

# Das Aufwindkraftwerk – Funktionsweise und aktueller Stand

Gerhard Weinrebe, Schlaich Bergermann Solar

## Zusammenfassung.

Das Aufwindkraftwerk ist ein solares Großkraftwerk für die sonnenreichen Gegenden der Erde. Aufwindkraftwerke erzeugen Strom aus der Sonnenstrahlung: Durch die Sonne wird Luft unter einem großen transparenten Kollektordach erwärmt. Auf Grund des dabei entstehenden Dichteunterschiedes strömt die Luft in einer Kaminröhre in der Mitte des Kollektordachs nach oben. Durch die Luftströmung werden am Fuß der Röhre eingebaute Turbinen angetrieben, welche elektrische Energie bereitstellen.

Eine erste Prototypanlage mit einer Turmhöhe von rund 200 m und einer Kollektorfläche von 44'000 m<sup>2</sup> wurde zu Beginn der 1980er Jahre im Auftrag des deutschen Bundesforschungsministeriums in Manzanares in Spanien errichtet und über mehrere Jahre im Dauerbetrieb betrieben. Ziel des Forschungsvorhabens war es, die thermodynamischen Zusammenhänge detailliert zu erarbeiten, um damit über eine qualifizierte Grundlage für die Planung großer Anlagen zu verfügen. Nun wird intensiv an der Planung und Realisierung eines ersten großen Aufwindkraftwerks im Multi-Megawatt-Maßstab gearbeitet.

Im Beitrag wird das Funktionsprinzip des Aufwindkraftwerks erläutert, vom Bau und Betrieb des Prototyps berichtet und auf Konstruktionsprinzipien, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit großer Anlagen eingegangen.

## Einleitung

Unsere heutige Energieerzeugung unter Nutzung fossiler Energieträger ist umweltschädlich und erschöpflich.

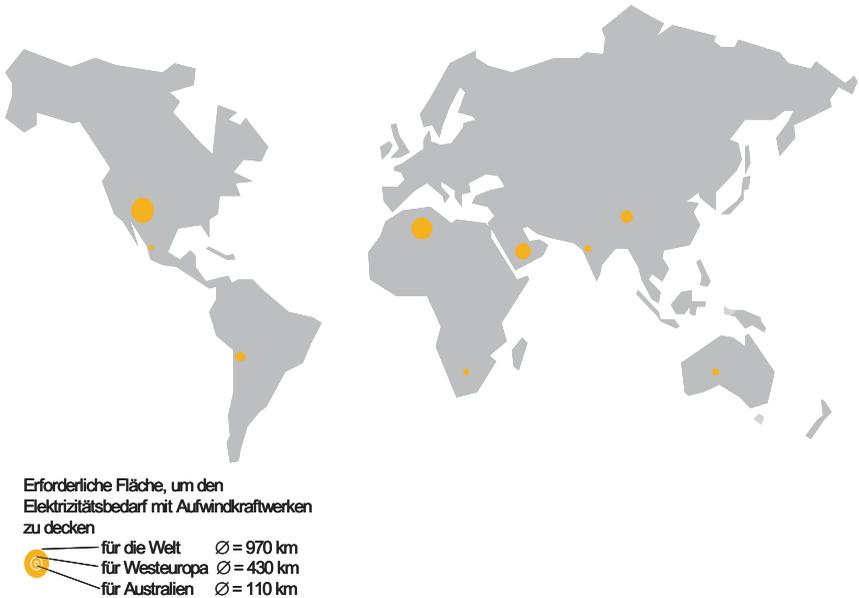
Armut, Bevölkerungsexplosion und Migration sind nicht zuletzt die Folgen unzureichender Energieversorgung bzw. zu hoher Energiekosten. Die Nachfrage nach elektrischer Energie wird insbesondere in den Schwellen- und Entwicklungsländern weiter stark ansteigen.

Eine unerschöpfliche, saubere und sichere Energiequelle ist erforderlich. Die großtechnische Sonnenenergienutzung kann dazu einen entscheidenden Beitrag leisten:

- Nachhaltige Ressourcenschonung statt Umweltzerstörung.
- Hebung des Lebensstandards durch eine unerschöpfliche Energiequelle als Maßnahme gegen die Bevölkerungsexplosion und menschenunwürdige Armut in den Ländern der Dritten Welt.
- Neue Arbeitsplätze durch Bau und Betrieb der Solarkraftwerke in globaler Partnerschaft gegen sozial bedingte Konflikte, kurz: die Umsetzung der Agenda 21.

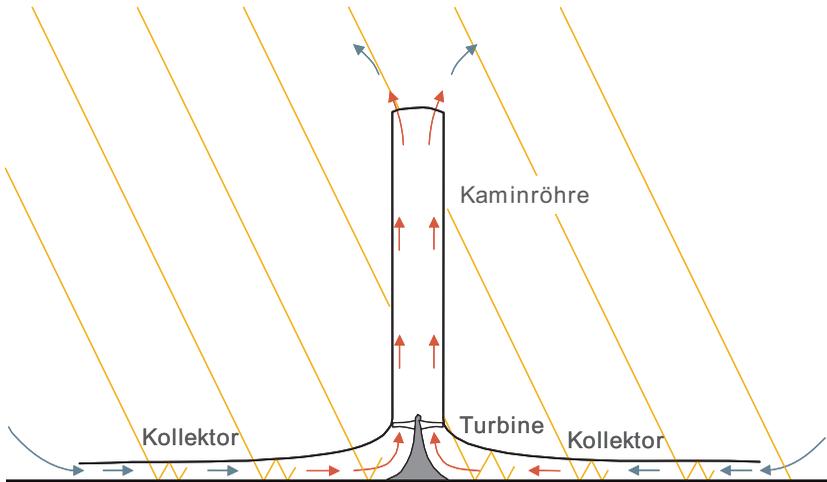
- Eine sinnvolle Technologie zur Sonnenenergienutzung sollte
- einfach und zuverlässig sein,
- ohne Kühlwasser auskommen,
- selbst aus unerschöpflichen Rohstoffen umweltneutral und
- mit den Mitteln der sonnenreichen und meist zugleich rohstoffarmen und technologisch weniger entwickelten Ländern herstellbar sein.

Das Aufwindkraftwerk erfüllt diese Bedingungen. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und die bisher gesammelten Erfahrungen zeigen, dass große Aufwindkraftwerke im Stande sind, elektrische Energie zu Kosten vergleichbar denen einer konventionellen Elektrizitätsbereitstellung zu liefern. Auch die erforderlichen Flächen für die solare Stromerzeugung, ob mit solarthermischen oder photovoltaischen Anlagen, stehen grundsätzlich zur Verfügung (Abbildung 1). Das ist Grund genug, diese Form der Solarenergienutzung mit dem Ziel großer wirtschaftlich darstellbarer Anlagen weiterzuentwickeln. In einer zukünftigen Energiewirtschaft könnten Aufwindkraftwerke daher eine wirtschaftliche und umweltverträgliche Strombereitstellung im Sonnengürtel der Erde gewährleisten (Schlaich, Bergemann, Schiel, et al. 2004).



**Abbildung 1:** Flächenbedarf, um den gesamten Elektrizitätsbedarf der Erde mit Aufwindkraftwerken in den jeweils benachbarten Wüsten mit hohem Solarstrahlungsangebot zu decken.

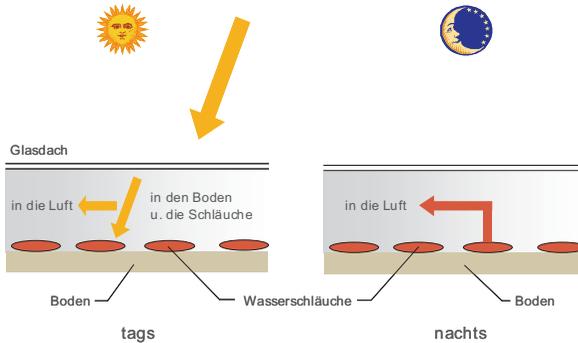
Bei einem solarthermischen Aufwindkraftwerk werden die drei von alters her bekannten Bauteile Luft-Solarkollektor (Treibhaus), Kamin und Turbine in neuartiger Weise kombiniert. Diese Kombination zur Stromerzeugung wurde von (Günther 1931) bereits vor über 70 Jahren beschrieben.



**Abbildung 2:** Funktionsprinzip des Aufwindkraftwerks

Das Prinzip ist in Abbildung 2 dargestellt. Unter einem flachen kreisförmigen, am Umfang offenen Glasdach, das zusammen mit dem darunter liegenden natürlichen Boden einen Warmluftkollektor bildet, wird Luft durch die Sonnenstrahlung erwärmt. In der Mitte des Dachs steht senkrecht eine Kaminröhre mit großen Zuluftöffnungen am Fuß. Das Dach ist luftdicht an den Kaminfoß angeschlossen. Da warme Luft eine geringere Dichte als kalte Luft hat, steigt sie im Kamin auf. Durch den Kaminsog wird gleichzeitig warme Luft aus dem Kollektor nachgesaugt und von außen strömt kalte Luft zu. So bewirkt die Sonnenstrahlung einen kontinuierlichen Aufwind im Kamin. Die in der Luftströmung enthaltene Energie wird mit Hilfe druckgestufter Turbinen, die am Fuß des Kamins stehen, in mechanische und über Generatoren in elektrische Energie umgewandelt.

Kontinuierlicher 24-Stunden-Betrieb kann durch auf dem Boden ausgelegte wassergefüllte Schläuche oder Säcke erreicht werden. Das Wasser erwärmt sich während des Tages und gibt die Wärme nachts wieder ab (Abbildung 3, (Kreetz 1997)). Die Schläuche müssen nur einmal gefüllt werden, es besteht kein weiterer Wasserbedarf. So erzeugt die Solarstrahlung einen kontinuierlichen Aufwind im Turm (Schlach, Bergemann, Schiel, et al. 2004).



**Abbildung 3:** Wärmespeicherung mit wassergefüllten Schläuchen.

### Physikalisches Modell

Zur präzisen Beschreibung der zeitabhängigen Elektrizitätsbereitstellung eines Aufwindkraftwerks mit gegebenen Dimensionen ist ein umfangreiches thermodynamisches und fluiddynamisches Simulationsprogramm erforderlich (dos Santos Bernardes et al. 2003). Eine einfache Darstellung der Thermodynamik des Aufwindkraftwerks als Kreisprozess zeigt Abbildung 4. Dabei ist

- 1 - 2: die polytrope Kompression in der Atmosphäre,
- 1' - 2': die trockenadiabate Kompression in der Atmosphäre,
- 2 - 3: eine isobare Erwärmung der Luft im Kollektor,
- 3 - 3': die adiabate Expansion in der Turbine, und
- 3 - 4 das isentrope Heben der Luft im Kamin, sowie schließlich
- 4 - 1: die isobare Abkühlung der Luft nach dem Kaminaustritt auf Umgebungstemperatur in Turmhöhe.

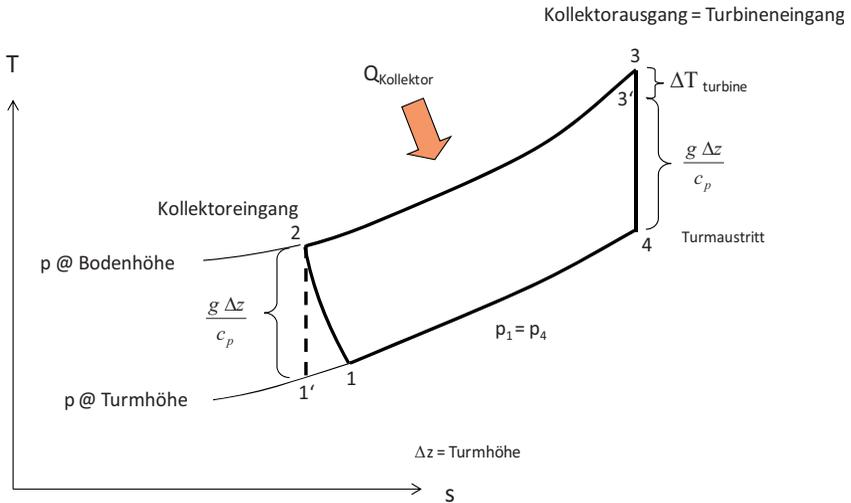
Eine ausführlichere Beschreibung inkl. der Darstellung von verlustbehafteten Prozessen ist bei (Gannon & von Backström 2000) zu finden.

Im Folgenden werden die grundlegenden Zusammenhänge in vereinfachter Form dargestellt:

Allgemein gesprochen kann die Ausgangsleistung  $P$  eines Aufwindkraftwerks berechnet werden als die zugeführte Solarenergie  $\dot{Q}_{solar}$  multipliziert mit den jeweiligen Wirkungsgraden von Kollektor, Kamin und Turbine(n):

$$P = \dot{Q}_{solar} \cdot \eta_{Kraftwerk} = \dot{Q}_{solar} \cdot \eta_{Koll} \cdot \eta_{Ka\ min} \cdot \eta_{Turbine} \quad (1)$$

Die dem System zugeführte Solarenergie  $\dot{Q}_{solar}$  kann als Produkt aus der Globalstrahlung  $G_h$  auf eine horizontale Fläche und der Kollektorfläche  $A_{Kollektor}$  geschrieben werden.



**Abbildung 4:** Idealisierter Aufwindkraftwerksprozess im T-s-Diagramm

$$\dot{Q}_{\text{solar}} = G_h \cdot A_{\text{Kollektor}}$$

(2)

Der Turm (Kamin) wandelt den vom Kollektor gelieferten Wärmestrom in kinetische Energie (Konvektionsströmung) und potenzielle Energie um (Druckabfall an der Turbine). So wirkt die Dichtedifferenz der Luft als treibende Kraft. Die leichtere Luftsäule im Turm ist mit der umgebenden Atmosphäre am Turmfuß (Kollektorausgang) und an der Turmspitze verbunden, und erfährt daher einen Auftrieb. Eine Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{tot}}$  zwischen dem Turmfuß und der Umgebung stellt sich ein:

$$\Delta p_{\text{ges}} = g \cdot \int_0^{H_t} (\rho_a - \rho_t) \cdot dH \quad (3)$$

mit  $g$ : Erdbeschleunigung  
 $H_t$ : Turmhöhe  
 $\rho_a$ : Luftdichte der Außenluft  
 $\rho_t$ : Luftdichte im Turm

So nimmt  $\Delta p_{\text{tot}}$  proportional zur Turmhöhe zu.

Die Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{tot}}$  kann in eine statische Komponente  $\Delta p_s$  und eine dynamische Komponente  $\Delta p_d$  aufgeteilt werden; Reibungsdruckverluste sind hier vernachlässigt:

$$\Delta p_{\text{tot}} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (4)$$

Die statische Druckdifferenz fällt an der Turbine ab, die dynamische Komponente beschreibt die kinetische Energie der Strömung.

Mit der Gesamtdruckdifferenz und dem Volumenstrom der Luft ist nun Leistung der Strömung zu beschreiben:

$$P_{ges} = \Delta p_{ges} \cdot v_{Turm} \cdot A_{Turm} \quad (5)$$

woraus schließlich der Wirkungsgrad des Turmes gebildet werden kann:

$$\eta_{Turm} = \frac{P_{ges}}{\dot{Q}} \quad (6)$$

Die tatsächlich erfolgende Aufteilung in eine statische und eine dynamische Komponente hängt davon ab, wie viel Energie die Turbine der Strömung entzieht. Ohne Turbine stellt sich eine maximale Strömungsgeschwindigkeit  $v_{Turm,max}$  ein und die gesamte Druckdifferenz wird in kinetische Energie umgesetzt, d. h. die Strömung beschleunigt.

$$P_{ges} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v_{Turm,max}^2 \quad (7)$$

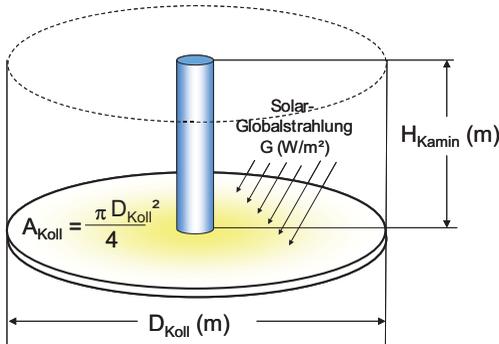
Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Temperaturprofile im Turm und in der Umgebung parallel verlaufen, kann die Strömungsgeschwindigkeit, die sich bei freier Konvektion einstellt, mit der (temperatur-)modifizierten Torricelli-Gleichung ausgedrückt werden:

$$v_{Turm,max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{Turm} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (8)$$

mit  $\dot{m}$ : Luftmassenstrom.

$T_0$ : Umgebungstemperatur in Bodenhöhe

$\Delta T$ : Temperaturanstieg von der Umgebungstemperatur zur Temperatur am Kollektoraustritt (=Turmeintritt)



**Abbildung 5:** Die Ausgangsleistung des Aufwindkraftwerks ist proportional zur Kollektorfläche und zur Turmhöhe.

Mit Gleichung (6) und der Beziehung  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$  für den stationären Zustand, sowie (7) und (8), ergibt sich der Turmwirkungsgrad:

$$\eta_{\text{Turm}} = \frac{g \cdot H}{c_p \cdot T_0} \quad (9)$$

Diese vereinfachte Darstellung verdeutlicht eine der grundlegenden Eigenschaften des Aufwindkraftwerks, nämlich dass der Turmwirkungsgrad nur von der Turmhöhe abhängt.

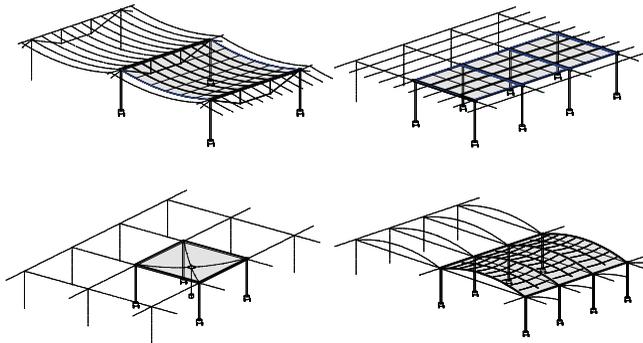
Die Gleichungen (2) und (9) zeigen, dass die Ausgangsleistung des Aufwindkraftwerks proportional zur Kollektorfläche und zur Turmhöhe ist, d. h. proportional zum Volumen des in Abbildung 5 dargestellten Zylinders.

Da die elektrische Ausgangsleistung des Aufwindkraftwerks proportional zum Volumen des von der Turmhöhe und der Kollektorfläche aufgespannten Zylinders ist, kann eine bestimmte Leistung entweder mit einem hohen Turm in Kombination mit einem kleineren Kollektor oder mit einem großen Kollektor und kleinerem Turm erzielt werden.

### Systemkomponenten

Nach diesem ersten Überblick wird nun näher auf die einzelnen Komponenten eines Aufwindkraftwerks eingegangen.

**Kollektor.** Warmluft für das Aufwindkraftwerk wird durch den Treibhauseffekt in einem einfachen Luftkollektor erzeugt. Dieser besteht aus einem horizontalen transparenten Glas- oder Kunststoffdach in etwa zwei bis sechs Meter Höhe über dem Boden (Abbildung 6).



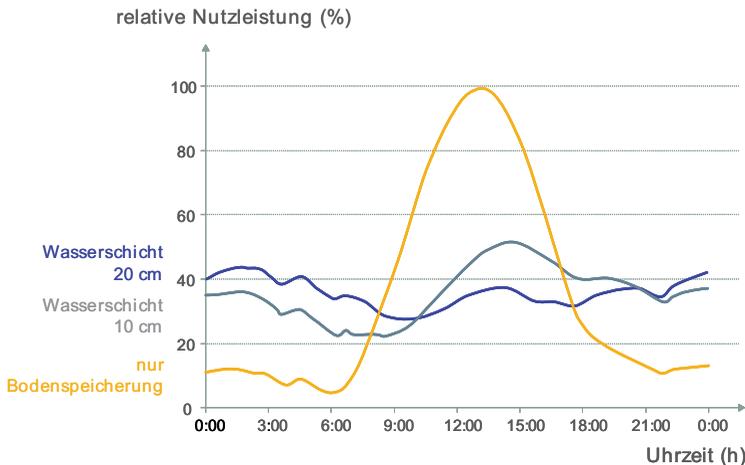
**Abbildung 6:** Kollektorvarianten für ein Aufwindkraftwerk

Die Höhe des Luftkollektors nimmt zum Turm hin zu, so dass einerseits die Strömungsgeschwindigkeit nicht zu sehr ansteigt, um die Reibungsverluste niedrig zu halten, und andererseits die Luft bei minimalen Verlusten in die Vertikale umgelenkt wird. Das transparente Dach ist durchlässig für die Solarstrahlung, aber undurchlässig für die vom durch die Sonne aufgeheizten Kollektorboden emittierte langwellige Wärmestrahlung. Dadurch erwärmt sich der Boden unter dem Dach stark und gibt diese Wärme an die radial von außen zum Turm strömende Luft ab.

**Speicher.** Wenn eine weniger ausgeprägte Leistungsspitze um die frühe Nachmittagszeit und eine höhere Stromerzeugung am Abend und in der Nacht gewünscht wird, können wassergefüllte Wasserschläuche oder -kissen auf dem Kollektorboden ausgelegt werden, um damit das Wärmespeichervermögen deutlich zu vergrößern (Kreetz 1997).

Die Schläuche werden einmalig zu Beginn mit Wasser gefüllt und bleiben dann verschlossen, so dass kein Wasser verdunsten kann. Die Menge des Wassers in den Schläuchen wird so gewählt, dass sie einer mittleren Wassertiefe von 5 cm bis 20 cm entspricht, je nach gewünschter Leistungscharakteristik (Abbildung 7).

Da bereits bei sehr geringen Wasserströmungsgeschwindigkeiten infolge natürlicher Konvektion der Wärmeübergang zwischen den Schläuchen und dem Wasser wesentlich höher ist als zwischen der strahlungsabsorbierenden Erdboden-Oberfläche und den darunter liegenden Bodenschichten, und da die Wärmekapazität von Wasser rund fünf Mal höher ist als die von Erdboden, speichert das Wasser in den Schläuchen einen Teil der Sonnenwärme und gibt sie erst nachts wieder ab, wenn die Lufttemperaturen im Kollektor niedriger sind. Dadurch ist es möglich, dass die Anlage rund um die Uhr – allein von der Sonne getrieben – arbeitet.



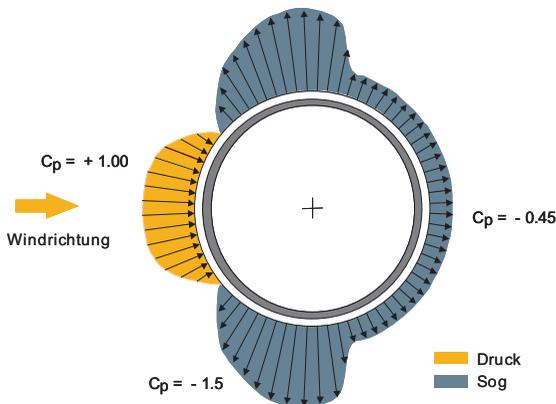
**Abbildung 7:** Auswirkung von wärmespeichernden Wasserschläuchen unter dem Kollektordach auf den zeitlichen Verlauf der Strombereitstellung (Simulationsergebnisse).

**Turmröhre.** Der Kamin ist die eigentliche Wärmekraftmaschine des Aufwindkraftwerks. Der Auftrieb der im Kollektor erwärmten Luft ist in erster Näherung proportional zur im Kollektor erzielten Temperaturerhöhung  $\Delta T$  der Luft und der Höhe des Kamins. In einem großen Aufwindkraftwerk erhöht der Kollektor die Temperatur der Außenluft um typischerweise  $\Delta T = 35\text{K}$ . Dadurch entsteht im Kamin eine Aufwindgeschwindigkeit von etwa  $v = 15\text{ m/s}$ .

Türme mit einer Höhe von 1.000 m stellen eine Herausforderung dar, sie können aber heute gebaut werden. Der 1975 fertiggestellte CN Tower in Toronto hat eine Höhe von mehr als 550m, das Hochhaus Burj Dubai ist über 800m hoch. Für ein Aufwindkraftwerk ist lediglich ein einfacher Hohlzylinder erforderlich. Er ist nicht sonderlich schlank, und die Anforderungen sind gegenüber bewohnten Gebäuden deutlich reduziert.

Es gibt verschiedene Techniken, um einen solchen Turm zu bauen: freistehende Stahlbetonröhren, abgespannte Stahlblechröhren oder Kabelnetzbauweisen mit einer Verkleidung aus Blechen oder Membranen. Die Berechnungsverfahren hierfür sind alle bekannt und wurden bereits für Kühltürme verwendet. Es sind also keine Neuentwicklungen erforderlich. Die Untersuchung der unterschiedlichen möglichen Turmbauweisen ergab, dass für praktisch alle in Frage kommenden Standorte die Stahlbetonröhre die langlebigste und kostengünstigste Lösung darstellt.

Technologisch gesehen handelt es sich bei den Kaminen der Aufwindkraftwerke um sehr große Naturzugkühltürme. Die Wandstärke nimmt bei einem 1.000 m Turm von gut 1 m am Fuß auf 0,3 m bei halber Höhe ab und bleibt dann konstant. Derartige dünne Röhren verformen sich unter Windlast zu einem ovalen Querschnitt („ovalisieren“), insbesondere durch die in Abbildung 8 dargestellten Sogflanken (Schlaich, Bergemann & Weinrebe 2004). Dadurch werden die Meridianspannungen sehr hoch. Der resultierende Verlust an Steifigkeit durch Rissbildung im Beton und die Beulgefahr begrenzen die Höhe von Naturzugkühltürmen auf rund 200 m.



**Abbildung 8:** Typische Druck-Sogverteilung bei der Umströmung eines Kreiszyllinders.

Glücklicherweise kann dem Ovalisieren sehr effektiv durch Litzenbündeln in der Form von „liegenden“ Speicherräder entgegengewirkt werden, die sich über den Turmquerschnitt spannen (Schlaich, Bergemann, Schiel, et al. 2004). Diese haben dieselbe aussteifende Wirkung wie Schotte, allerdings bremsen sie den Aufwind nur minimal.

**Turbinen.** Mit Turbinen kann der Luftströmung mechanische Energie entzogen werden. Die Turbinen eines Aufwindkraftwerks arbeiten nicht geschwindigkeitsgestuft wie ein freilaufender Windenergiekonverter, sondern als ummantelter druckgestufter Windturbogeneratorsatz, bei dem, ähnlich wie bei einem Wasserkraftwerk, der statische Druck abgebaut wird. Die erzielbaren Wirkungsgrade sind höher als bei freifahrenden Windturbinen.

Die Luftgeschwindigkeit vor und hinter der Turbine ist etwa gleich. Die entzogene Leistung ist proportional zum Produkt aus dem Volumenstrom und dem Druckabfall an der Turbine. Im Hinblick auf eine maximale Energieausbeute ist es Ziel der Turbinenregelung, dieses Produkt in allen Betriebszuständen zu maximieren.

Über die Blattverstellung regelt die Turbine den Druckabfall und damit die Luftgeschwindigkeit und den Luftstrom in der Anlage. Stehen die Blätter senkrecht zur Anströmung, dreht sich die Turbine nicht. Stehen die Blätter parallel zur Strömung und lassen den Luftstrom ungestört durch, ist der Druckabfall an der Turbine Null und es wird auch keine elektrische Leistung erzeugt. Zwischen diesen beiden Stellungen gibt es eine optimale Blattstellung.

Im Bereich der mechanischen Auslegung kann in weiten Teilen auf Erfahrungen aus dem Bereich der Wasserkraftwerke und Windkraftanlagen, Kühlturmschnecke, Windkanalaxialventilatoren und des Betriebs der Anlage in Manzanares zurückgegriffen werden. Wenn auch zunächst eine einzelne Vertikalachsentrurbine in der Turmröhre als die naheliegende Lösung erscheint, gehen doch die aktuellen Kostenabschätzungen von einer größeren Anzahl von Horizontalachsentrurbinen aus, die am Übergang zwischen Kollektor und Turm konzentrisch um den Turm angeordnet sind. Dadurch können Turbinen üblicher Abmessungen verwendet werden.

## **Anlagenkonzepte**

Für Forschungszwecke wurden bisher mehrere einige wenige Meter große Aufwindkraftmodelle gebaut, u.a. in USA, Südafrika, im Iran und in China, allerdings produzierte nur eine Anlage in Spanien in den 1980er Jahren über mehrere Jahre Elektrizität:

**Prototyp bei Manzanares, Spanien.** Nach detaillierten theoretischen Voruntersuchungen und umfangreichen Experimenten im Windkanal wurde in den Jahren 1981/82 mit Mitteln des deutschen Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) in Manzanares (ca. 150 km südlich von Madrid) auf einem von dem spanischen Energieversorgungsunternehmen Union Electrica Fenosa zur Verfügung gestellten Gelände eine Experimentieranlage mit 50 kW Spitzenleistung errichtet (Haaf et al. 1983; Haaf 1984; Schlaich 1996).

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die inzwischen erarbeiteten theoretischen Ansätze messtechnisch zu verifizieren und den Einfluss einzelner Komponenten auf Leistung und Wirkungsgrad des Kraftwerks unter realistischen bautechnischen und meteorologischen Bedingungen zu untersuchen. Hierzu wurde ein Kamin mit 195 m Höhe und 10 m Durchmesser gebaut, umgeben von einem Kollektor mit 240 m Durchmesser. Die Anlage war mit einer umfangreichen Messdatenerfassung ausgerüstet. Über 180 Sensoren registrierten im Sekundenrhythmus das gesamte Anlagenverhalten. Die Hauptabmessungen und technischen Daten der Anlage sind in Tabelle 1 aufgeführt.

*Tabelle 1: Hauptabmessungen und technische Daten des Prototyps in Manzanares.*

Turmhöhe:	194,6 m
Turmradius:	5,08 m
mittlerer Kollektorradius:	122,0 m
mittlere Dachhöhe:	1,85 m
Anzahl Turbinenblätter:	4
Turbinenblattprofil:	FX W-151-A
Schnelllaufzahl:	10
Betriebsarten:	Inselbetrieb oder Netzbetrieb
typischer Temperaturanstieg im Kollektor:	$\Delta T = 20 \text{ K}$
Nennleistung:	50 kW
Kunststoffmembran-Kollektor-Fläche:	40'000 m <sup>2</sup>
Glasdach-Kollektor-Fläche:	6'000 m <sup>2</sup>

Der Prototyp in Manzanares war für eine Versuchsdauer von etwa 3 Jahren ausgelegt und sollte danach wieder beseitigt werden. Deshalb wurde sein Kamin als abgespannte Trapezblechröhre konzipiert, die nach Beendigung des Experiments wiederverwertbar sein sollte. Die Blechstärke betrug nur 1,25 mm. Die Röhre lagerte 10 m über Grund auf einem Ring, der so von acht dünnen Rohrstützen unterstützt war, dass die warme Luft am Kaminfuß fast ungestört einströmen konnte. Als strömungsgünstig geformter Übergang zwischen dem Vordach und dem Kamin diente ein vorgespannter Membranmantel aus kunststoffbeschichtetem Gewebe.

Der Kamin war in der Höhe vierfach und in drei Richtungen mit preisgünstigen dünnen Stahlstangen zu Fundamenten hin abgespannt. Die für solche Bauweisen sonst üblichen Abspannseile oder gar eine frei stehende Betonröhre waren in dem vorgegebenen Kostenrahmen nicht unterzubringen.

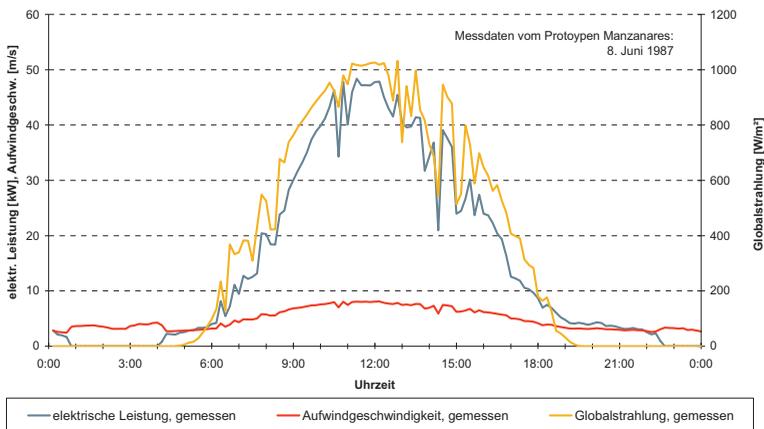
Natürlich kommt für ein großes, auf lange Lebensdauer ausgelegtes Aufwindkraftwerk diese bewusst temporäre Bauweise nicht in Frage. Unter realistischen Bedingungen wird der Kamin in aller Regel aus Stahlbeton hergestellt werden.

Das Kollektordach eines Aufwindkraftwerks muss nicht nur transparent sein, es muss auch langlebig und dabei kostengünstig sein. Verschiedene Kunststofffolien und Glas wurden für den Kollektor ausgewählt, um experimentell zu ermitteln, welches Material am besten und langfristig am kostengünstigsten ist. Glas widerstand auch schweren Stürmen während vieler Jahre ohne Schäden und erwies sich als selbstreinigend; gelegentliche Regenschauer reichen aus.

Die Investitionskosten für einen Folienkollektor sind niedriger als für einen Glaskollektor; allerdings versprödeten in Manzanares die Membranen im Lauf der Zeit und neigten zur Rissbildung. Mittlerweile gibt es haltbarere Kunststoffe, die Folien- und Kunststoffkollektoren wieder zu einer echten Alternative machen.

Nach dem Abschluss der Bauphase 1982 begann die Experimentierphase, deren Zielsetzung es war, das Funktionsprinzip des Aufwindkraftwerks zu demonstrieren. Die Ziele waren im Einzelnen (1) Daten über den Wirkungsgrad der neu entwickelten Technologie zu erhalten, (2) den vollautomatischen Kraftwerksbetrieb bei hoher Zuverlässigkeit zu demonstrieren und (3) das Betriebsverhalten und die physikalischen Zusammenhänge basierend auf Langzeit-Messreihen aufzuzeichnen und zu analysieren.

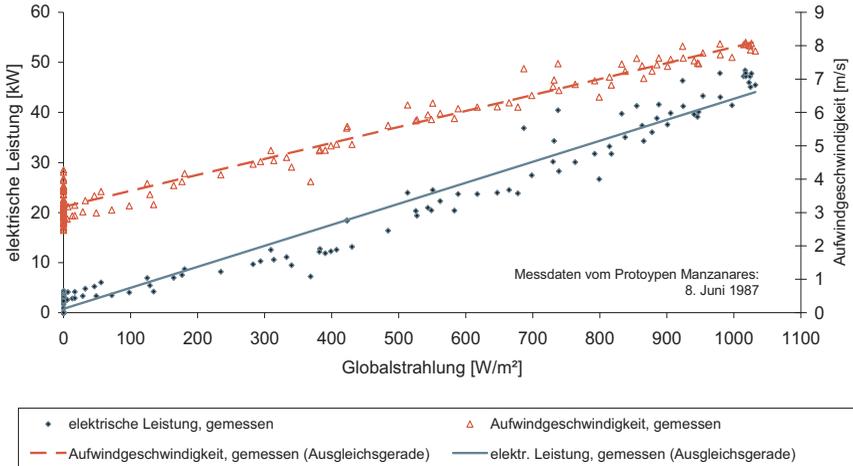
In Abbildung 9 sind die wesentlichen Betriebsdaten, d. h. Solarstrahlung, Aufwindgeschwindigkeit und elektrische Leistung, für einen typischen Tag dargestellt. Auf zwei Dinge soll hier hingewiesen werden: Erstens, dass für diese kleine Anlage ohne zusätzlichen thermischen Speicher die elektrische Leistung während des Tages eng mit der Solarstrahlung korreliert (Abbildung 10), und zweitens, dass dennoch während der Nacht ein Auftrieb herrscht, der zur Stromerzeugung während einiger Nachtstunden genutzt werden kann (Abbildung9).



**Abbildung 9:** Messergebnisse aus Manzanares: Aufwindgeschwindigkeit und elektrische Leistung für einen typischen Tag.

Simulationsrechnungen für Großanlagen zeigen, dass mit zunehmender Anlagen- und damit Kollektorgößen auch dieser Effekt zunimmt.

1987 war die Anlage für insgesamt 3'197 Stunden in Betrieb, was einer mittleren täglichen Betriebszeit von 8,8 h entspricht. Sobald die Strömungsgeschwindigkeit einen bestimmten Wert, typischerweise 2,5 m/s überschritt, startete die Anlage automatisch und synchronisierte sich mit dem Stromnetz.

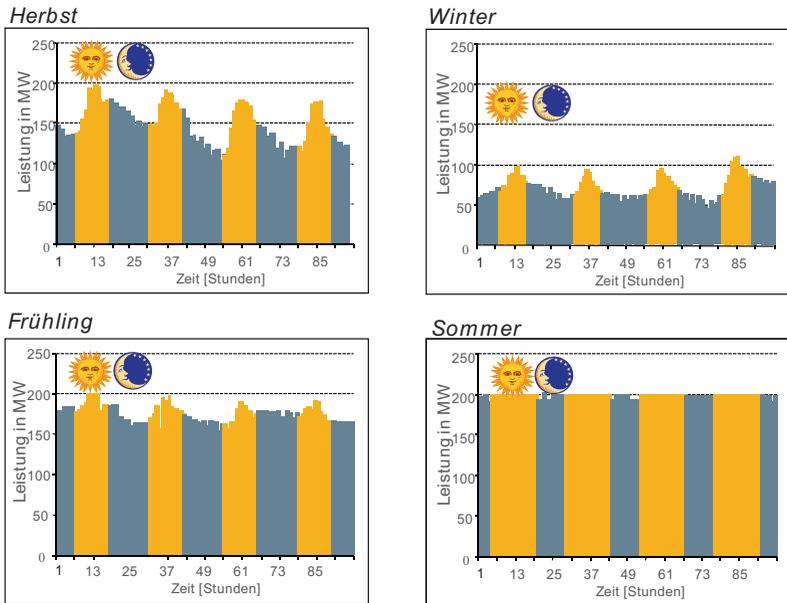


**Abbildung 10:** Zusammenhang zwischen Solarstrahlung und Leistung für den Prototypen in Manzanares.

**Große Aufwindkraftwerke.** Trotz großer Unterschiede zwischen der Pilotanlage in Manzanares und z. B. der für Australien projektierten 200 MW-Anlage hinsichtlich Fläche und Volumen sind dennoch die thermodynamischen Kenngrößen in beiden Fällen erstaunlich ähnlich: Zieht man den Temperaturanstieg und die Strömungsgeschwindigkeit im Kollektor als Beispiel heran, so ergeben sich für Manzanares ein gemessener Temperaturanstieg von bis zu 17 K und eine Windgeschwindigkeit von bis zu 12 m/s, während die berechneten Durchschnittswerte für eine 200 MW-Anlage 18 K bzw. 11 m/s betragen.

Deshalb werden Messergebnisse aus Manzanares und Aufwindkraftwerk-Simulationsprogramme (Weinrebe 2000) herangezogen, um Großanlagen mit Ausgangsleistungen bis 200 MW auszulegen. In Abbildung 11 sind die Ergebnisse einer derartigen Simulationsrechnung dargestellt. Zu sehen ist für jede Jahreszeit ein Zeitraum von vier Tagen. Diese Anlage mit zusätzlichem Wärmespeicher arbeitet rund um die Uhr, wenn auch bei reduzierter Ausgangsleistung in der Nacht, insbesondere im Winter.

Trotz verschiedener Projektentwicklungen für große Aufwindkraftwerke u.a. in Indien, Australien und Spanien wurde bisher keine kommerzielle Anlage realisiert, denn es gilt das allgemeine Dilemma des ersten Aufwindkraftwerks: Nur eine große Anlage kann wirklich wirtschaftlich arbeiten. Doch ohne den Zwischenschritt einer „kleineren“ Anlage im Megawatt-Maßstab wird das technische Risiko von Investoren so hoch eingeschätzt, dass sich nur schwer eine akzeptable Finanzierung findet.



**Abbildung 11:** Simulationsergebnisse für die Strombereitstellung eines 200 MW Aufwindkraftwerks zur Spitzenlast-Strombereitstellung mit zusätzlichem thermischen Speicher. Es handelt sich um einen Standort mit sehr ausgeprägten Jahreszeiten.

## Ökonomische Analyse

**Referenzanlagen.** Der Energieertrag eines Aufwindkraftwerks ist proportional zur Globalstrahlung, der Kollektorfläche und der Turmhöhe. Es gibt kein physikalisches Optimum. Die optimalen Abmessungen können nur errechnet werden, wenn spezifische Komponentenkosten (Kollektor, Turm, Turbine) sowie die Landkosten für den jeweiligen Standort bekannt sind. So können also Anlagen unterschiedlicher Abmessungen für unterschiedliche Standorte gebaut werden – jeweils zu minimalen Kosten: Ist die Kollektorfläche billig und Stahlbeton teuer, dann wird man einen großen Kollektor und einen vergleichsweise kleinen Turm bauen, und wenn der Kollektor teuer ist, wird man einen kleineren Kollektor und einen großen Turm bauen.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die typischen Abmessungen von Aufwindkraftwerken. Die Zahlen basieren auf international üblichen Material- und Baukosten. Die Kosten für ungelernete Arbeitskräfte sind mit 5 €/h angesetzt.

**Tabelle 2:** *Typische Abmessungen und Strombereitstellung ausgewählter Aufwindkraftwerke für den Referenzstandort mit einer jährlichen Globalstrahlungssumme von 2300 kWh/m<sup>2</sup>.*

Nennleistung	MW	5	30	50	100	200
Turmhöhe	m	550	750	750	1'000	1'000
Turmdurchmesser	m	45	70	90	110	120
Kollektordurchmesser	m	1'250	2'950	3750	4'300	7'000
Strombereitstellung	GWh/a	14	87	153	320	680

**Investitionskosten.** Basierend auf spezifischen Kosten und den Abmessungen aus Tabelle 2 wurden die Investitionskosten ermittelt (Tabelle 3).

**Tabelle 3:** *Investitions- und Stromgestehungskosten.*

<b>Nennleistung</b>	<b>MW</b>	<b>5</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>200</b>
Turmkosten	Mio. €	23	56	72	176	192
Kollektorkosten	Mio. €	14	72	117	156	390
Turbinenkosten	Mio. €	9	37	56	83	146
Engineering, Tests, Versch.	Mio. €	5	21	32	50	53
<b>Summe</b>	<b>Mio. €</b>	<b>51</b>	<b>186</b>	<b>277</b>	<b>465</b>	<b>781</b>
Annuität auf Investitionskosten	Mio. €/a	3,6	13,2	19,6	33,0	55,4
Betriebs- und Wartungskosten	Mio. €/a	0,3	0,9	1,4	2,1	3,2
<b>Stromgestehungskosten</b>	<b>€/kWh</b>	<b>0,2</b>	<b>0,16</b>	<b>0,14</b>	<b>0,11</b>	<b>0,09</b>
Stromgestehungskosten nach 25 Jahren	€/kWh	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01

**Betriebskosten.** Die jährlichen Betriebskosten wurden anhand von anzusetzenden Lohnkosten und Ersatzteilkosten für die Kollektoreindeckung angesetzt. Die Betriebskosten liegen ähnlich wie bei Wasserkraftwerken vergleichsweise niedrig, denn die Turbinen sind die einzigen beweglichen Teile. Es gibt keine hohen Drücken oder Temperaturen ausgesetzten Komponenten. Der Großteil des Kraftwerks ist ein langlebiges Bauwerk.

**Stromgestehungskosten.** Zusammen mit den errechneten Jahresenergieerträgen aus Simulationsrechnungen können damit die Stromgestehungskosten errechnet werden. Für die Rechnung wurde ein Zinssatz von 5% und eine Abschreibungsdauer von 25 Jahren angenommen. Aus Tabelle 3 geht hervor, dass die Stromgestehungskosten mit

zunehmender Anlagengröße signifikant abnehmen, von 0,29 €/kWh für das 5 MW-Aufwindkraftwerk auf 0,09 €/kWh für die 200 MW-Anlage. Deutlich wird auch das „goldene Ende des Projekts“, dargestellt in der letzten Zeile, denn ganz ähnlich wie bei Wasserkraftanlagen sind die Stromgestehungskosten, sobald die Anlage nach 25 Jahren bezahlt ist, durch die niedrigen Betriebskosten minimal.

## Ausblick

Derzeit versuchen die Entwickler der Aufwindkraftwerktechnologie gemeinsam mit Partnern eine Anlage mittlerer Größe von etwa 30 bis 50 MW an einem Standort mit besonders günstigen Randbedingungen zu realisieren. Der Vorteil dieses Ansatzes ist es, dass die Stromgestehungskosten eines solchen Kraftwerks zwar deutlich über denen einer 100 MW oder 200 MW-Anlage liegen, aber die erforderliche Investition – und damit das finanzielle Risiko – auch deutlich kleiner ist. Darüber hinaus besitzt ein Aufwindkraftwerk mittlerer Größe weitere Vorteile: Es ist wesentlich einfacher, einen geeigneten Standort zu finden, die Baubarkeit des Turms wird auch von Laien nicht in Frage gestellt, da es Bauwerke entsprechender Größe bereits gibt, und der prozentuale Beitrag, den zusätzliche Einkommensquellen wie Tourismus und Namensrechte zumindest bei einer Erstanlage liefern können, ist deutlich höher.

Unabhängig davon bleibt das längerfristige Ziel der Bau von großen Kraftwerken mit Leistungen im 200-MW-Bereich, denn mit diesen wird, unabhängig von staatlichen Subventionen, eine umweltverträgliche und gleichzeitig wirtschaftliche Strombereitstellung möglich sein.

Diese Herausforderung gilt es nun zu meistern. Ist erst einmal ein Aufwindkraftwerk erbaut und erfolgreich in Betrieb, dürften sehr schnell weitere Anlagen entstehen, denn sie bieten wichtige Vorteile wie die Tatsache, dass der Betrieb keinen Wasserverbrauch wie bei (solarthermischen) Kraftwerken mit Dampfkreislauf bedingt, und dass der Erdboden unter dem Kollektor immer als natürlicher Energiespeicher wirkt. Darüber hinaus bedeutet ihr Bau größtenteils keinen Ressourcenverbrauch, sondern lediglich eine Ressourcenbindung (Schlaich, Bergermann, Schiel, et al. 2004). Aufwindkraftwerke bestehen im Wesentlichen aus Beton und Glas, das ist Sand und (selbsterzeugte) Energie. Sie können sich also in Wüsten zu einem großen Teil selbst reproduzieren – eine wahrhaft nachhaltige Energiequelle.

## Literatur

- Gannon, A.J. & von Backström, T.W., 2000. Solar Chimney Cycle Analysis with system Loss and Solar Collector Performance. In *Proceedings of Solar 2000: Solar Powers Life, Share the Energy*. Solar 2000. Madison, Wisconsin, USA: ASME.
- Günther, H., 1931. *In hundert Jahren - – Die künftige Energieversorgung der Welt* Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde., Stuttgart: Frankh'sche Verlagshandlung.
- Haaf, W., 1984. Solar Chimneys, Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. *Solar Energy*, 2, pp.141-146.
- Haaf, W. et al., 1983. Solar Chimneys, Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares. *Solar Energy*, 2, pp.3-20.

- Kreutz, H., 1997. *Theoretische Untersuchungen und Auslegung eines temporären Wasserspeichers für das Aufwindkraftwerk*. TU Berlin.
- dos Santos Bernardes, M.A., Voss, A. & Weinrebe, G., 2003. Thermal and Technical Analyses of Solar Chimneys. *Solar Energy Journal*, 75(6), pp.511-524.
- Schlaich, J., 1996. *The Solar Chimney. Electricity from the Sun* illustrated edition., Stuttgart: Edition Axel Menges.
- Schlaich, J., Bergermann, R. & Weinrebe, G., 2004. Sustainable Electricity Generation with Solar Updraft Towers. *Structural Engineering International*, 3, pp.225-229.
- Schlaich, J., Bergermann, R., Schiel, W., et al., 2004. *The Solar Updraft Tower - An Affordable and Inexhaustible Global Source of Energy*, Berlin: Bauwerk Verlag.
- Weinrebe, G., 2000. Solar Chimney Simulation. In *SolarPACES Solar Power Plant Simulation Workshop*. IEA SolarPACES Task III Simulation of Solar Thermal Power Systems Workshop. Cologne: IEA.

Dr. Gerhard Weinrebe  
Schlaich Bergermann Solar  
Schwabstr. 43  
D-70197 Stuttgart  
Tel. +49 711 64871-0,  
g.weinrebe@sbp.de

Deutsche Physikalische Gesellschaft  $\Phi$  DPG

Arbeitskreis Energie



# Energie

## Perspektiven und Technologien

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2011

Herausgegeben von Hardo Bruhns

# Energie

## Perspektiven und Technologien

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2011

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, April 2012

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie  
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft  
Dresden, 13. bis 16. März 2011

Hauptvorträge

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	7
Übersicht über die Fachsitzungen.....	8
Abstracts aller Vorträge.....	9
Electrolytes in lithium-ion batteries: state of the art and future trend (presented by A. Balducci).....	27
Das Energiekonzept der Bundesregierung und andere Optionen für die Energiezukunft Deutschlands (vorgetragen von M. Popp).....	37
Vergleichende Bewertung von Stromerzeugungssystemen (vorgetragen von R. Friedrich).....	47
Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen - internationaler Stand und Perspektiven (vorgetragen von H. Geckeis).....	64
Nuclear Waste Transmutation: Status and Perspectives for Accelerator Driven Systems (ADS) in Europe (presented by A. C. Mueller).....	81
Der Stellarator - Ein alternatives Einschlusskonzept für ein Fusionskraftwerk (vorgetragen von R. Wolf).....	97
Production and conversion of liquid fuels and hydrogen from biomass and natural gas using microreactor technology (presented by P. Pfeifer).....	105
Physik der Windparkoptimierung (vorgetragen von S. Emeis).....	120

Geothermie für Grundlaststrom und Wärmeversorgung - internationale Nutzung, Potenzial, technologische Entwicklungen (vorgetragen von D. Bruhn).....	130
Einsatz großer Wärmepumpen im Industrie- und Gewerbebau (vorgetragen von R. Grimm) .....	140
Anforderungen an einen Wärmepumpentarif zur Überwindung diskriminierender Steuern und Abgaben beim thermodynamisch optimierten Heizen (vorgetragen von G. Luther).....	151
Clean Power from Deserts (presented by M. Düren).....	164
Hochkonzentrierende Photovoltaik: Stand der Entwicklungen und Perspektiven (vorgetragen von A. Bett) .....	182
Das Aufwindkraftwerk – Funktionsweise und aktueller Stand (vorgetragen von G. Weinrebe) .....	200

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2011 -Dresden:

[http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE\\_Archiv/DPG2011-AKE\\_Dresden/Links\\_DPG2011.htm](http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2011-AKE_Dresden/Links_DPG2011.htm)

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen der Hauptvorträge der AKE Tagung des Jahres 2011 in Dresden zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien der Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort gelangt man zum Archiv des AKE) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.