Prinzip eines Verbundsystems zwischen Wasserkraft und Windkraft in der Schweiz

Autor(en): **Witt, H. de**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **66 (1975)**

Heft 5

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915262

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Dies bedeutet zum Beispiel, dass die Kosten für die Druckgefässe unter 73 $/m³ Kiesbett liegen müssen, wenn die Speicherungskosten unter 1 $/m² betragen sollen.

3. Zusammenfassung

Die Verwertung des Sonnenlichtes als Wärmequelle wird durch dessen verhältnismässig geringe Energiedichte auf der Erdoberfläche erschwert. Eine optische Konzentration durch bewegliche Anordnungen von Spiegeln scheint nicht interessant, da die Kosten von mechanischen Tragstrukturen, die hohen Präzisions- und Windlastanforderungen genügen müssen, zu gross sind. Eine einfache Lösung des Problems besteht darin, den Spiegel – eventuell durch Einformung in den Boden – zu fixieren und einen viel kleineren Wärmesammler so zu steuern, dass er dem Sonnenlichteinfall entsprechend der Tageszeit folgt. Das Problem bei dieser Lösung besteht darin, dass ein parabolischer Spiegel lediglich für dasjenige Licht einen scharfen Brennpunkt hat, das entlang der parabolischen Achse einfällt, was nur einmal pro Tag der Fall ist. Unglücklicherweise fokussieren Parabolspiegel bei allen anderen Sonnenständen sehr schlecht, so dass sich nur ein kleiner Konzentrationsfaktor erreichen lässt. Bedeutsame Reduktionen in den Kosten der mechanischen Strukturen sind nur dann möglich, wenn der bewegliche Wärmesammler sehr viel kleiner als die Spiegeloberfläche ist – ein Erfordernis, das einen grossen Konzentrationsfaktor (scharfe Fokussierung) für alle Sonnenlicht-Einfallswinkel voraussetzt.

Adresse des Autors:
John Russel, jr., General Atomic Company, P.O. Box 81608, San Diego (USA).

Prinzip eines Verbundsystems zwischen Wasserkraft und Windkraft in der Schweiz

Von H. de Witt

Ausgehend von der heutigen Situation der Elektrizitätswirtschaft wird die Problematik der Windenergienutzung diskutiert. Wenn man auf die direkte Umwandlung des Windes in elektrische Energie verzichtet und die Windenergie in den vorhandenen Anlagen der Wasserkraftwerke speichert, ergeben sich interessante Möglichkeiten für ein Zusammenwirken zwischen beiden Energieformen. Für die Konstruktion des Windmotors werden mehrere Typen als Alternative zur konventionellen Ausführung vorgeschlagen. Abschliessend wird auf einige Entwicklungsaufgaben hingewiesen.

Partant de la situation actuelle de l'économie électrique, l'auteur aborde le problème de l'utilisation de l'énergie éolienne. Si l'on renonce à la transformation directe du vent en électricité, et que l'on emmagasine l'énergie éolienne dans les installations existantes des usines hydrauliques, il en résulte d'intéressantes possibilités d'action conjuguée entre ces deux formes d'énergie. Comme alternative à la réalisation classique, l'auteur propose plusieurs types de moteurs à vent. Il mentionne pour terminer quelques problèmes de développement.

1. Einleitung

Die Schweiz gehört zu den Ländern, wo die elektrische Energie weitgehend durch die vorhandenen Wasserkräfte erzeugt wird (1974 noch 75 %); allerdings ist der Ausbau der Wasserkräfte im wesentlichen abgeschlossen. Andererseits muss nach neueren Untersuchungen mit einem weiteren exponentiellen *Wachstum* des Elektrizitätsverbrauchs um jährlich rund 5 % gerechnet werden, so dass je nach den Niederschlagsmengen schon in den nächsten Jahren Defizite zu erwarten sind.

Da die Möglichkeiten des Energieimports auf längere Sicht ungewiss sind (die Elektrizitätswirtschaft des Auslandes befindet sich in einer ähnlichen Lage wie die Schweiz), müssen weitere Anlagen installiert werden. Grosse thermische Kraftwerke mit Kohle- oder Ölfeuerung würden nicht nur die Abhängigkeit vom Ausland verstärken, sondern sie laufen auch dem Umweltschutz zuwider. Nach dem heutigen Stand der Technik kommen nur Kernkraftwerke in Frage, deren Brennstoff sich auf engem Raum für eine längere Periode lagern lässt.

Die Opposition der Öffentlichkeit gegen *Kernkraftwerke* hat bereits zu einer erheblichen Verzögerung im Bau von neuen Kraftwerken geführt. Unter den zahlreichen Argumenten der Gegner muss leider die bisherige Beseitigung der radioaktiven Abfälle (vor allem mit grosser Halbwertszeit) als unbefriedigend bezeichnet werden. Die Abfuhr grosser Wärmemengen an die Atmosphäre bietet keine technischen Schwierigkeiten, wenn auch Kühltürme ein Dorn im Auge des Heimatschutzes sind.

Wärmekraftwerke, sei es mit konventioneller Feuerung oder mit Atomkernspaltung, liefern Bandenergie. Der Spitzenverbrauch, der in der Schweiz mehr als doppelt so hoch liegt, wird mit Hilfe der Saisonspeicher gedeckt. Ihre Anzahl und Kapazität lässt sich aus wirtschaftlichen Gründen kaum erhöhen, weshalb man schon vor Jahren *Pumpspeicherwerke* errichtet hat. Sie arbeiten wegen der vierfachen Energieumsetzung zwar nur mit einem Wirkungsgrad von etwa 70 %, vermögen aber jederzeit Überschussenergie aufzunehmen (vor allem nachts) und bei maximalem Bedarf wieder abzugeben. Ihr Energieumsatz erreichte 1972/73 erst rund 6 % der Gesamterzeugung. Dieser Anteil soll durch weitere Pumpspeicherwerke und Umbauten vorhandener Anlagen erhöht werden.

2. Problematik der Windenergienutzung nach dem heutigen Stand der Technik

2.1 Rangordnung der auf der Erde dauernd zur Verfügung stehenden Energien

Windmühlen bildeten im Flachland Jahrhunderte lang die einzige natürliche Energiequelle. Heute sind Windmühlen zu Touristenattraktionen geworden. Sie besitzen in den Industrieländern keine praktische Bedeutung mehr, obwohl die Erde

reichlich Windenergie anbietet. Vom physikalischen Standpunkt empfängt die Erde als *Primärenergie* die Sonnenstrahlung, die sich infolge der Temperaturunterschiede zu einem geringen Prozentsatz in kinetische Windenergie verwandelt. Aus dieser Sekundärenergie entsteht durch den Transport von Wasserdampf die potentielle Energie des Wassers, deren Grössenordnung wiederum unter der *Sekundärenergie* des Windes liegt.

2.2 Unregelmässigkeit und Speicherung von Windenergie

In der Schweiz treten Winde und Niederschläge wegen des erwähnten Zusammenhanges sehr unregelmässig auf. Zum Glück hat die Natur in Flüssen und Seen ein System von Regenwassersammlern geschaffen, das vom Menschen für die Gewinnung von Wasserkraft weiter ausgebaut wurde. Bereits im natürlichen Speichersystem ist die Unregelmässigkeit wesentlich schwächer als bei den Niederschlägen.

Abgesehen von der Energieumsetzung in Wasserturbinen besteht Wasserenergie in *potentieller* Form. Das gilt sowohl für die Stauseen als auch für die Flusskraftwerke, bei denen künstliche Gefällestufen geschaffen werden. Wollte man dieses Verstärkungsprinzip auf den Wind anwenden, so müsste man die Windgeschwindigkeit innerhalb des Windmotors erhöhen. Das ist theoretisch durchaus möglich (siehe Abschnitt 4.5), doch wird der Wind in der Rotorebene praktisch verzögert.

Wegen der grossen Unregelmässigkeit des Windes muss seine Energie unbedingt *gespeichert* werden. Das geschah bisher hauptsächlich in elektrischer Form durch *Blei-Akkumulatoren.* Diese sind bekanntlich sehr unwirtschaftlich und liessen sich für grosse Leistungen auch gar nicht beschaffen. Für die Schweiz bietet sich als Alternative die Energiespeicherung durch *Wasser* (siehe Abschnitt 3.3).

Jedoch wäre eine Umwandlung von Wind- in Wasserenergie über den konventionellen Weg der elektrischen Energie immer noch unwirtschaftlich, da das Problem der Kopplung zwischen Windmotor und Generator ungelöst bliebe. Statt dessen wird vorgeschlagen, die Windenergie in *Druckluftenergie* zu verwandeln. Die wirtschaftliche Entfernung für diesen Energietransport zum Wasserkraftwerk ist zwar begrenzt (siehe Abschnitt 3.2), doch können auf diese Weise mehrere Windkraftwerke leicht parallel geschaltet werden. Diese Möglichkeit besteht natürlich auch bei Gleichstromgeneratoren, die aber nicht für grosse Leistungen gebaut werden.

2.3 Dritte-Potenz-Gesetz und Leistungsdichte

Zur Unregelmässigkeit des Windes kommt noch die Tatsache erschwerend hinzu, dass die Leistung eines Windmotors mit der *dritten Potenz* der Windgeschwindigkeit wächst, während die Leistung eines Laufkraftwerkes etwa proportional zur abfliessenden Wassermenge ist (konstantes Gefälle vorausgesetzt). Da ein mit dem Windmotor gekoppelter Drehstromgenerator für die Speisung ins Netz auf konstante Drehzahl (und passenden Phasenwinkel) geregelt werden muss, ergibt sich eine bedeutende Einbusse an Windleistung. Der Ausnutzungsgrad einer solchen Anlage dürfte merkbar unter den bewährten Laufkraftwerken liegen, es sei denn, man nehme ein kompliziertes Windkraftwerk mit mehreren einkuppelbaren Generatoren in Kauf. Die Leistung häufiger, aber schwacher Winde lässt sich auf einem anderen, noch zu beschreibenden Wege wirtschaftlich ausnutzen.

Zur bisherigen Ablehnung der Windenergienutzung in grösserem Maßstabe hat die geringe *Leistungsdichte* (kW/m^2) des Windes beigetragen. Wie aus Projekten bekannt ist, ergeben sich hohe Bauwerke. Diese verändern zwar nicht die Atmosphäre, wie die Wasserdampf abgebenden Kühltürme von thermischen Kraftwerken, doch würden Windkraftwerke vermutlich allein wegen ihrer sichtbaren Grösse auf den Widerstand des Heimatschutzes stossen (an Hochspannungs- und Sendemasten hat man sich inzwischen gewöhnt). Andererseits hat die Technik des Leichtbaues in den letzten Jahrzehnten grosse Fortschritte gemacht. Neue aerodynamische Möglichkeiten sollen im 4. Abschnitt erwähnt werden.

3. Zusammenarbeit zwischen Wasser- und Windkraftwerken

3.1 Standort von Windmotoren

Geographisch bestehen folgende Möglichkeiten für den Standort von Windmotoren in der Nähe von Wasserkraftwerken:

a) *oben im Gebirge,* wo hohe Windgeschwindigkeiten zu erwarten sind;

b) *in grösseren Gebirgstälern,* wo regelmässige Winde mittlerer Geschwindigkeiten wehen (tagsüber talauf, nachts talabwärts);

c) *auf Staumauern,* wo sich die Windgeschwindigkeit senkrecht zur Mauer beträchtlich erhöht. Je nach Höhenlage der Staumauer kann der Windcharakter gemäss a) oder b) vorherrschen;

d) *in der Nähe von Laufkraftwerken,* wo im Gegensatz zu a) bis c) keine Speichermöglichkeit besteht.

Die Kombination von Windkraft- und Laufkraftwerk dürfte ein neuer Vorschlag sein und soll näher betrachtet werden. *Laufkraftwerke* erzeugen heute in der Schweiz ziemlich genau die Hälfte der elektrischen Energie. Ihre installierte Maschinenleistung kann aber wegen beschränktem Wasserabfluss nur selten voll ausgenutzt werden. Wenn die Energie benachbarter *Windkraftwerke* dafür eingesetzt wird, Wasser vom unteren auf das obere Niveau der Staustufe zu heben, erhöht sich entsprechend die verfügbare Turbinenleistung.

Selbst unter der unwahrscheinlichen Annahme, dass sich die Windleistung als Funktion der Zeit proportional zur Wasserleistung ändert, könnte der grösste Teil der Windleistung von den Generatoren des Wasserkraftwerkes wieder gewonnen werden. Praktisch wird jedoch die *Korrelation* zwischen Wind- und Wasserleistung schwächer sein, wodurch sich die Ausnutzung der Windenergie durch ein Laufkraftwerk gegenüber dem vorigen Falle noch verbessert.

Im Sonderfall, dass das in ein Speicherbecken zu pumpende Wasser dem Windmotor mit einem kleinen Gefälle zufliesst, kann man die Pumpe direkt mit dem Windmotor kuppeln (evtl. ohne Übersetzung, die beim Antrieb eines Luftverdichters stets erforderlich ist).

3.2 Erzeugung und Transport der vom Windmotor erzeugten Druckluft

Es wird vorgeschlagen, durch den Windmotor einen Luftverdichter anstelle eines Generators anzutreiben. Verdichter hoher Drehzahl erreichen heute vorzügliche Wirkungsgrade. Sie sind wesentlich leichter als Generatoren, was für den Einsatz an schwer zugänglichen Stellen vorteilhaft ist. Die erwähnte *Parallelschaltung* einer Gruppe von Windkraftwerken auf eine Druckluftleitung setzt keineswegs die gleiche Windgeschwindigkeit an den betreffenden Stellen voraus, sondern

nur etwa dasselbe Verhältnis zwischen gegenwärtiger und maximaler Geschwindigkeit. Diese Bedingung dürfte auch im Gebirge meistens erfüllt sein.

Für den Gesamtwirkungsgrad eines Windkraftwerkes und die Standortwahl in der Nähe eines Wasserkraftwerkes spielen Abmessungen und Energieverlust der *Druckluftleitung* zwischen beiden Kraftwerken eine grosse Rolle. Um die Grössenordnung des Energieverlustes in der Druckluftleitung kennenzulernen, wurde ein Beispiel unter folgenden Bedingungen durchgerechnet:

a) Gefälle der Wasserleitung 1000 m,
b) Überdruck der Luft 10 bar,
c) gleich hoher Energietransport (kW) durch beide Leitungen,
d) gleich hoher Energieverlust (% je km) in beiden Leitungen.

Das Ergebnis dieses Beispiels lautet: Die Druckluftleitung erfordert einen 2,5mal so grossen Durchmesser als die Wasserleitung. Jedoch wird die Druckluftleitung wegen des 10mal geringeren Überdrucks leichter als die Wasserleitung. Hiermit ist indirekt eine Antwort auf die Frage nach der *zulässigen Entfernung* zwischen Wind- und Wasserkraftwerk gegeben. Sie liegt in derselben Grössenordnung wie heute übliche Wasserleitungen zwischen Speicherbecken und Wasserturbine.

3.3 Verwendung der Druckluftenergie im Wasserkraftwerk

Die vom Windmotor erzeugte Druckluft wird im Wasserkraftwerk – gleichgültig, um welchen Typ es sich handelt – einer *Druckluftturbine* zugeführt, die einen ähnlich hohen Wirkungsgrad wie Wasserturbinen aufweist, jedoch keine Kavitationsprobleme hat. Die hierbei zurückgewonnene mechanische Energie kann im Wasserkraftwerk folgendermassen verwendet werden:

a) Antrieb eines Generators zusätzlich zum vorhandenen Antrieb durch eine Wasserturbine, was eine Einsparung von Wasser oder eine Erhöhung der elektrischen Leistung ermöglicht.

b) Antrieb einer Speicherpumpe zusätzlich zu deren elektrischem Antrieb, was eine Einsparung an elektrischer Energie oder eine Erhöhung der geförderten Wassermenge ermöglicht.

Das Arbeitsvermögen der Druckluft lässt sich durch *Erwärmung vor der Luftturbine* wesentlich vergrössern. Bei einer Annäherung isothermer Expansion wird die zugeführte Wärmeenergie mit hohem Wirkungsgrad in zusätzliche mechanische Energie verwandelt. Für den Fall einer Energiekrise könnte man die Erwärmung durch fossile Brennstoffe vorsehen (im einfachsten Falle ein Ölbrenner in der Druckluftleitung vor der Turbine). In gewissen Gegenden der Schweiz könnte man für diesen Zweck auch Sonnenwärme speichern.

Unabhängig von der Verfügbarkeit der erwähnten Wärmequellen sei auf eine andere Möglichkeit hingewiesen. Jeder Windmotor arbeitet verhältnismässig lange auf einem zu niedrigen Leistungsniveau ($N \sim V^3$), um die Arbeitsmaschine mit fester Drehzahl (Generator, Pumpe) antreiben zu können. Diese Energie geht normalerweise verloren, kann aber auf einfache Weise in Form von *Wärmeenergie gespeichert* werden. Dazu baut man in einen Heisswasserspeicher, wie er für Zentralheizungen mit elektrischer Nachtaufladung benutzt wird, eine *Wasserbremse* ein, die direkt von einer Druckluftturbine angetrieben wird (Wasserbremsen werden z. B. beim Testlauf von Verbrennungsmotoren benutzt).

In diesem Falle haben alle vier hintereinander geschalteten Aggregate etwa dieselbe *Charakteristik* (Drehmoment proportional n^2): Windmotor – Luftverdichter – Luftturbine – Wasserbremse. Sie können also gut aufeinander abgestimmt werden und arbeiten im ganzen Drehzahlbereich mit gutem *Wirkungsgrad.* Die gespeicherte Wärmeenergie dient in Perioden normaler Windmotorleistung, wie vorher erwähnt, zur Erwärmung der Druckluft vor der Turbine im Wasserkraftwerk. Auf diese Weise lässt sich die Leistung der Druckluftturbine in einem gewissen Bereich von Windgeschwindigkeiten konstant halten bzw. dem Bedarf im Wasserkraftwerk anpassen.

4. Windmotor

4.1 Konventioneller Typ

Neuere Windmotoren besitzen gewöhnlich einen *dreiflügeligen* Rotor analog der Luftschraube (z. B. Flugzeugpropeller) Da fast alle anzutreibenden Maschinen in ihrer Drehzahl übersetzt werden müssen, bemüht man sich um Windmotoren hoher Schnelläufigkeit (Verhältnis zwischen Umfangs- und Windgeschwindigkeit), die jedoch ein sehr schwaches Anfahr-Drehmoment besitzen. Bei konstanter Windgeschwindigkeit wächst die Leistung mit R^2 (R = Radius des Rotors), das Drehmoment aber mit R^3. Man müsste also für grosse Windmotoren riesige *Übersetzungsgetriebe* einbauen. Derselbe Zusammenhang begrenzt übrigens die Leistung von Flugzeug-Propellerturbinen, die zum Propeller stark untersetzt werden müssen.

4.2 Vorschlag de Witt

Der Nachteil grosser Übersetzungsgetriebe bei Windmotoren lässt sich dadurch umgehen, dass man die Windleistung nicht auf der Achse, sondern am *Umfang* des Rotors abnimmt. Das lässt sich durch ein über die Flügelspitzen gelegtes Stahlseil erreichen, wenn man die Anzahl der Flügel entsprechend erhöht. Dadurch vermindert sich die optimale Umfangsgeschwindigkeit auf einen Wert, der von der *Seilbahntechnik* beherrscht wird.

Das endlose Seil wird an einer Stelle des Rotorkreises durch Rollen umgelenkt und treibt direkt die Maschine (z. B. Wasserpumpe, Luftkompressor) mit einer viel höheren Drehzahl an als sie der Rotor des Windmotors besitzt. Für die gegenseitige Anordnung zwischen Windrad und anzutreibender Maschine gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. Die Lebensdauer des Stahlseiles entspricht einer gewissen Windarbeit (kWh), was schätzungsweise unabhängig von Windhäufigkeit und maximaler Geschwindigkeit ist.

4.3 Erzeugung von Unterdruck im Windradflügel

Falls der Windmotor unmittelbar neben dem Wasserkraftwerk aufgestellt wird, gibt es eine konstruktiv sehr einfache Methode der Energieübertragung: anstelle besonderer Luftverdichter dienen die *Windradflügel* selbst als Luftpumpe. Wegen des geringen verfügbaren Unterdrucks werden bei gleicher Leistung grössere Luftmengen als bei der bisher betrachteten Überdruckerzeugung umgesetzt. Das bedeutet grössere Rohrdurchmesser und geringere zulässige Druckverluste, was nur bei kurzer Leitung zwischen Wind- und Wasserkraftwerk zu verwirklichen ist.

Zur Begrenzung des Druckverlustes in den Flügeln des Windrades müssen diese ebenfalls einen möglichst grossen Querschnitt erhalten, wozu *Profile* mit extrem *hohem Dickenverhältnis* erforderlich sind. Wenn man auf die Symmetrie des wahrscheinlich dreiflügeligen Rotors verzichtet und nur *einen*

Flügel mit diesem dicken Profil versieht (die Zirkulationsverteilung der drei Flügel sollte jedoch gleichbleiben), lässt sich der Druckverlust in diesem Flügel in erträglichen Grenzen halten. Das Drehmoment aller drei Flügel wird durch Pumparbeit der an der Nabe eintretenden und am Ende des verdickten Flügels in Umfangsrichtung austretenden Luft aufgebraucht, so dass der Rotor nach aussen kein Drehmoment abgibt.

Dieser Windmotor hat als primitive Luftpumpe einen schlechteren *Wirkungsgrad* als konventionelle Pumpen. Im idealen Falle reibungsloser Strömung wird die grösste Nutzleistung bei gegebenem (konstantem) Flügelquerschnitt erreicht, wenn die Luft mit $\sqrt{1/3} = 0{,}577$ der Umfangsgeschwindigkeit am Flügelende austritt. Dazu gehört ein idealer Wirkungsgrad von 79 %. Mit Rücksicht auf den inneren Druckverlust wird man die Luftgeschwindigkeit im Flügel vermindern. Dies hat zwar einen höheren Unterdruck, aber verminderten Wirkungsgrad zur Folge:

Bei halber optimaler Austrittsgeschwindigkeit (0,289 der Umfangsgeschwindigkeit) noch 64 %, wobei sich die ideale Nutzleistung um ¼ gegenüber dem Maximum vermindert. Diese theoretischen Werte ändern sich natürlich noch durch Druckverluste im Flügel des Windmotors, Umlenkungen und in der kurzen Verbindungsleitung zum Wasserkraftwerk. Dort wird schätzungsweise noch die Hälfte der Windmotorleistung an der Luftturbine, die atmosphärische Luft einsaugt, für einen Generator oder eine Speicherpumpe zur Verfügung stehen. Genauere Zahlenwerte lassen sich erst durch einen Optimierungsprozess gewinnen.

Als *Kompromiss* zwischen dem als Luftpumpe arbeitenden Windmotor und der Energieübertragung durch Druckluft erscheint folgende Lösung günstig:

a) Die für das Wasserkraftwerk vorgesehene Sauglufttur-bine wird in die Nabe des Windmotors verlegt, so dass sich der Druckverlust im wesentlichen auf den verdickten Flügel beschränkt.

b) Mit dieser Sauglufttur-bine wird direkt ein Luftverdichter gekoppelt.

c) Die Druckluft dient wie bei den anderen Windmotortypen zur Energieübertragung auf die übliche Entfernung bis zum Wasserkraftwerk.

Es wird also die mechanische *Kopplung* mit starker Übersetzung zwischen Windmotor und Luftverdichter ersetzt durch eine pneumatische Kopplung, wobei sich der Gesamtwirkungsgrad etwa um den Faktor 0,7 erniedrigt. Oder anders ausgedrückt: Für die gleiche mechanische Windleistung müsste der Windmotordurchmesser um etwa 20 % erhöht werden. Das ist der Preis für die konstruktive Vereinfachung. Dieser Windmotortyp kommt vor allem für grosse Leistungen in Frage, wobei die hohe Reynoldszahl der Saugluft im Windmotorflügel einen geringen Druckverlust ermöglicht.

4.4 Rotierende Zylinder als Flügelprofile

Da die Flügel konventioneller Luftschrauben und Windrotoren vor allem aussen sehr schlanke Profile aufweisen, sei die *Aerodynamik* der vorgeschlagenen dicken Profile etwas genauer beleuchtet. Vom Standpunkt des inneren Druckverlustes wären natürlich Kreiszylinder ideal. Diese lassen sich tatsächlich verwenden, wenn man sie um ihre eigene Achse in Rotation versetzt. Quer angeströmte rotierende Zylinder geben die grössten überhaupt möglichen Auftriebsbeiwerte, was als *Magnus-Effekt* bekannt ist. Rotierende Zylinder erregten in den zwanziger Jahren das Interesse von Wissenschaftlern und Ingenieuren (Flettner-Rotor).

Im Eidgenössischen Flugzeugwerk Emmen wurden im kleinen Windkanal 1969 und 1971 unter Erweiterung des früheren Re-Bereichs um eine Zehnerpotenz umfangreiche Messungen an *rotierenden Zylindern*[1]) durchgeführt. Sie bestätigten das fast verschwindende aerodynamische Drehmoment um die Zylinderachse. Rotierende Zylinder sind als Tragflügelprofile völlig unempfindlich gegen Anstellwinkeländerungen. Sie kennen keine Ablösung, erzeugen jedoch auf ihrer Saugseite starke Unterdrücke, weshalb sie nur im niedrigen Unterschallbereich verwendbar sind.

Da rotierende Zylinder (im Gegensatz zu normalen Schaufelprofilen) auch bei starker Interferenz einwandfrei arbeiten, kann man *gegenläufige* Windräder in Betracht ziehen. Hierdurch lässt sich der beachtliche Drallverlust stark belasteter Windräder eliminieren. Ein weiterer Vorteil rotierender Zylinder als Flügelprofil besteht darin, dass man Windrichtung und Umdrehungssinn ohne Verluste umkehren darf (Einsatz in Tälern gemäss 3.1.b). In diesem Falle könnte man auf das übliche Drehgestell des Windmotors verzichten.

Vom Standpunkt der Festigkeit und Herstellung sind Flügel aus normalen dünnwandigen Rohren ideal. Ihr Nachteil besteht in der *Lagerung* und Kopplung der Eigenrotation der einzelnen Zylinder mit der Rotation des ganzen Windrades. Andererseits werden die einzelnen Flügel konventioneller Windräder zwecks Regelung der Drehzahl ebenfalls drehbar ausgeführt. Wegen des hohen Auftriebsbeiwertes rotierender Zylinder werden solche Flügel sehr schlank, was vom Standpunkt des Heimatschutzes ein Vorteil sein könnte.

4.5 Ummantelung des Rotors

Schnelläufige Windmotoren wurden bisher ebensowenig wie Luftschrauben (Flugzeugpropeller) mit einem ringförmigen Mantel versehen, weil dieser mehr Zusatzwiderstand als Nutzen bringen würde. Eine Ummantelung des Propellers hat sich jedoch bei nicht zu schnellen Schiffen wie Schleppern als *Kort-Düse* bewährt. Sie erhöht die mittlere Geschwindigkeit in der Propellerebene und nimmt selbst einen Teil des Schubes auf. Dieses Verfahren der Wasserbeschleunigung und Druckabsenkung ist natürlich durch Kavitation begrenzt.

Das Prinzip der Kort-Düse verspricht jedoch mit umgekehrtem Schub bei einem *Windmotor* grosse Vorteile: bei gleicher Leistung kleinerer Durchmesser und in Verbindung mit dem in der Rotorebene beschleunigten Wind eine wesentlich *höhere Drehzahl,* d. h. schwächere Übersetzung zum Luftverdichter. Ausserdem wird die spezifische Belastung des Rotors geringer, wodurch sich der Drallverlust vermindert. Ferner kann dem erfassten Windstrom mehr Energie als beim freien Rotor entzogen werden (Verzögerung weit hinter dem Windmotor bis auf 0).

Anstelle konventioneller *Profile* für den ringförmigen Mantel, die für eine starke Düsenwirkung eine relativ grosse Profillänge benötigen würden, wird ein schmaler Mantel mit dicken Profilen vorgeschlagen. Der für die erforderliche Zirkulationsstärke entsprechend hohe Auftriebsbeiwert c_A lässt sich nach bekannten Versuchsergebnissen durch eine *Grenzschichtabsau-*

[1]) Eidgenössisches Flugzeugwerk Emmen, Versuchs- und Forschungsanlage: Kraft- und Drehmomentmessungen an einem angeströmten rotierenden Zylinder grosser Streckung (Magnuseffekt). – Bericht FO-1009 Phase I (1970); Bericht FO-1109 Phase II (1974).

gung durch Schlitze im hinteren Profilbereich der Innenseite verwirklichen. Nach dieser Methode lässt sich ein c_A-Wert in der Grössenordnung der besten Schlitzflügelanordnungen von Flugzeugen erreichen, wobei die Absaugeleistung relativ niedrig bleibt.

Nach Abschaltung dieser Absaugung geht die Düsenwirkung des Mantels wegen Strömungsablösung auf einen Bruchteil ihres Wertes zurück, was zur Stillegung des Rotors erwünscht ist. Wegen des verminderten Durchmessers im Vergleich zu einem ebenso starken konventionellen Rotor sind auch bei Schräganströmung des stillstehenden Windmotors im Sturm keine übermässigen Kräfte zu befürchten.

Der wirtschaftliche Vorteil des hier vorgeschlagenen ummantelten Windrades besteht darin, dass es mit Übersetzungsgetriebe für den Antrieb eines Luftverdichters (Abschnitt 3.2) oder anderer Maschinen bis zu wesentlich höherer Leistung als bei konventionellen Windkraftwerken gebaut werden kann. Die Begrenzung der äusseren Abmessungen dürfte den Bestrebungen des Heimatschutzes entgegenkommen.

Es sei erwähnt, dass sich dicke Profile mit Grenzschichtabsaugung auch für den unter 4.3 skizzierten Windmotortyp anstelle der rotierenden Zylinder eignen. Jedoch muss der Unterdruck in der Nähe des Absaugschlitzes über einen getrennten Kanal von einem besonderen Gebläse erzeugt werden, da der Unterdruck des als Luftpumpe wirkenden Flügels hierfür nicht genügt.

5. Hinweis auf erforderliche Entwicklungsarbeiten

5.1 Leistung des Windmotors mit Energietransport

Unter den zahlreichen Entwicklungsarbeiten für das skizzierte Verbundsystem zwischen Wasser- und Windkraft bildet die *Aerodynamik* des Windmotors einen wichtigen Faktor. Dazu kommt die Mechanik der Übertragungsglieder, die Luftverdichter und -turbinen als Energiewandler und die zum Energietransport dienende Druckluft- bzw. Saugluftleitung bis zum Wasserkraftwerk. Die *Ähnlichkeitsparameter* dieses ganzen Systems sind für die einzelnen Varianten bezüglich der möglichen Vergrösserung und des Einflusses vom Windangebot zu analysieren. Der *Gesamtwirkungsgrad* des Windkraftwerkes bildet ein Nebenergebnis dieser Analyse. Wahrscheinlich lassen sich die Windmotortypen gewissen Leistungsbereichen zuordnen, wo sie optimal zum Einsatz gelangen.

5.2 Direktumwandlung von Druckluft- in Wasserenergie

Für die Energieumwandlung wurden bisher nur bekannte Aggregate wie Luftverdichter und -turbinen in Betracht gezogen. Hiermit lassen sich jedoch die *Anpassungsschwierigkeiten* zwischen Windmotor und anzutreibenden Maschinen (Generator, Wasserpumpe) nicht beseitigen. Diese verlangen variable Leistung bei konstanter Drehzahl n, während die optimale Drehzahl des Windmotors proportional zur Windgeschwindigkeit wächst. Die Leistung von Luftverdichter und -turbine ist etwa proportional n^3.

Wenn der Windmotor auf konstante Drehzahl geregelt wird, verschlechtert sich (abgesehen vom Auslegungspunkt) sein Wirkungsgrad, und die häufigen unterdurchschnittlichen Winde können gar nicht ausgenutzt werden. Diese Schwierigkeiten lassen sich umgehen, wenn man auf stetig arbeitende Aggregate verzichtet. Ein vom Verfasser untersuchtes Aggregat mit einem Minimum an bewegten Teilen verspricht in einem weiten Bereich von Druckverhältnissen zwischen Druckluft und zu speicherndem Wasser einen guten Wirkungsgrad. Ausserdem würde sich dieses Gerät durch seine variable Frequenz automatisch der variablen Förderleistung des Windmotors und damit gekoppelten Luftverdichters anpassen, so dass die häufigen schwachen Winde ebenso wie die seltenen stürmischen Winde ausgenutzt werden können.

Die Entwicklungsarbeit an diesem unstetigen Energiewandler, der sich grundsätzlich bis zu den höchsten *Gefällen* eignet, betrifft die Optimierung der Form (Hydrodynamik) und den Regelmechanismus für die Ventile. Dieser starre Energiewandler nähert sich der idealen Maschine ohne bewegte Teile, wie sie als Transformator elektrischer Energie verwirklicht ist.

5.3 Räumliche und zeitliche Verteilung der Windenergie

Die räumliche Verteilung von Mittelwerten der Windgeschwindigkeit (sei es über Stunden, Tage, Monate oder Jahre gemittelt) bildet kein ausreichendes Kriterium für den Standort von Windkraftwerken, weil

a) das Leistungsangebot mit der *dritten Potenz* der Windgeschwindigkeit wächst,

b) die *Luftdichte* mit der Höhe über dem Meere abnimmt und von der Temperatur abhängt,

c) die Windgeschwindigkeit *über dem Boden* nach einer Funktion zunimmt, die sich mit den örtlichen Verhältnissen ändert,

d) örtliche Windsysteme wie die Berg- und Talwinde eine begrenzte Ausdehnung besitzen, die genauer untersucht werden müsste.

In der Schweiz besteht seit Jahrzehnten ein Netz von Beobachtungsstationen, wo Windrichtung und -geschwindigkeit registriert werden. Zunächst müsste dieses Material für die speziellen Belange der Windenergienutzung *ausgewertet* werden, woraus sich ein grober Überblick des Windangebots in der Schweiz ergibt. Gleichzeitig könnte man bei zu untersuchenden Standorten von Windkraftwerken in der Nähe von Wasserkraftwerken zusätzliche Messgeräte unter Beachtung obiger Punkte aufstellen. Hierbei sollte man die Vorteile moderner Messtechnik, Statistik und Datenaufbereitung ausnutzen. Z. B. könnte man die dritte Potenz der Windgeschwindigkeit auf Magnetband speichern.

Ganz wesentlich erscheint der Anschluss neuer Messreihen (B) an vorhandene langjährige Messungen (A). Die Aufgabe besteht darin, bezüglich der Windgeschwindigkeit solche Messstellen A und B zu koppeln (sei es messtechnisch oder erst bei der Auswertung), die entweder benachbart sind, oder klimatisch und geographisch eine ähnliche Situation aufweisen. Je nach Wetterlage und Windrichtung sollte es möglich sein, zwischen den genannten Paaren von Meßstellen das Verhältnis oder eine einfache Funktion zwischen ihren Windgeschwindigkeiten zu finden. Damit könnten in kurzer Zeit für Standorte von Windkraftwerken zuverlässige statistische Daten über die zu erwartende Windenergie gewonnen werden.

Eine weitere Aufgabe besteht in der *Korrelation* der meteorologischen mit den *hydraulischen* Daten. Bei Laufkraftwerken handelt es sich um die Abflussmenge, die um eine gewisse Periode gegenüber den Niederschlägen verschoben ist. Diese Phasenverschiebung bildet einen wichtigen Faktor für die Zusammenarbeit zwischen Wasser- und Windkraftwerken, da Winde und Niederschläge durch das Wettergeschehen ursächlich verknüpft sind.

Adresse des Autors:
Dr. *H. de Witt*, Adligenswilerstrasse 64, 6045 Meggen.