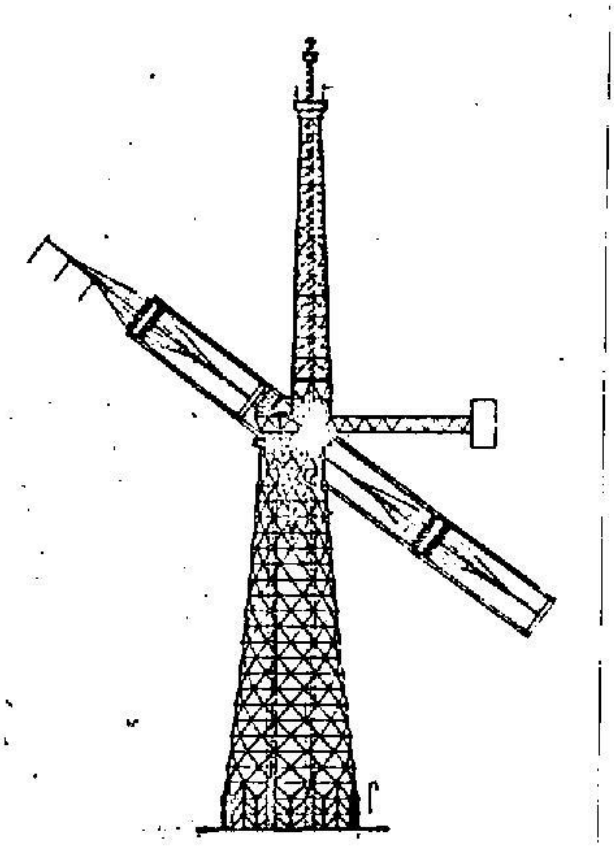


Figure 11. High wind power plant in the storm position

the power increase appearing between v = 15 m/s and v = 36 m/s, one does not maintain the turbine thrust constant, but reduces it above v = 15 m/s. The auxiliary turbines also take part in the tilting movements, so that the excitation is matched to the requirement of the three-phase generators. The behavior of the turbine wheels on sudden loss of load or short circuit was also studied. It was established that the rotational rates, which differ but little for the two wheels, will increase by at most 70%. Favorable static relations also appear for the full-scale design, which also ensures advantageous utilization of material for the generator. / 505

C. The Tower Construction

It is not well known that Germany has a free-standing steel tower which does not quite reach the height of the Eiffel tower, now 50 years old, but which can take up greater forces with considerably lighter design. Experiences in the design of this and other towers led to development of new tower designs. The new type of design is safe against torsion and offers minimum surfaces to attack by wind. In order to remove the turbines from the effect of the surface turbulence zone, the tower becomes about 300 m high. The width at the foot is then about 100 m, so that the maximum stiffness and smallest fluctuation is ensured at a slenderness of 1:3. The stability is so great that anchors would not be necessary. The natural vibration produces no resonance, even if other generators, of military type, for instance, load the tower along with the turbines.

At a height of 300 m, the structure is made up of 25 sections, each 12 m high. Each section is made of 12 or more triangles standing vertically, their points each bearing the feet of the triangles on top of them. In this way, we obtain a tapering toward the top with vertical wall sections, matching the stress on the girders to the course of the major forces. The vertical loads distribute themselves evenly over all the girders. The wind load is such that all the sections are utilized at the same time. The top of the tower has a width of 50 to 60 m, and is surrounded by a strong steel ring. A cone, which holds a rotatable structure, is suspended under the ring. The rotatable part is provided with a steering fin at the back, and at the top it has a bearing platform supporting the mounting frame with the turbines. The frame sits on strong roller bearings (Figure 6). It is convenient to use tubular steel bodies for the main load elements of the fixed part of the tower. This does not exclude the possibility of using wood for lower-power high wind power plants

(Figure 7). The mounting is designed so that the turbines can first be assembled on flat ground and connected to the support frames. Then derricks are used to lift the head with the turbines in the horizontal position. The tower is built underneath, in sections, with continuous change of support points. The cost of the derricks is balanced by the saving in construction time.

D. Storm Safety

In the Central European high altitude zone, wind speeds up to 50 m/s can occur, and up to 60 m/s in other parts of the earth. According to the well-known specifications, we apply a wind pressure of 250 kg/m^2, for which the steel structure, the foundation, and the stability are designed. The turbines should also work with their highest power in a storm, but this should be limited to the installed power for $v = 15$ m/s, and should remain constant. As previously mentioned in Section B, the turbines are set obliquely so that the oblique position is matched to the increasing wind velocity. This is to avoid an increase in the power, in the axial thrust, and in the rotational speed. Pivoting down by 35° to 40° is sufficient, and this can, therefore, be done in a short period. On pivoting down, the roller bearings move against the wind. The center of effort of all wind areas for the support frame and the turbines is somewhat below the bearing surface of the roller bearing. The center of gravity for the vertical load is somewhat behind the support point. Up to $v = 15$ m/s, the tilting moment of the wind and the righting moment of the vertical loads are balanced. At higher wind velocity, the tilting moment increases and the wind attempts to tilt the turbines with supports and roller bearings. This is controlled by tackle, which is controlled by special wind meters through relays, which guide the roller bearings reliably. In order to start the acceleration of the masses on tilting, a cylinder with a long pressure cylinder is provided. It remains in the oblique

/506

position after tilting, and prevents the masses from swinging back.

Because of the previously described measures, only two static loads come into question for the axial thrust of the turbines: thrust corresponding to full storm load on the vane surfaces at a standstill, and that during work at $v = 15$ m/s, which is held constant at larger v by oblique positioning. The highest values are entered for the pressure on frames and other structures.

In the static treatment of the turbines, we must also consider the additional forces from bending, centrifugal force, gyroscopic action, the mass effect, and the electrical field [5].

The movement of the roller bearing against the wind results in a strong unloading of the tower, linked with an increase in stability. The upper movable loads are moved forward, and act against the tilting moment of the wind pressure, as can be seen from Figure 11. The pivoting of the turbines against the wind, therefore, is a very effective measure for the safety of the wind power plant in a storm.

E. Power Cost

On the basis of the current prices for large steel structures, reinforced concrete, and electrical equipment, we can establish extensive cost calculations for high wind power plants. Depending on the power and the construction site, the costs per kilowatt of installed power are from 260 to 340 Reichsmarks. The cost, K, per kilowatt-hour generally appear from the formula

$$K = \frac{A \cdot (Z + U)}{t} + b,$$

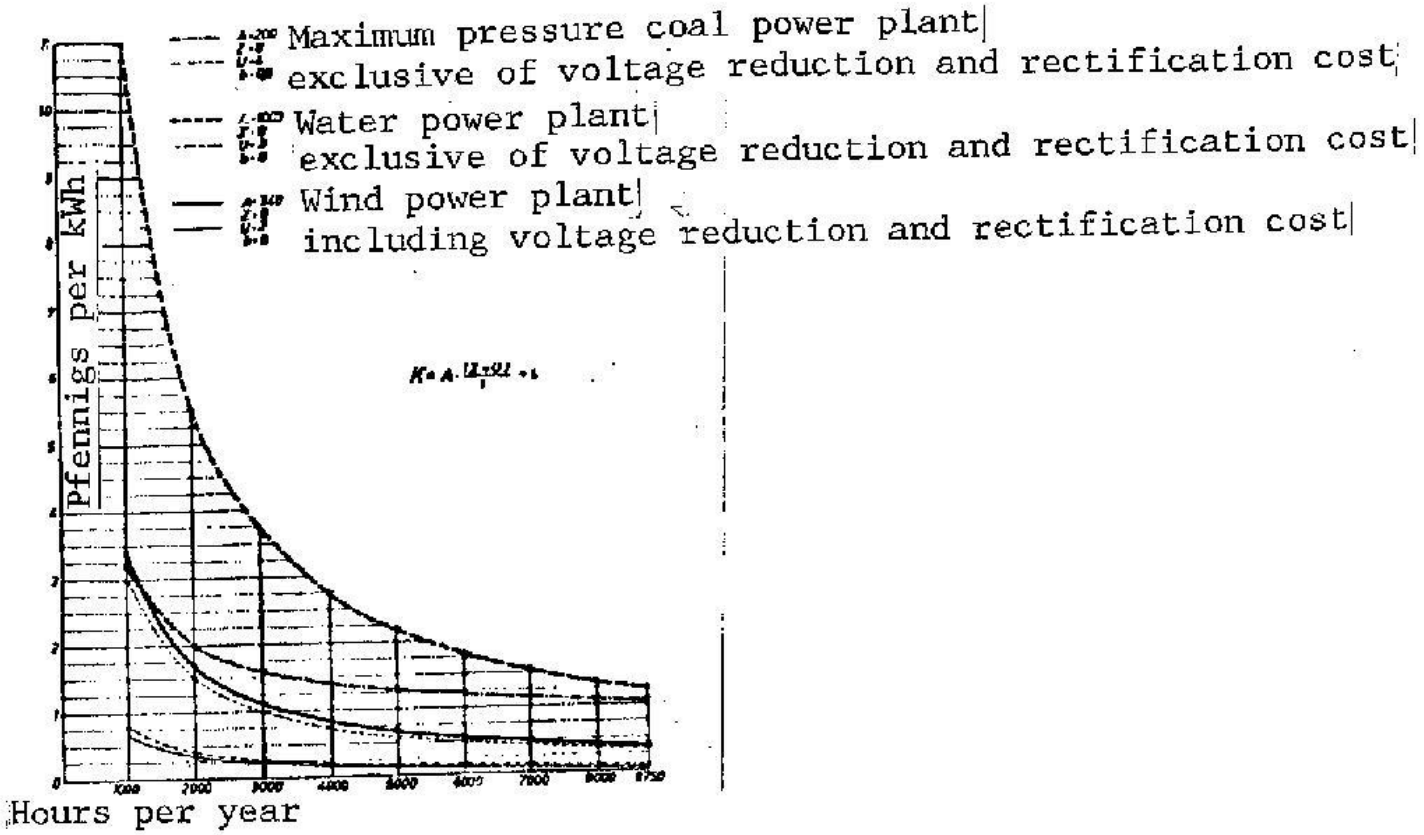


Figure 12. Comparison of power cost for the high wind power plant with other types of power plants. (The thin lines indicate the cost, U)

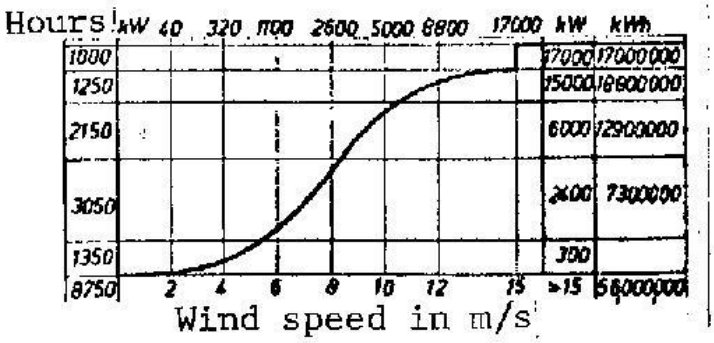


Figure 13. Annual power production for turbines with diameters of 160 m

in which:

A = cost per kilowatt of installed power

Z = interest

U = maintenance and operating cost

b = power cost

t = period of use of the installed power.

We also determine the costs, K, for coal and water power plants by way of comparison. We assume that:

Wind power plants:

A = 340 Reichsmarks/kW; Z = 8%; U = 2%; b = 0

Coal power plants:

A = 200 Reichsmarks/kW; Z = 8%; U = 4%; b = 0.8

Water power plants:

A = 1,000 Reichsmarks/kW; Z = 8%; U = 3%; b = 0.

Comparison of the power costs, according to Figure 12, shows a great superiority for the high wind power plant. With respect to water power plants, this superiority also extends to the annual power (Figure 13) and smaller system costs.

Summary

With appropriate design, high wind power plants using the high wind flows compete with thermal and water power plants.

REFERENCES

1. Assmann, Die Winde in Deutschland (The Wind in Germany), F. Vieweg, Braunschweig, 1910.

2, Hellmann, Sitzungsbericht' der Akademie det Wissenschaften (Meeting Report of the Academy of Sciences), Berlin 1914, 1917 and 1919.

3. Honnef, H. Windkraftwerke (Wind Power Plants), F. Vieweg, Braunschweig, 1932, p. 12.

4. Honnef, H. l. c., pp. 34 - 36.

5. See H. Honnef, l. c., p. 61.

Translated for National Acronautics and Space Administration under contract No. NASw 2483, by SCITRAN, P.O. Box 5456, Santa Barbara, California, 93108

Der Artikel aus der Zeitschrift Elektrotechnik und Maschinenbau

Heft 41/42, 1939

und die NASA Übersetzung

archive.org/details/nasa_techdoc_19740011596/page/n3/mode/2up

wurden übernommen in das

Virtuelle Brückenhofmuseum Königswinter

www.virtuellesbrueckenhofmuseum.de

Hermann Honnef - Ein Windkraftpionier