**Prof. W. Brösicke**

# ENERGIEWANDLER

Vorlesung im Studiengang
Umwelttechnik/Regenerative Energien

Das Hauptstudienfach **ENERGIEWANDLER** ist modular aufgebaut und umfaßt

72 Semesterwochenstunden Vorlesung im 3. Semester,
36 Semesterwochenstunden Übungen im 3. Semester
und
72 Semesterwochenstunden Vorlesung im 4. Semester,
36 Semesterwochenstunden Laborübungen im 4. Semester

Das 3. Semester enthält die Vorlesungsteile: EW – Energiewandlung
FW - Fluidmechanische Wandler
MV - Mechanovoltaik
und die Übungen

Das 4. Semester umfaßt die Vorlesungsteile: SE – Sonnenenergie
TW – Solarthermische Wandler
PV – Photovoltaik
CV – Chemovoltaik
und die Laborübungen

**sowie fakultative Teile (vorzugsweise) in der vorlesungsfreien Zeit**

## Teil SVT 1

**(FAKULTATIV)**
**Skriptübersicht Teil SVT**


| | | |
|---|---|---|
| **SVT** | **Solare Verbundtechnologien** | 1 |
| **SVT 1.** | **Wandlerkette zum „Synthetischen Wind" :** | |
| | **- Das Aufwindkraftwerk -** | 1 |
| SVT 1.1 | Prolog | 1 |
| SVT 1.2 | Natürliche Vorbilder | 2 |
| SVT 1.3 | Zur Geschichte solarer Verbundtechnologien | 9 |
| SVT 1.4 | Technische Nachbildung: Der Thermikturm | 13 |
| SVT 1.5 | Berechnungsgrundlagen | 14 |
| SVT 1.6 | Aufwindkraftanlagen | 16 |
| SVT 1.7 | Solarthermische Energiewandlung | 20 |
| SVT 1.8 | Fluidenergiewandlung | 23 |
| SVT 1.9 | Mechanische Energiewandlung | 26 |
| SVT 1.10 | Erfahrungen aus dem Projekt Manzanares | 30 |
| SVT 1.11 | Auslegungsbeispiele | 32 |
| SVT 1.12 | Kontinuierlicher Tag-/Nacht-Betrieb | 33 |
| SVT 1.13 | Übungsbeispiel | 34 |
| SVT 1.14 | Anhang: Messung beeinflussender Größen | 35 |
| SVT 1.15 | Anlagen | 37-39 |


**Nur zum internen Gebrauch!**
(Skripte sind zur Prüfung zugelassen)

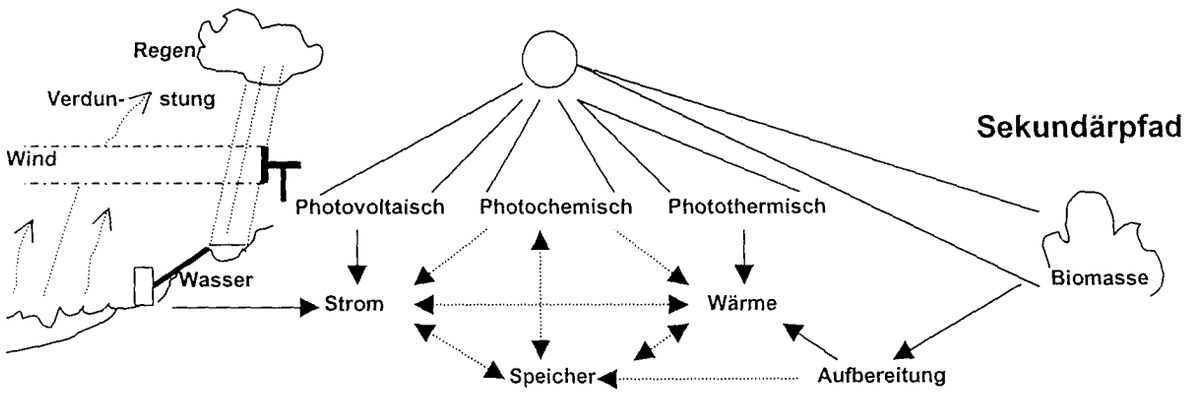
# SVT Solare Verbundtechnologien

## SVT 1. Wandlerkette zum „Synthetischen Wind" : Das Aufwindkraftwerk

### SVT 1.1. Prolog

**Umwandlungspfade**
Sonnenenergie steht in direkter und indirekter Form zur Verfügung und kann auf verschiedenen Umwandlungspfaden genutzt werden.

**Sekundärpfade** **Direktpfade**



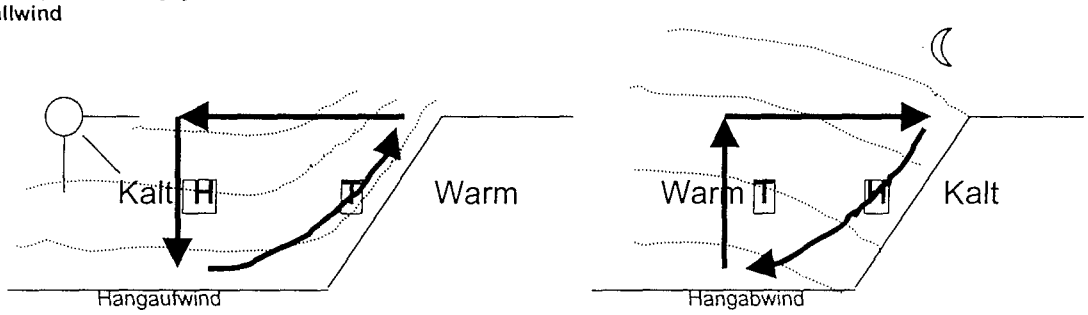

**Tertiär- oder Speicherpfad**

Solare **Direktwandler** werden vor allem in den Vorlesungsteilen TW und PV behandelt, Solare **Sekundärwandler** im Teil FW und **Tertiärwandler** im Teil CV **Elektromagnetomechanische Wandler** behandeln die Teile MV.
In diesem **Teil SVT** sollen **Solare Verbundtechnologien** behandelt werden. Wir definieren diese als Verbindung von Wandlerketten unterschiedlicher Technologien zur indirekten Nutzung von Sonnenenergie. Als primäre Wandlungsstufe der Kette dient vorzugsweise ein Direktwandler.

**„Erzeugung" elektrischer Energie durch eine Solarthermisch-fluidmechanisch-elektromagnetomechanische Wandlerkette: Das „Aufwindkraftwerk" oder der „Thermikturm"**

**Solare Strahlungsenergie**→*Photothermischer Direktpfad* → Absorption→ Wärme → Fluidausdehnung → Konvektion →**Fluidmechanische Strömungsenergie** → *Auftriebsströmung* → **Mechanische Rotationsenergie** → Elektrodynamische Energie → Elektromagnetische Energie →**Elektrische Energie**

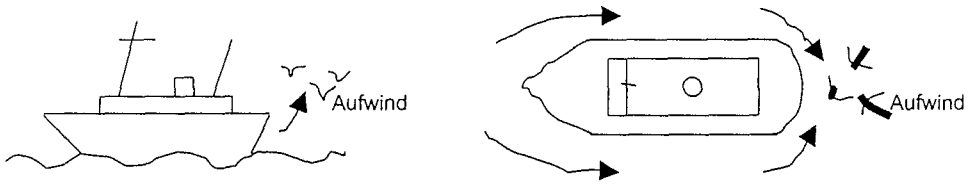
**Darstellung eines Hangsystems mit Auf- und Fallwind**

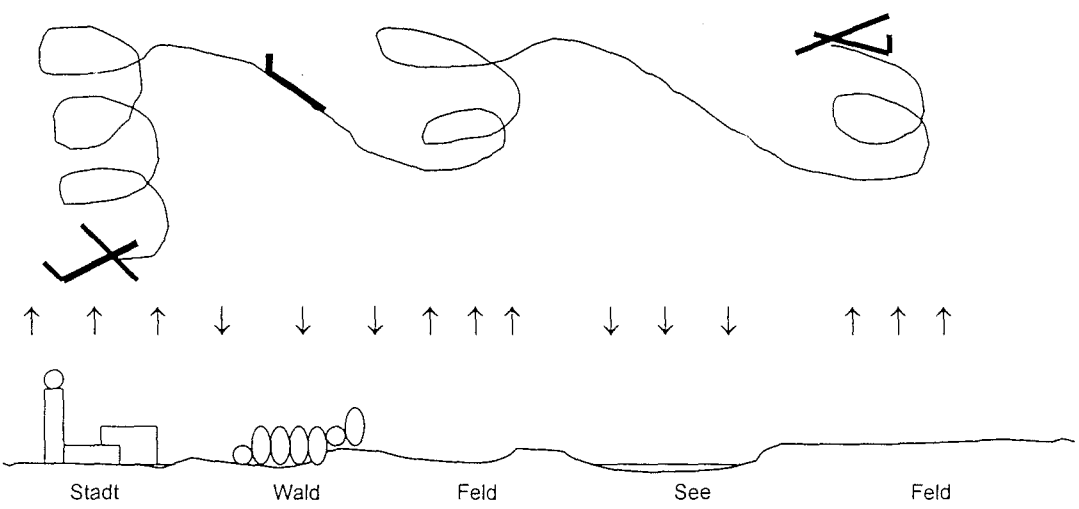



## Wärmeaufwind oder Thermik

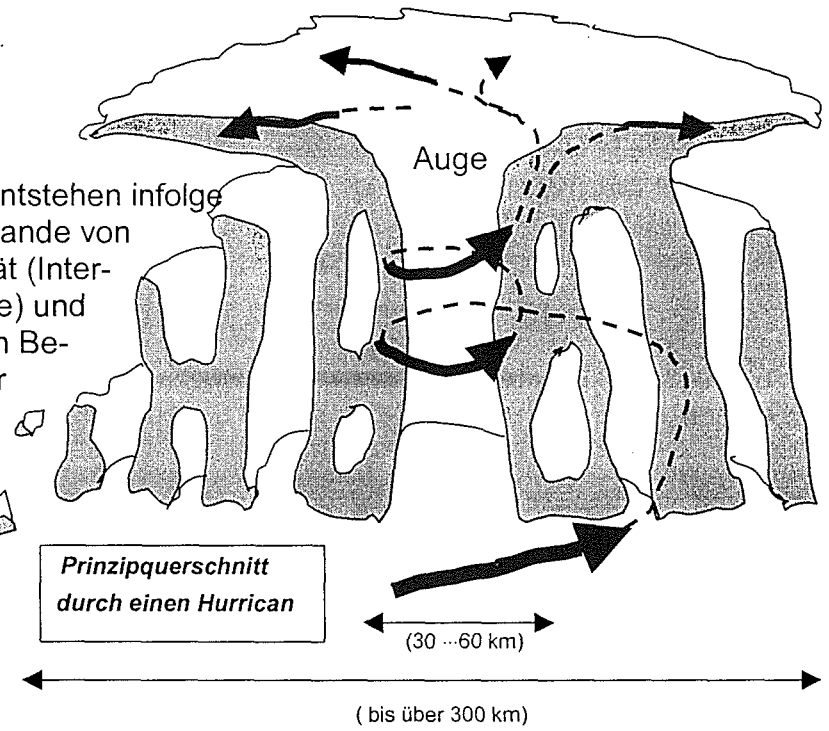
Beginnend mit den Heißluftballonflügen der ***Montgolfiers*** (vgl. Skript CV 1-3 S.5!) , jedoch spätestens seit ***Lilienthals*** Versuchen, in Anlehnung an den Vogelflug in der Luft zu gleiten, beschäftigt man sich auch mit der bewußten Ausnutzung atmosphärischer Auftriebsvorgänge. Ein Segelflugzeug kann nur dann seine Höhe beibehalten, wenn es sich im Bereich eines **Aufwindes** befindet, dessen Geschwindigkeit stärker als die Sinkgeschwindigkeit des Flugzeuges ist. Den von einem Schiff erzeugten Aufwind nutzen auch Möwen, wenn sie ohne Flügelschlag hinter dem Heck segeln.

**Otto Lilienthal**
**(1848 – 1896)**



**Wirbelstürme-**
**natürliche Großkraft-**
**maschinen**

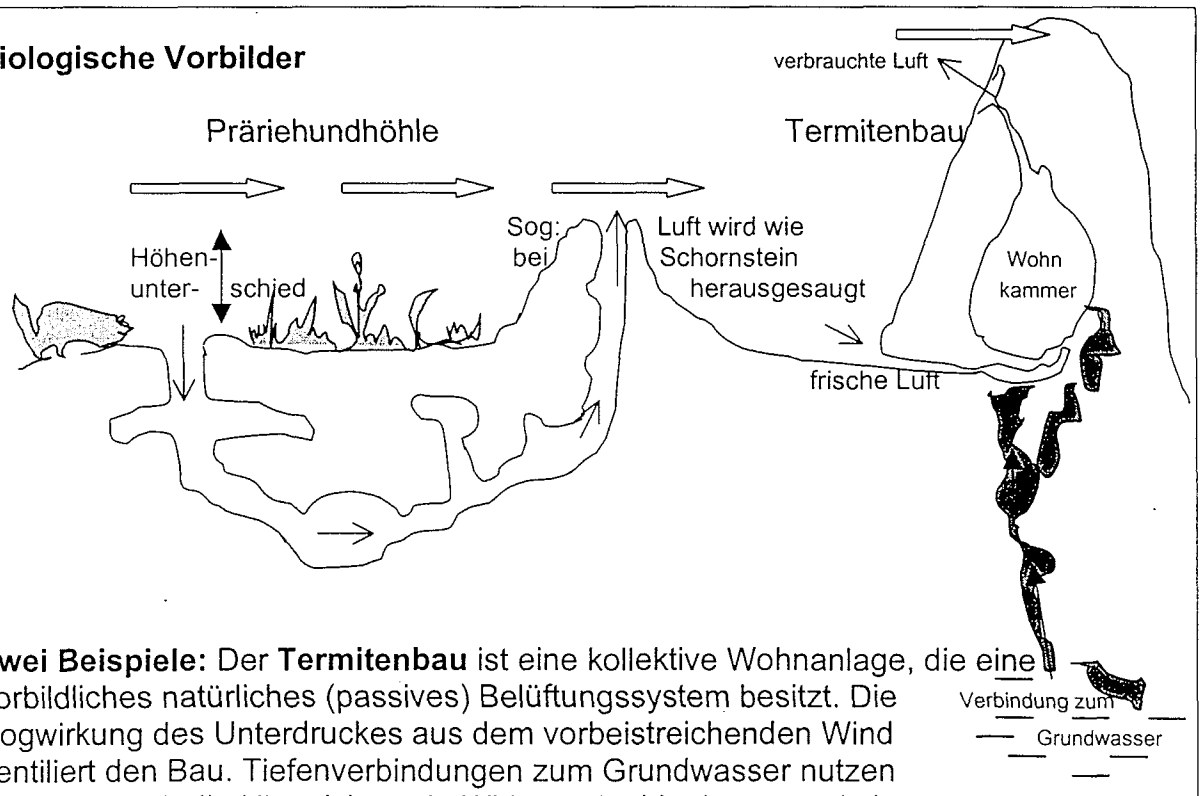



Tropische Wirbelstürme entstehen infolge kleinerer Störungen am Rande von Zonen konvektiver Aktivität (Intertropische Konvergenzzone) und wachsen unter geeigneten Bedingungen schnell an. Der Druck im Zentrum fällt stark ab (bis 965 mbar). **Hurricane** entwickeln sich nur über Wasser oberhalb von 27°C. Organisation und Symmetrie sind mit der Stärke (>120km/h im Augenbereich) verknüpft. Karibische **Hurricane** entsprechen etwa den pazifischen **Taifunen**, philippinischen **Baguios** oder indischen **Zyklonen**. **Ein** (!) derartiger Wirbelsturm kann täglich zwischen 6 bis 8 mal $10^{12}$kWh an latenter Wärme freisetzen (etwa ½ bis 1½ facher Weltjahresbedarf an elektrischer Energie).
Mit bis über 500km/h entwickeln **Tornados** (Windhosen), die aber von den tropischen Wirbelstürmen unterschieden werden müssen, die höchsten Energiekonzentrationen in der Atmosphäre. Sie entstehen kleinräumiger aus bodennahen Überhitzungen und Kaltluftadvektionen größerer Höhe (südl. USA).

**Aufgabe:** Skizzieren Sie die lokalen Verhältnisse am Meeresstrand und erläutern Sie Bedingungen für und Entstehung von Seewind und Landwind sowie ein räumliches Strömungsrad mit Auf- und Fallwind !

**Die lebensnotwendige Umkehrung des "Aufwasserprinzips"**
Europas Wärmespender, der **Golfstrom** ist Teil eines weltweiten Strömungsystems. Entlang der südamerikanischen Küste und vom südlichen Afrika über den Atlanik strömt Wasser in den Golf von Mexiko. In der Karibik wird es aufgeheizt und fließt, von Winden getrieben nach Norden. In der Höhe Neufundlands folgt der, jetzt Nordatlantik-Strom genannte, einer Sogwirkung mit subpolarem Zentrum. Arktische Winde kühlen das salzreiche Tropenwasser bis auf knapp unter 0°C ab. Das durch das Salz schwere Wasser sinkt durch die darunter befindlichen leichteren Wassermassen in die Tiefe. Im Jahresmittel rechnet man mit 17 Millionen Kubikmetern pro Sekunde (das 20fache der Wassermenge aller Flüsse auf der Erde), die im Nordatlantik in die Tiefe stürzen. Erst dieser gewaltige **Sog** sorgt für das Funktionieren des Golfstroms! Etwa 2000 bis 3000 Meter unter der Meerwasser-oberfläche geht das, jetzt eisige Wasser auf die Rückreise. Im Südatlantik steigt ein Teil davon wieder auf, ein anderer Teil fließt weiter ostwärts um das Kap der Guten Hoffnung, um im Indischen Ozean (teilweise erst nach Jahrhunderten) wieder aufzusteigen. Das Nordatlantik-Prinzip funktioniert jedoch nur im Winter, da das Oberflächenwasser im Sommer zu leicht zum Absinken bleibt. (Gefahr: Globaler Treibhauseffekt ! Würde auch im Winter den notwendigen Austausch verhindern!)

**Biologische Vorbilder**




**Zwei Beispiele:** Der **Termitenbau** ist eine kollektive Wohnanlage, die eine vorbildliches natürliches (passives) Belüftungssystem besitzt. Die Sogwirkung des Unterdruckes aus dem vorbeistreichenden Wind ventiliert den Bau. Tiefenverbindungen zum Grundwasser nutzen daneben noch die klimatisierende Wirkung der Verdunstungskälte. (Menschliche Nachbildung: „Windturm" in überlieferter iranischer Architektur)
**Präriehunde** (Erdhörnchen) nutzen die Strömungsunterschiede an unterschiedlich hohen und geformten Bauöffnungen.

## SVT 1.3. Zur Geschichte solarer Verbundtechnologien

**Vorzeit:** Im heutigen Neu-Mexiko existieren Reste einer **um 1100 v. Chr.** angelegten (→Olynthus-ähnlichen) Sonnenbauweise.
**Olynthus** (HI Chalkidike, nahe heutigem Miriopothon) wurde für Flüchtlinge des Peloponnesischen Krieges (431-404 v. Chr.) nach Grundsätzen solarer Architektur („Recht auf Sonne") errichtet. Der Gerichtsschreiber *Xenophon* (etwa 430 - 354 v. Chr.) zitierte *Sokrates* (etwa 470 - 399 v. Chr.) mit Beispielen energiesparender solarer Architektur, die belegen, daß man die Wirkprinzipien des Strahlungseinfangs und der Wärmespeicherung sowie der Kaminwirkung durchaus schon verstand und sinnvoll nutzte. Beispiele sind auch aus dem alten China, später auch Japan bekannt.
**Archimedes** (287 bis 212 v. Chr.) fand neben einer Reihe anderer hervorragenden mathematischer und physikalischer Entdeckungen ($\pi$, $\sqrt{}$, Hebel, Spirale usw.) das „Archimedische Prinzip" zur Ermittlung des Auftriebs. Daß er die römische Flotte durch Lichtkonzentration mit Bronzespiegeln in Brand setzte, dürfte eine mittelalterliche Legende sein, obwohl es erfolgreiche Nachstellungen gab.

Archimedes

**Heliocaminus** (ηλιοζ - Sonne; καμινοζ - Kamin): Baukonzept des *Vitruv* ( ☞ vgl. Skript FW 3, Seite 10 !)
nach dem Prinzip der „Strahlenfalle" (Wintergarten, Treibhauseffekt,Kollektorprinzip).
***Vitruv*** , *Marcus Vitruvius Pollio* (römischer Architekt um 84 v. Chr. ) um 25 v. Chr. erschien „de Architectura" (10 Bände), das noch in der Renaissance genutzt wurde. Das antike Lehrbuch integrierte Baukunst **und** Technik (vor allem auch Klima- und Energietechnik). Mangel an Brennholz führte in Rom zum Aufgreifen griechischer Beispielen passiver Sonnennutzung, solarem Bauen bzw. solarer Architektur.
*Gaius* ***Plinius*** *Sekundus* ( geb. 23 n. Chr.; röm. Schriftsteller, gest. beim Ausbruch des Vesuvs 79 n. Chr.) beschreibt in seiner „Naturalia Historia" die Wirkung der Strahlenfalle durch Glas oder Mica (micare, lat.: „zittern"; spaltbare Silikatmaterialien unscharfer Transmission; engl.: Glimmer). In den kälteren besetzten Provinzen nutzten die Römer in **Hypokausten**heizungen (vom griechischen υπο - unter und καυστοζ - brennbar) bereits das Prinzip des Luftkollektors und der Kaminwirkung von Hohlkörpern für erwärmte Luft.

## Architekturgeschichte

### Atrien

versorgen mit Tageslicht und Luft. Genutzt wird der **Treibhauseffekt** ( ☜ s. S. 2ff )

und zusätzlich die **Kaminwirkung** (☞ Schornstein, S. 14 ); erwärmte Luft steigt auf und kann über geöffnete Klappen in oberen Bereichen entweichen, der Unterdruck saugt verbrauchte Luft aus Nebenräumen, frische Luft strömt in unteren Bereichen nach. Dieses alte Prinzip findet auch in modernen Bauten (Beispiel: Unite' d' Habitation von ***Le Corbusier*** nutzt „Schornsteineffekt") wieder vermehrte Anwendung.

### Speichermassen

Genutzt werden Konstruktionen als thermische Speichermassen, fraktale Geometrien (**Luftschwamm**,*Le Corbusier* 1922: *„Mir ist bewußt geworden, daß die Lunge der Schlüssel zum Leben ist ···"*; **Faltungen** für Hochhäuser), selektive Bauhüllen (Wintergarten; TWD-Transparente Wärmedämmung), geeignete Farbgestaltungen (Absorptions- und Emissionsverhalten), veränderliche Gebäudehüllen

### Speicherung sensibler Wärme

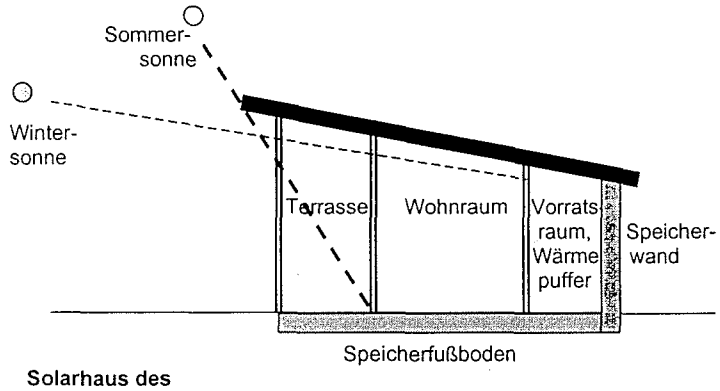
$$Q_{Speicher} = m \cdot c_p \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

Die spezifische Wärmekapazität beschreibt die erforderliche Wärmemenge, um die Temperatur eines Kilogramms eines Stoffes um ein Kelvin zu erhöhen.

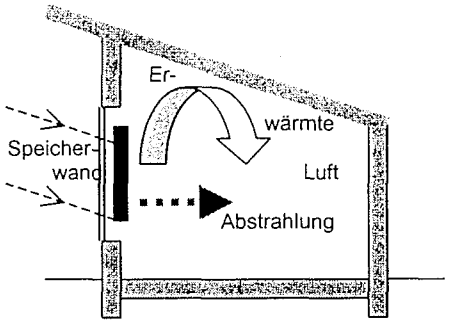
| Baustoff | Temperaturbereich in °C | Spezifische Wärmekapazität in kJ/kgK | Volumetrische Wärmekapazität in kJ/m³K | Dichte in kg/ m³ |
|---|---|---|---|---|
| Kies, Sand | 0 - 800 | 0,71 | 1,278-1,420 | 1,800-2,000 |
| Granit | 0 - 800 | 0,75 | 2,062 | 2,750 |
| Beton | 0 - 500 | 0,88 | 1,672-2,074 | 1,900-2,300 |
| Ziegel | 0 - 1000 | 0,84 | 1,176-1,596 | 1,400-1,900 |
| Eisen | 0 - 800 | 0,47 | 3,655 | 7,860 |
| Vergleich: Wasser | 0 - 100 | 4,19 | 4175 | 998 |

## Trombe-Wand

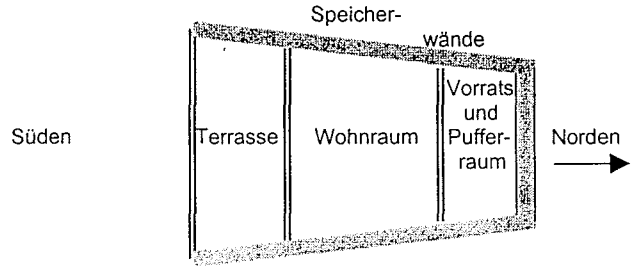
*Felix* ***Trombe*** und *J.* ***Michel*** entwickelten 1972 für ein, dem Sonnenhaus des ***Sokrates*** ( 470 – 399 v.Chr. : *„Aus einsichtigem Denken geht rechtes Handeln hervor"*) in passiv-solarer Bauweise nachempfundenes Versuchshaus in den Pyrenäen eine Masse-Speicher-Wand (geschwärzter Stein oder Beton hinter Glas)




**Solarhaus des Sokrates**

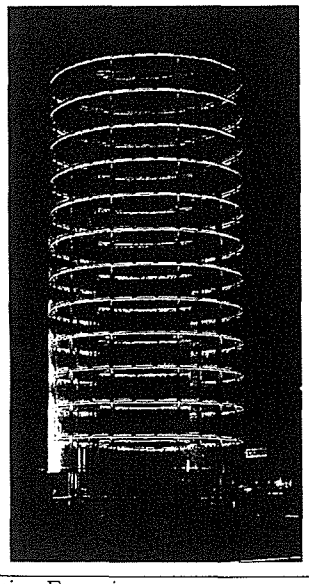


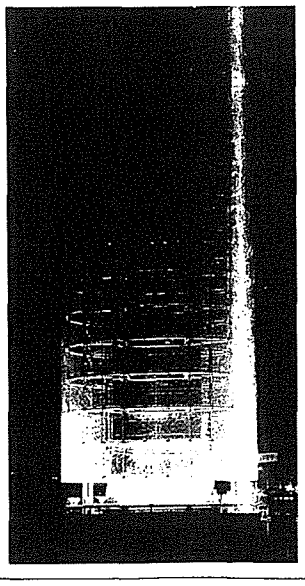

**Prinzip der Trombe-Wand**

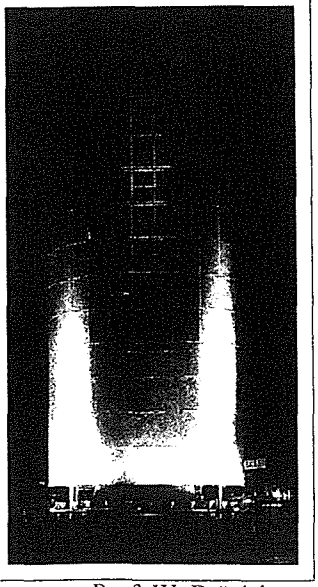



## Aufgabe

Welche Wärmemenge kann eine Beton-Hauswand 2,3m x 4m x 0,2m speichern, wenn ihre Temperatur um 2°C erhöht wird ?

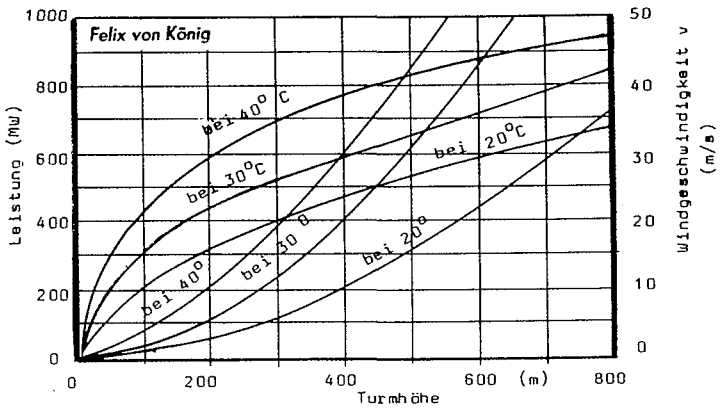


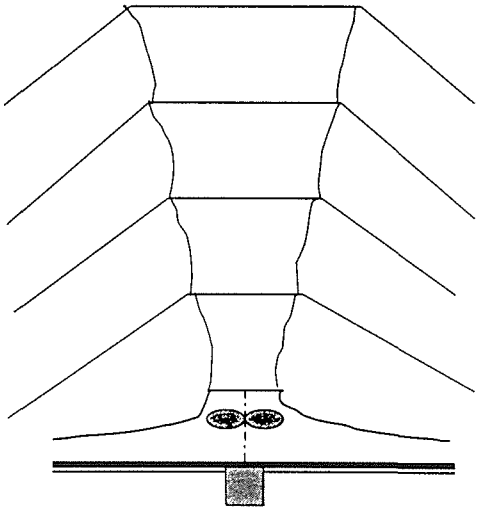




Der **Turm der Winde** von *Toyo Ito* , ein intelligentes Bauwerk,das auf Wind und Klang aus der Umgebung reagiert

**Atmosphärenthermische Windkraftanlagen (Aufwind-Kraftanlagen)**
Nach dem natürlichem Vorbild der Windentstehung infolge großflächiger Temperaturunterschiede entstand die Idee der Strömungserzeugung durch die Forcierung örtlicher Temperaturdifferenzen nach dem Treibhausprinzip, gekoppelt mit einer Kaminwirkung und deren Nutzung durch Windturbinen. In den 70er Jahren berechnete *Dr. Karl* ***Ernst*** Aufwind-Kraftanlagen und ermittelte für Turmhöhen von 550m Leistungen bis 1 Gigawatt (Kollektorkreisdurchmesser 5,5 km). *Felix von* ***König*** , bekannter Wind- und Wasserenergieexperte (✞) veröffentlichte ein Nomogramm nach *Dr. Ernst* (s.unten). Für eine vorausgesetzte Turmhöhe (Abszisse) und Temperatur (Kurve) ergibt sich auf der rechten Ordinate die Windgeschwindigkeit und auf der linken die Leistung.



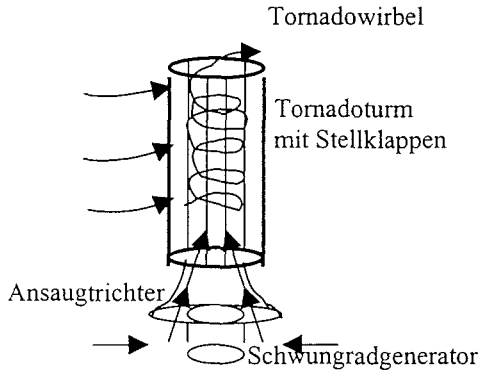



**Nomogramm**

**The Solar Chimney**
Die Idee des modernen Aufwindkraftwerkes ist mit dem Namen *Jörg* ***Schlaich*** verbunden, Der Professor aus Stuttgart konstruierte u.a. in den 70er Jahren eine riesige Hängebrücke über den Ganges. Sein Name steht für das wegweisende Dach des Münchner Olympiastadions und nicht zuletzt für den Prototyp des Aufwindkraftwerkes im spanischen Manzanares. Sein Mitarbeiter, der Physiker *Wolfgang* ***Schiel*** stellte im Rahmen der Vorbereitung der FHTW-Modellanlage dankenswerterweise Unterlagen zur Verfügung (August 2001).

## SVT 1.4. Technische Nachbildungen:

**„Tornadoturm" (nach Yen,** Springfield: U.S.-Dept. of Commerce **)**




Konzentrierendes Windkraftsystem. Zylinder mit *Schlitzen und Stellklappen. Seitlich eintretender* Wind erzeugt im Turm Wirbel mit einem Unterdruck im Kern (analog Tornado). Turm ist oben offen, unten jedoch bis auf eine kleine Öffnung im Trichter, in der eine Turbine mit angeschlossenem Generator läuft) geschlossen. Durch diese Öffnung saugt das „Auge" des Wirbels die antreibende Luft nach oben.

**Vorteile:**

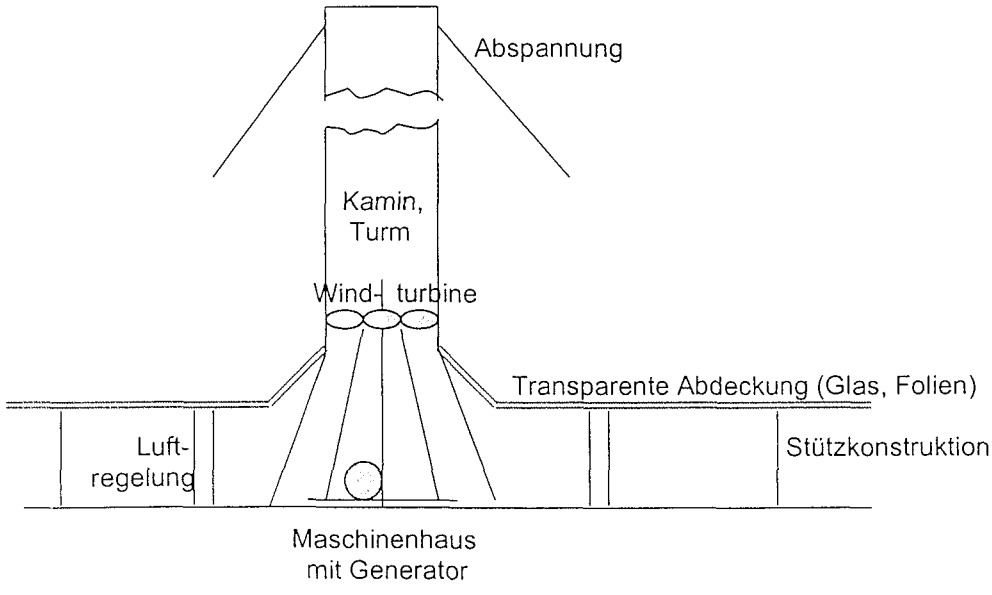
Kleine fest am Boden montierte Turbine; keine Turmschwingungen; billiger abspannfähiger Turm; Einfache Montage und Wartung; $c_p$>0,3;

$v_{vertikal}$ > 7...8 $v_{Wind}$ ; ≈ 1MW b. 60m Höhe und 20m ∅

## Der Thermikturm

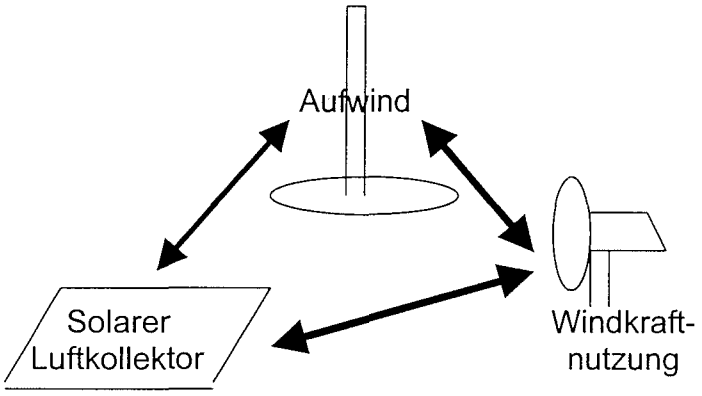
**Prinzip des Thermikturms**

Luft wird unter einem transparenten, einen Kaminturm umgebenden, Vordach durch die Sonneneinstrahlung erwärmt (Treibhauseffekt) und steigt durch die Thermik im Turm auf (Aufwind). Im Turm (aus statischen Gründen im Turmfuß) befindet sich ein (oder mehrere parallele) Windgenerator(en). Bereits **1942** befaßte sich die deutsche „Arbeitsgemeinschaft Windkraft" mit der Idee, große Schornsteine zu nutzen.



## SVT 1.6. Aufwindkraftanlagen

**Neue Verbindung dreier bekannter Technologien**
Die Idee der Aufwindnutzung beinhaltet eine Kombination bekannter alter Techniken:




Glasdach→warme Luft→Kaminröhre→Aufwind→Turbine→Elektrische Energie

Warmluftkollektor ↔ Kamineffekt ↔ Windturbine

**Vorzüge**
Einfach, zuverlässig, keine Abwärme, kein Kühlwasser, unerschöpflich, kann auch diffuse Strahlung nutzen, Kollektorboden ist natürlicher Speicher (**Nacht**betrieb möglich), umweltneutral, technologisch mit einfachen Mitteln herstellbar

**Kosten**
Anforderungen: Akzeptable Gesamtkosten im Vergleich zu fossilen Quellen
Je größer, desto besser ist der Wirkungsgrad
(1000m Höhe;1000m Durchmesser) : 100-200 MW→3000 €/kW→ ≈ 5 €/kWh
Hälfte der Gesamtkosten ist lohnintensiv →Niedriglohnländer→Arbeitsplätze
Gleichzeitig: Arme Länder besitzen oft Sonnenenergie

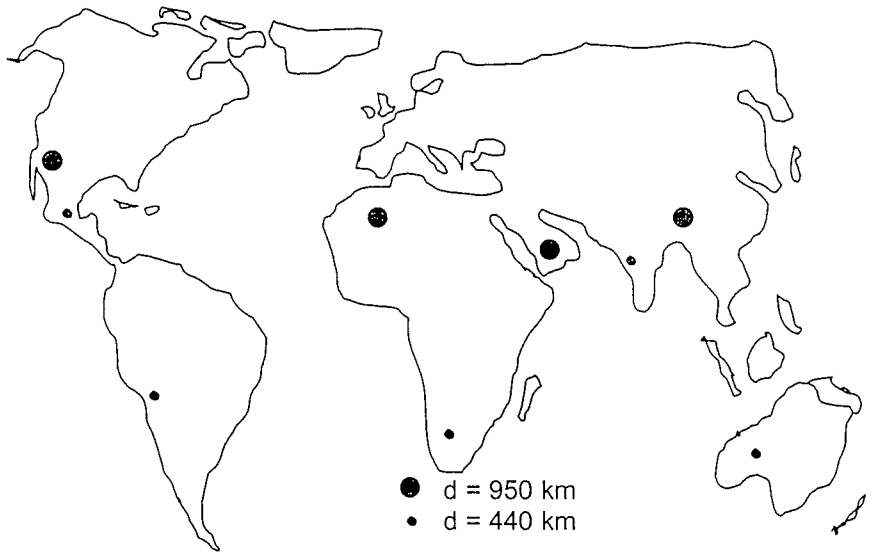
**Fiktiver Flächenbedarf bei angenommener Primärenergiebedarfsdeckung durch Aufwindkraftwerke** ( d = Durchmesser einer angenommenen Kreisfläche)
d = 2000 km (A ≈ 3.142.000 km$^2$) könnte Weltenergiebedarf decken
d = 950 km (A ≈ 709.000 km$^2$) könnte europäischen Energiebedarf decken
d = 440 km (A ≈ 152.000 km$^2$) könnte deutschen Energiebedarf decken

**Regionale Eignung**
>2200 kW/m$^2$ : sehr gut → Regionen in Sahara; Südafrika; Arabische HI; Australien; Nord- u. Südamerika
>1950 kW/m$^2$ : gut → Umfeld obiger Regionen

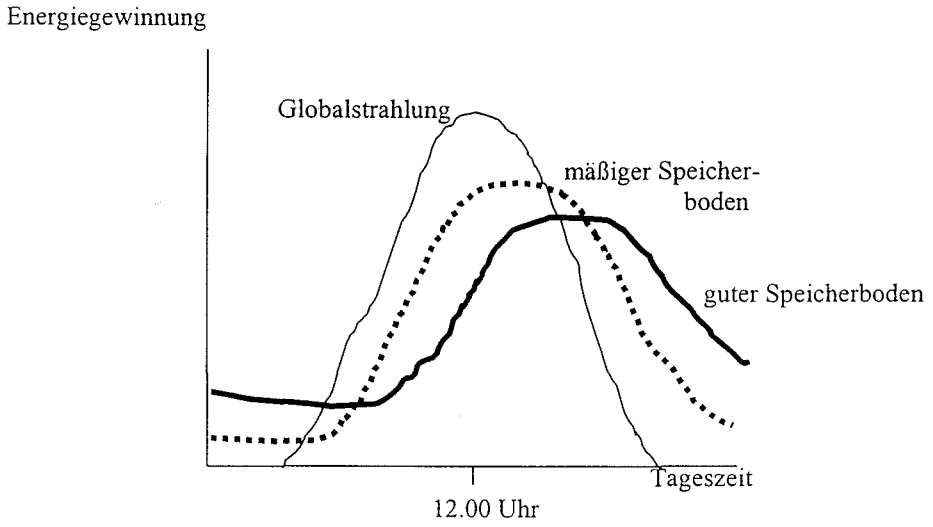
„Landschaftsverbrauch" : Wüsten, Einöden; Kollektorfläche weiterhin nutzbar

| Wüste | Kontinent | Fläche in km$^2$ |
|---|---|---|
| Sahara | Afrika | 7.750.000 |
| Gobi | Asien | 900.000 |
| Ar-Rub' l-Khali | Asien | 800.000 |
| Kalahari | Afrika | 518.000 |
| Great Sandy Desert | Australien | 420.000 |
| Taklimakan Shamo | Asien | 400.000 |
| Badiyat ash-Sham | Asien | 350.000 |
| Karakum | Asien | 260.000 |
| As-Sahra`an –Nubah | Afrika | 250.000 |
| Kyzylkum | Asien | 240.000 |
| Gibson Desert | Australien | 220.000 |
| Simpson Desert | Australien | 200.000 |
| Desierto de Atacama | Südamerika | 160.000 |
| As-Sahra' ash-Sharqiyah | Afrika | 130.000 |

**Beispielflächen zur theoretischen Weltbedarfsdeckung an Primärenergie**



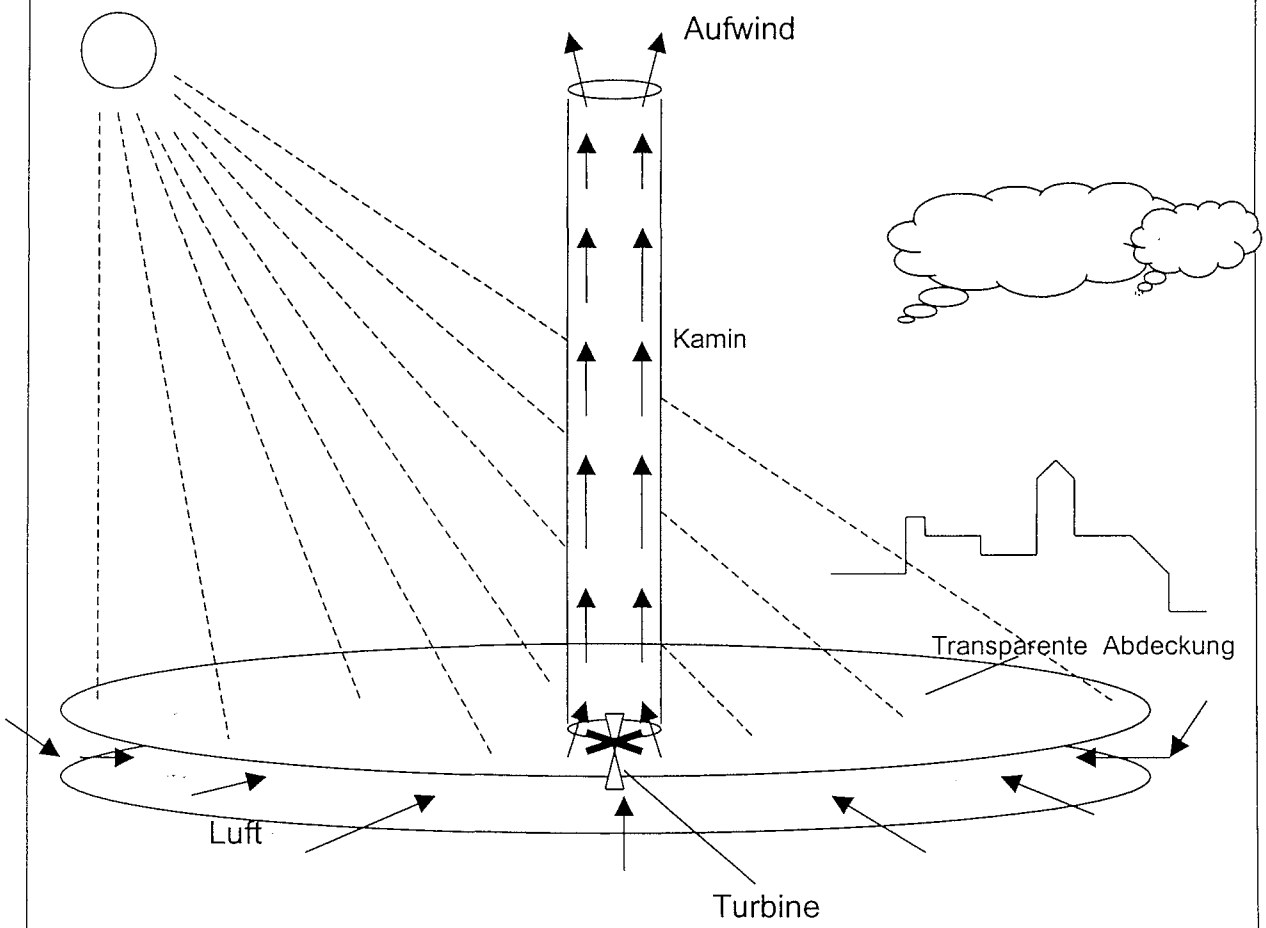
## Zeitliche Betriebsverhältnisse



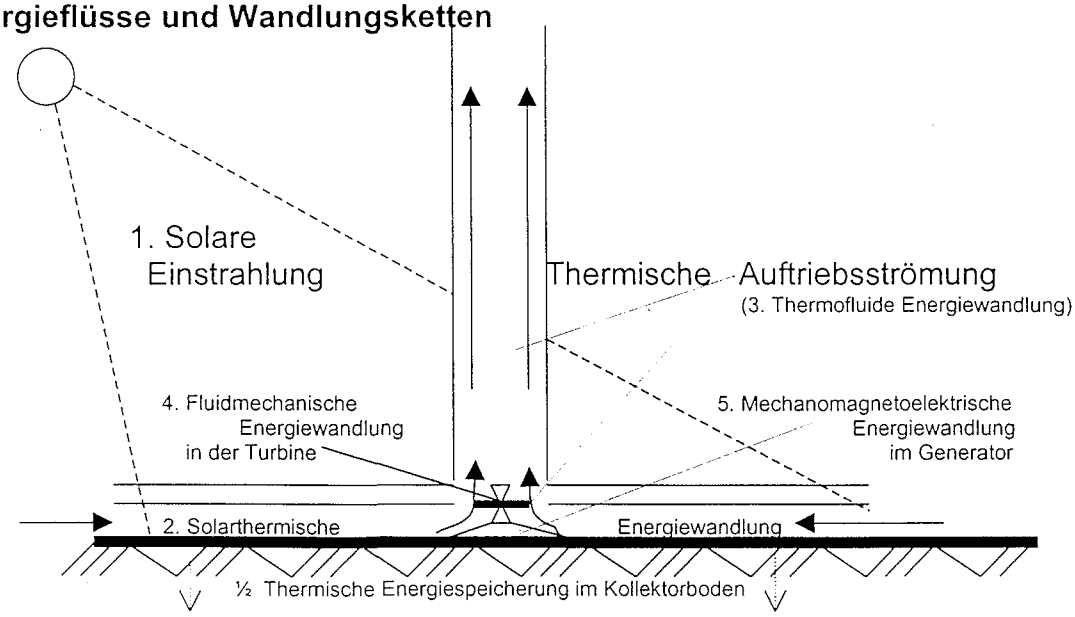

## Aufgabe

1. Erläutern Sie die obige Darstellung !
2. Wovon hängt der Anstieg der fett ausgezogenen Kurve ab ?
   Formulieren Sie einen qualitativen Formelansatz !
3. Unter der Annahme von Sand- oder Kiesboden ( ☞ Tabelle Seite 10) soll für eine Zeit von 5 Stunden für die Verhältnisse der Anlage von Manzanares ( ☞ Tabelle Seite 32) das Speichervermögen des Erdbodens berechnet werden. Angenommen wird eine Eindringtiefe der Sonnenstrahlung von 10 cm und eine Einstrahlung von durchschnittlich 800 W / $m^2$.
4. Überschlagen Sie näherungsweise für die obigen Kennlinien das vermutlich tatsächliche Speichervermögen des Bodens !

## Funktionsprinzip einer Aufwindkraftanlage

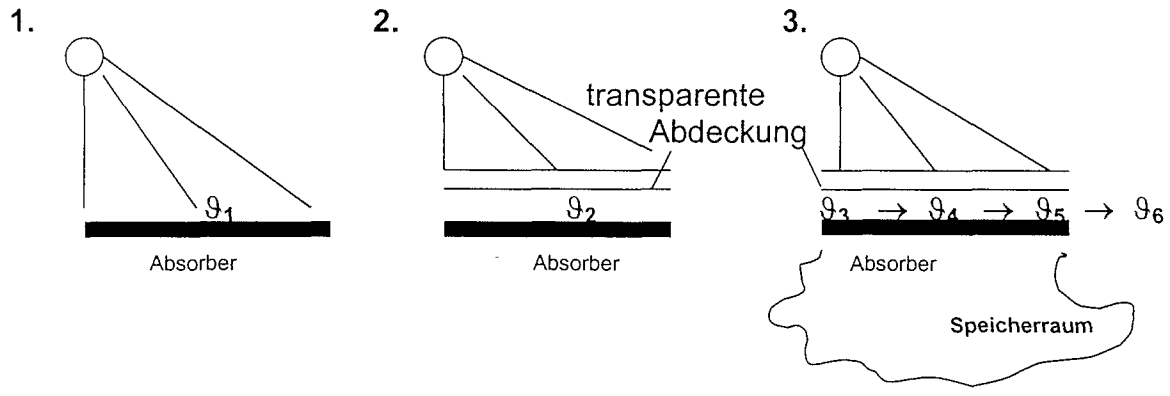



## Energieflüsse und Wandlungsketten



## SVT 1.7. Solarthermische Energiewandlung

### Kollektorprinzip




Solarstrahlungsabsorption „Treibhauseffekt" Luftkollektorprinzip mit Nachtspeicher

$\vartheta_1 < \vartheta_2$ $\vartheta_3 < \vartheta_4 < \vartheta_5 > \vartheta_6$

### Kollektoreigenschaften

Der Kollektor nutzt sowohl direkte als auch diffuse Solarstrahlung
Geeignete Abdeckungsmaterialien (spezifisch und ortsabhängig nach Wirtschaftlichkeit) rufen den Treibhauseffekt im Kollektor hervor
Der Kollektorboden dient als Speichermedium und gewährleistet somit auch den Nachtbetrieb (hoher Nutzungsgrad)
Gleichmäßiger Betrieb sichert optimale Anpassung und hohe Zuverlässigkeit
Zweckmäßige Gestaltung gestattet multivalente Nutzung (Gewächshaus, Trocknungsraum)
Der Kollektor arbeitet als Luftkollektor mit Wirkungsgraden bis zu 70 % (Jahresmittel um 50 %)
Im turmnahen Bereich empfiehlt sich eventuell eine Doppelverglasung, da hier die temperaturbedingten höheren Verluste die entstehende solare Gewinnverringerung übersteigen kann

## Kollektorbemessung

### Kollektorwirkungsgrad

$$\eta_{Koll} = \frac{\dot{Q}}{A_{Koll} \cdot E} = \frac{P_{Koll,ab}}{P_{Koll,zu}} \qquad \text{(Kl 1)}$$

E = Solare Einstrahlungsleistung pro Fläche (Bestrahlungsstärke)
Q = Wärmeleistung der vom Kollektor erwärmten Luft
$A_{Koll}$ = Kollektorfläche

### Stationäre Wärmeleistung am Kollektoraustritt

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta \qquad \text{(Kl 2)}$$

m = Massestrom am Kollektoraustritt
$c_p$ = spezifische Wärmekapazität der Luft
$\Delta\vartheta$ = Temperaturdifferenz zwischen Kollektorein- und austritt

damit ist

$$\eta_{Koll} = \frac{\overbrace{\rho_{Koll} \cdot v_{Kamin} \cdot A_{Kamin}}^{\dot{m}} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta}{A_{Koll} \cdot E} \qquad \text{(Kl 3)}$$

$\rho_{Luft}$ = spezifische Dichte der Luft bei $\vartheta_{Koll,aus} = \vartheta_{Kamin,ein}$
$A_{Kamin}$ = Kaminquerschnitt
$v_{Koll} = v_{Kamin}$ = Luftgeschwindigkeit am Kollektoraustritt
= Luftgeschw. am Kamineintritt

### Wärmebilanz

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{zu} - \dot{Q}_{ab} \qquad \text{(Kl 4)}$$

Dabei sind

$\dot{Q}_{zu} = (\tau\alpha)_{Koll,eff} \cdot E \cdot A_{Koll}$ der solare **Absorptionsgewinn** und (Kl 4a)

$\dot{Q}_{ab} = \Delta\vartheta \cdot [\alpha_{S,K;\,Koll}(\vartheta) \cdot A_{Koll}]^{-1}$ die **Verluste** durch Rückstrahlung und Konvektion (Kl 4b)

$(\tau\alpha)_{Koll,eff}$ = Effektives Konversionsprodukt des Kollektors, beinhaltet $\tau$ = Transmissionsgrad der Abdeckung und $\alpha$ = Absorptionsgrad des Kollektorbodens (Absorbers)
$\alpha_{S,K,Koll}(\vartheta)$ = Summe der Wärmeübergangskoeffizienten der, als parallele Vorgänge angesetzten Strahlung und Konvektion bei Kollektortemperatur $\vartheta$ (die Näherung $\alpha_{S,K,Koll}(\vartheta)$ = konstant ist wegen der nichtlinearen Temperaturabhängigkeit sehr grob!)

also

$$\dot{Q} = (\tau\alpha)_{Koll,eff} \cdot E \cdot A_{Koll} - \Delta\vartheta \cdot [\alpha_{S,K;\,Koll}(\vartheta) \cdot A_{Koll}]^{-1} \qquad \text{(Kl 5)}$$

## Kollektorwirkungsgrad und Kollektoraustrittsluftgeschwindigkeit

### Kollektorwirkungsgrad

$$\eta_{Koll} = \frac{\left( (\tau\alpha)_{Koll,eff} \cdot E - \alpha_{S,K,Koll}(\vartheta) \cdot \Delta\vartheta \right) \cdot A_{Koll}}{A_{Koll} \cdot E} = (\tau\alpha)_{Koll,effl} - \frac{(\alpha)_{S,K;Koll} \cdot \Delta\vartheta}{E}$$

(Kl 6); (Kl 7)

Mit (Kl 3) = (Kl 7) erhält man
die

### Luftgeschwindigkeit

am Kollektoraustritt (gleich der am Kamineintritt) $v_{Ka\,min}$ :

$$v_{Ka\,min} = \frac{(\tau\alpha)_{Koll,eff} \cdot A_{Koll} \cdot E - \alpha_{S,K;Koll}(\vartheta) \cdot \Delta\vartheta \cdot A_{Koll}}{\rho_{Koll} \cdot A_{Ka\,min} \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta} \qquad \text{(Kl 8)}$$

Reibungsverluste und Bodenspeicherung sind hier vernachlässigt. Mitbestimmend ist die **Kollektordachhöhe**.

### Beispielwerte

$(\tau\alpha)_{Koll,eff,\,typisch} \approx 0{,}70 \ldots 0{,}80$ und $\alpha_{S,K;Koll} \approx 5 \ldots 6\ W/m^2K$ bei $\Delta\vartheta = 30°C$

## SVT 1.8 Fluidenergiewandlung

### Kaminbemessung

Der Kamin wandelt $\dot{Q}$ in kinetische Energie (konvektive Strömung) und potentielle Energie (Druckabfall an der Turbine). Antreibend sind die entstehenden Dichteunterschiede der Luft (Auftrieb).

**Druckunterschied** $\Delta p_{ges} = p_{Umgebung} - p_{Kaminfuß}$ (Ka9)

$p_{Kaminfuß} = p_{Kollektoraustritt}$

$$\Delta p_{ges} = g \cdot \int_{h=0}^{Hka\,min} \left[\rho_{Umgebung} - \rho_{Ka\,min}\right] \cdot d\,h \qquad \text{(Ka10)}$$

g = Erdbeschleunigung
$H_{Ka}$ = Kaminhöhe
$\rho_{Umgebung}$ = Höhenabhängige Dichte der Umgebungsluft
$\rho_{Kamin}$ = Höhenabhängige Luftdichte im Kamin
$p = h\,\rho\,g$ = Schweredruck

$\Delta p_{ges}$ ist höhenabhängig und nimmt mit der Kaminhöhe zu.
Die Reibungsverluste seien vernachlässigt.

$$\Delta p_{ges} = \Delta p_{statisch} + \Delta p_{dynamisch} \qquad \text{(Ka11)}$$

$\Delta p_{statisch}$: Abfall an der Turbine
$\Delta p_{dynamisch}$: kinetische Energie der Luftströmung

### Strömungsleistung

$$P_{ges} = \Delta p_{ges} \cdot v_{Kamin,\,max} \cdot A_{Kamin} \qquad \text{(Ka12)}$$

$\Delta p_{statisch} = 0$

Die Luft entspannt sich beim Aufstieg im Kamin adiabatisch und kühlt sich (klimaabhängig) in guter Näherung mit etwa 1K/100m Höhe ab.

### Kaminwirkungsgrad

$$\eta_{Kamin} = \frac{P_{ges}}{\dot{Q}} \qquad \text{(Ka13)}$$

**Druckdifferenz**
Die Aufteilung der Druckdifferenz in einen statischen und in einen dynamischen Anteil hängt von der jeweils durch die Turbine entnommenen Leistung ab.

**Fall 1:** **Ohne Turbine**

Die Luft wird maximal beschleunigt

$$P_{ges} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2_{Kamin,\,max} \qquad \text{(Ka14)}$$

**Vereinfachende Annahme:** Das Temperaturprofil (Höhenunterschied) innerhalb und außerhalb des Kamins soll parallel mit 1 K / 100m Höhe verlaufen.

**Geschwindigkeit der freien Konvektionsströmung**

$$V_{Kamin,\,max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{Ka\,min} \cdot \frac{\Delta T}{T_{Umgebung}}} \qquad \text{(Ka15)}$$

(Ka13) + (Kl 2) + (Ka14) + (Ka15) $\Rightarrow$

**Kaminwirkungsgrad**

$$\eta_{Kamin} = \frac{g \cdot H_{Ka\,min}}{c_p \cdot T_{Umgebung}} \qquad \text{(Ka16)}$$

**Interpretation**
Der Kaminwirkungsgrad wird hauptsächlich durch die **Kaminhöhe** bestimmt. Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturerhöhung im Kollektor spielen keine Rolle!

**In der Strömung enthaltene Leistung**

(Ka13) + (Ka16) + (Kl 2) + Erläuterung $\dot{m}$ über (Kl 3) ergeben

$$P_{ges} = \frac{g \cdot H_{Ka\,min}}{T_{Umgebung}} \cdot \rho_{Koll} \cdot v_{Ka\,min} \cdot A_{Ka\,min} \cdot \Delta\vartheta \qquad \text{(Ka17)}$$

**Druckdifferenz**
Mit (Ka12) und (Ka17) ist

$$\Delta p_{ges} = \rho_{Koll} \cdot g \cdot H_{Ka\,min} \cdot \frac{\Delta T}{T_{Umgebung}} \qquad \text{(Ka18)}$$

$$(\Delta\vartheta = \Delta T\ !)$$

**Analogie**

☞ Vergleichen Sie FW 3 „Hydrodynamische Energiewandler" !

Druckgefälle $\Delta p_{Druckröhre} = \rho_{H2O}\ g \cdot H$

**Aufwindkraftwerk** ⟷ **„Wasserkraftwerk in der Wüste"**

[Jörg Schlaich/Wolfgang Schiel]

## SVT 1.9 Mechanische Energiewandlung

**DRITTE WANDLUNGSSTUFE:**

### Konvektionsströmungsenergie →Mechanische Rotationsenergie

**Aerodynamischer Energiewandler (Windturbine)**
Die dritte Wandlungsstufe enthält einen aerodynamischen Energiewandler ( ☞ Vergleichen Sie FW 1, 2 ! ), zum Beispiel eine (oder mehrere) Windturbine(n). **Translationsenergie** der Luftströmung wird in **Rotationsenergie** einer Antriebsturbine, zum Beispiel eines mechanovoltaischen Wandlers ( ☞ Vergleichen Sie MV 1 bis MV 4!), gewandelt (Umlenkung des Strömungsfeldes).

**Unterschiede zur herkömmlichen Windturbine**

Im Aufwindkraftwerk verwendet man **ummantelte** Windturbinen, im Gegensatz zur freilaufenden Windturbine bei Windkraftanlagen. Während die freilaufende Windturbine geschwindigkeitsgestuft ist, arbeitet die ummantelte Windturbine **druckgestuft**. Damit entspricht sie der Funktionsweise der **Wasserturbinen** ( ☞ Theorie siehe Skript FW 3, Seiten 37 ff !). Der statische Druck in der Röhre wird abgebaut. Bezogen auf den Rotordurchmesser ergibt sich eine achtfache Energieausbeute, verglichen mit der freilaufenden Turbine. Die Luftgeschwindigkeit vor und hinter der Turbine ändert sich hingegen kaum. Zielstellung ist die entziehbare Leistung (proportional Produkt aus Volumenstrom und Druckabfall). Mit der Blattverstellung regelt man den Luftstrom. Das Optimum erhält man bei einem Druckabfall von zwei Dritteln der gesamten Druckdifferenz ( ☞ vgl. Skript FW 2 !). ( ☞ siehe auch Seite 28 ! ). Im Gegensatz zu Dampfturbinen wird für den Prozeß keine Kühlung und damit auch **kein Kühlwasser** benötigt !

**Statischer Druckabfall in der Turbine**
Die sich mit und in der Strömung drehende Turbine erzeugt einen statischen Druckabfall $\Delta p_{statisch}$ , der in erster Näherung mit der ***Bernoulli*** – Gleichung (Daniel *Bernoulli,* 1700 - 1782) beschrieben werden kann:

$$\Delta p_{statisch} = \Delta p_{ges} - \tfrac{1}{2}\, \rho_{Kamin} \cdot v^2_{Kamin} \qquad \text{(T19)}$$

( ☞ Vergleichen Sie Gleichung (Ka11) ! )

**Theoretisch nutzbare Turbinenleistung**
An der Turbine fällt folgende Leistung ab

$$P_{Turbine} = v_{Kamin} \cdot A_{Kamin} \cdot \Delta p_{Statisch} \qquad \text{(T20)}$$

**Elektrische Analogie**

Elektrische Leistung $P = U \cdot I$

*Analoge Größen* →

$U$ → Druckgefälle $\Delta p_{Statisch}$

$I$ → Volumenstrom $\dot{V} = v_{Kamin} \cdot A_{Kamin}$

Wie die Spannung U ( ≙ Druckgefälle $\Delta p_{Statisch}$) und der Strom I ( ≙ Volumenstrom $\dot{V}$ ) ergibt das Produkt $P = \Delta p_{Statisch} \cdot \dot{V}$ die **Leistung P** (vgl.T20). Jedoch besteht über die ***Bernoulli***-Gleichung (T19) eine Verknüpfung zwischen $\Delta p_{statisch}$ und $\dot{V} = v_{Kamin} \cdot A_{Kamin}$ . Es ist mit

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{2A^2}{\rho} \cdot \left(\Delta p_{ges} - \Delta p_{statisch}\right)} \qquad \text{(T21)}$$

und mit $P = \Delta p_{Statisch} \cdot \dot{V}$ die theoretisch durch die Turbine entnommene Leistung

$$P = \sqrt{\frac{2A^2}{\rho} \cdot \Delta p_{stat}^2 \cdot \left(\Delta p_{ges} - \Delta p_{statisch}\right)} \qquad \text{(T22)}$$

Untersucht man (T22), gibt es ein **Maximum** an der Stelle

$$\Delta p_{stat} = 2/3\ \Delta p_{ges}\,. \qquad \text{(T23)}$$

Die größte Leistung kann entnommen werden, wenn der Druck auf 1/3 abfällt bzw. wenn 2/3 des Druckabfalls durch die Turbine hervorgerufen werden. Es fallen hier Analogien zur Wind- und Wasserkraftnutzung auf ( ☞ FW1 und FW2). Unterschiede gibt es durch die Verkoppelung gemäß Gl (T19).

**Maximum Power Point**
Dieser Maximum-Power-Point (MPP) nach (T23) entspricht der maximalen Fläche im nachfolgenden Kennfeld. Die optische Analogie zur Photovoltaik ist auffallend (☞Vgl. PV3!).

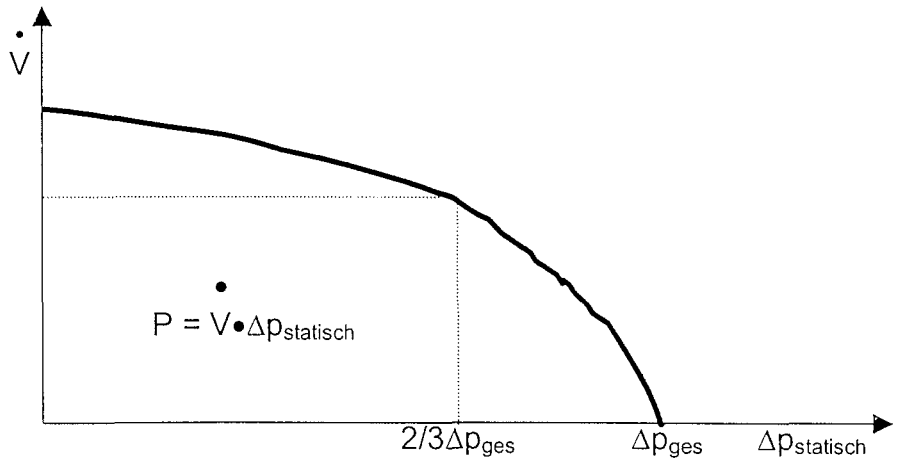
Es ist $v_{Kamin,\ MPP}$

$$v_{Ka\min,MPP} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{ges}}{3 \cdot \rho_{Ka\min}}} \qquad \text{(T24)}$$

bzw.

$$\dot{\ }_{Ka\min,MPP} = \sqrt{\frac{2\ A^2 \cdot \Delta p_{ges}}{3 \cdot \rho_{Ka\min}}} \qquad \text{(T25)}$$

**Kennliniendarstellung**
Grafisch ergibt sich der analoge Zusammenhang ( ☞vgl. PV-Kennlinie !)




**Weitere Analogien**:
$\Delta p_{statisch}$ = 0 (entspricht analogem elektrischen Kurzschluß!)
$\Delta p_{statisch} = \Delta p_{ges}$ (entspricht analogem elektrischen Leerlauf!)
dazwischen bei $2/3\Delta p_{ges}$ (vgl. maximal entnehmbare Windleistung bei 2/3 Druckabfall →Betz-Wirkungsgrad) liegt der MPP mit der maximalen Fläche P. Komplizierter ist lediglich der Zusammenhang zwischen $\Delta p_{statisch}$ und $v_{Kamin}$ die beide nicht unabhängig voneinander sind!

**Fall 2:** **Mit Turbine**

Die Turbine kann folgende maximale Leistung **aufnehmen:**

$$P_{Turbine,\ auf,\ max} = 2/3 \cdot \eta_{Koll} \cdot \eta_{Kamin} \cdot A_{Koll} \cdot E \qquad (T23)$$

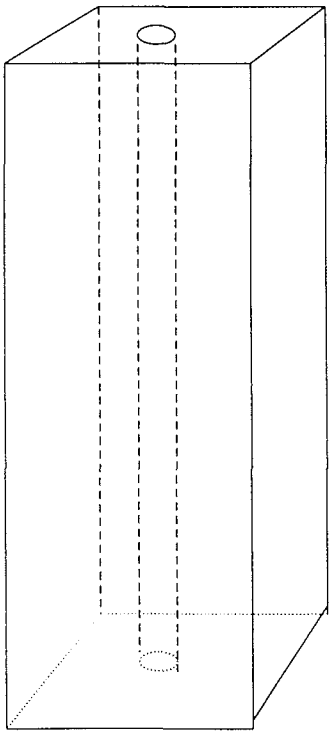
$$P_{Turbine,\ auf,\ max} = 2/3 \cdot \eta_{Koll} \cdot g / (c_p \cdot T_{Umgebung}) \cdot H_{Kamin} \cdot A_{Koll} \cdot E \qquad (T24)$$

**Erkenntnis**
Die Leistung der Aufwindanlage ist proportional zum Produkt ( $H_{Kamin} \cdot A_{Koll}$ )

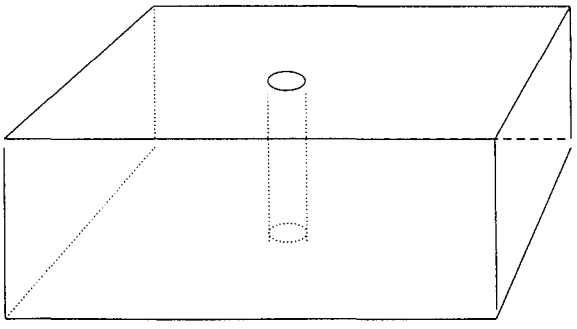
$$P_{Turbine} \sim ( H_{Kamin} \cdot A_{Koll} ) \qquad (T25)$$

**Optimum**
Es gibt **kein** physikalisch ableitbares Optimum, sondern lediglich ein Kostenoptimum. Standortabhängig entscheiden Arbeitskräfte, Lohnstruktur, verfügbare Materialien usw. über die beste Lösung. Ist Glas billig und sind die Lohnkosten für den Kollektor vertretbar, entscheidet man sich für einen überproportionalen Kollektor. Ist hingegen zum Beispiel Beton und der Turmbau zu bevorteilen, wird dieser entscheiden.

**Das Produkt ( $H_{Kamin} \cdot A_{Koll}$ ) entspricht dem über der Kollektorgrundfläche vom Turm aufgespannten Volumen.**



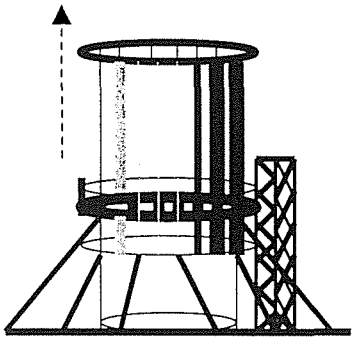
Beide Anlagen besitzen die **gleiche** Leistung!



## SVT 1.10 Erfahrungen aus dem Projekt Manzanares

Nach Jörg Schlaich: The Solar Chimney. Elektricity from the Sun. Edition Axel Menges

**Anlagenbeschreibung**
**Experimentieranlage**, 50 kW Spitzenleistung.
Nach Voruntersuchungen und Windkanalerprobungen 1981/ 82 errichtet.
**Finanzierung**: Bundesministerium für Forschung und Technologie (13 Mio DM).
**Flächenbereitstellung**: Union Electrica Fenosa (spanisches EVU)
**Ort**: Manzanares, etwa 150 km von Madrid enfernt.
**Zielstellung**: Meßtechn. Verifizierung der erarb.Theorie unter realist. Bedingungen.
Kaminhöhe 195 Meter bei 10 Meter Durchmesser; Kollektordurchmesser 240 Meter. Über 180 Sensoren erfaßten sekundlich das Anlagenverhalten. Erprobung unterschiedlicher Bauweisen. Kollektordachhöhe 2 Meter ( 2 bis 6 m für Großanlagen; für Manzanares wären 0,5 m optimal gewesen, deshalb zwar geringere Leistung aber gute Zugänglichkeit und Ermöglichung von Versuchspflanzungen als Gewächshaus). Tragekonstruktion preisgünstig nach Hängemattenprinzip. Verschiedene Folienarten (jeweils 6 x 6 m) und Glas (4mm Einfachglas) auf Zugbändern (im Abstand von 1m) bildeten das 45.000 Quadratmeter -Dach des Kollektors. Dünne Stahlstützen im Raster. Nach einer Versuchsdauer von 3 Jahren sollte die Anlage wieder ohne Spuren beseitigt werden. Der Kamin, eine Trapezblechröhre, sollte wiederverwertbar sein. Blechstärke **nur 1,25 mm** (!!!). Sickentiefe 150 mm. Vertikalstöße alle 8,6 m, alle 4m durch außenliegende Fachwerkträger ausgesteift. Ein, von 8 Rohrstützen getragener Ring in 10 m Höhe trug die Kaminröhre. Ein vorgespannter kunststoffbeschichteter Gewebemantel bildete einen strömungsgünstigen Übergang zwischen Kollektor und Kamin. Da übliche Abspannseile oder eine freitragende Betonkonstruktion den Kostenrahmen gesprengt hätten, wählte man dünne Abspannstangen aus Stahl, vierfach in der Höhe und jeweils in drei Richtungen.
Die Montage der Röhre erfolgte im **„Takthebeverfahren“** vom Boden aus. Hydraulische Pressen hoben von unten die Röhre an, fügten Teile ein und bewegten die Rohrabschnitte nach oben, wobei gleichzeitig die Abspannungen nachgezogen wurden. Wenige Fachleute reichten aus. Die verwendete Bauweise war bewußt kostensparend und demzufolge auch nicht auf eine lange Lebensdauer ausgelegt, sonst hätte man eventuell die Stahlbetonbauweise vorgezogen.
Die Turbine nutzte einen **Vierblattrotor** mit vertikaler Achse und wurde in 9 Meter Höhe auf einem separaten (strömungsgünstigen) Stahlfachwerkgerüst angeordnet.



Prinzip des Takthebeverfahrens

Verglichen mit „normalen“ Windkraftturbinen ( ☞ siehe Skript FW 2 !) sind die Strömungsverhältnisse im Aufwindkraftwerk wesentlich stabiler und „berechenbarer“. Schnelle Änderungen, Böen, Strömungsablösungen kommen normalerweise nicht vor. Der Schutz der **Blattoberfläche** braucht Hagel, Eisschlag und anderes nicht zu berücksichtigen. Die **Blattanstellwinkel** konnten sich (quasistatisch) den Temperatur- und Anströmverhältnissen **optimal** anpassen. Ein **zweistufiges Stirnradgetriebe** (150 / 1500 $min^{-1}$) koppelte Turbine und Generator. Ab 2,5 m/s (!) startete die Turbine, der Generator speiste in das öffentliche Netz.

**Druckdifferenz**
Mit (Ka12) und (Ka17) ist

$$\Delta p_{ges} = \rho_{Koll} \cdot g \cdot H_{Ka\,min} \cdot \frac{\Delta T}{T_{Umgebung}} \qquad \text{(Ka18)}$$

$$(\Delta\vartheta = \Delta T\,!)$$

**Analogie**

☞ Vergleichen Sie FW 3 „Hydrodynamische Energiewandler" !

Druckgefälle $\Delta p_{Druckröhre} = \rho_{H2O}\ g \cdot H$

**Aufwindkraftwerk** ⟷ **„Wasserkraftwerk in der Wüste"**

[Jörg Schlaich/Wolfgang Schiel]

## SVT 1.9 Mechanische Energiewandlung

**DRITTE WANDLUNGSSTUFE:**

### Konvektionsströmungsenergie →Mechanische Rotationsenergie

**Aerodynamischer Energiewandler (Windturbine)**
Die dritte Wandlungsstufe enthält einen aerodynamischen Energiewandler ( ☞ Vergleichen Sie FW 1, 2 ! ), zum Beispiel eine (oder mehrere) Windturbine(n). **Translationsenergie** der Luftströmung wird in **Rotationsenergie** einer Antriebsturbine, zum Beispiel eines mechanovoltaischen Wandlers ( ☞ Vergleichen Sie MV 1 bis MV 4!), gewandelt (Umlenkung des Strömungsfeldes).

**Unterschiede zur herkömmlichen Windturbine**

Im Aufwindkraftwerk verwendet man **ummantelte** Windturbinen, im Gegensatz zur freilaufenden Windturbine bei Windkraftanlagen. Während die freilaufende Windturbine geschwindigkeitsgestuft ist, arbeitet die ummantelte Windturbine **druckgestuft**. Damit entspricht sie der Funktionsweise der **Wasserturbinen** ( ☞ Theorie siehe Skript FW 3, Seiten 37 ff !). Der statische Druck in der Röhre wird abgebaut. Bezogen auf den Rotordurchmesser ergibt sich eine achtfache Energieausbeute, verglichen mit der freilaufenden Turbine. Die Luftgeschwindigkeit vor und hinter der Turbine ändert sich hingegen kaum. Zielstellung ist die entziehbare Leistung (proportional Produkt aus Volumenstrom und Druckabfall). Mit der Blattverstellung regelt man den Luftstrom. Das Optimum erhält man bei einem Druckabfall von zwei Dritteln der gesamten Druckdifferenz ( ☞ vgl. Skript FW 2 !). ( ☞ siehe auch Seite 28 ! ). Im Gegensatz zu Dampfturbinen wird für den Prozeß keine Kühlung und damit auch **kein Kühlwasser** benötigt !

**Statischer Druckabfall in der Turbine**
Die sich mit und in der Strömung drehende Turbine erzeugt einen statischen Druckabfall $\Delta p_{statisch}$ , der in erster Näherung mit der ***Bernoulli*** – Gleichung (Daniel *Bernoulli,* 1700 - 1782) beschrieben werden kann:

$$\Delta p_{statisch} = \Delta p_{ges} - \tfrac{1}{2}\, \rho_{Kamin} \cdot v^2_{Kamin} \qquad \text{(T19)}$$

( ☞ Vergleichen Sie Gleichung (Ka11) ! )

**Theoretisch nutzbare Turbinenleistung**
An der Turbine fällt folgende Leistung ab

$$P_{Turbine} = v_{Kamin} \cdot A_{Kamin} \cdot \Delta p_{Statisch} \qquad \text{(T20)}$$

**Elektrische Analogie**

Elektrische Leistung $P = U \cdot I$

*Analoge Größen* → Volumenstrom $\dot{V} = v_{Kamin} \cdot A_{Kamin}$

*Analoge Größen* → Druckgefälle $\Delta p_{Statisch}$

Wie die Spannung U ( ≙ Druckgefälle $\Delta p_{Statisch}$) und der Strom I ( ≙ Volumenstrom $\dot{V}$ ) ergibt das Produkt $P = \Delta p_{Statisch} \cdot \dot{V}$ die **Leistung P** (vgl.T20). Jedoch besteht über die ***Bernoulli***-Gleichung (T19) eine Verknüpfung zwischen $\Delta p_{statisch}$ und $\dot{V} = v_{Kamin} \cdot A_{Kamin}$ . Es ist mit

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{2A^2}{\rho} \cdot \left(\Delta p_{ges} - \Delta p_{statisch}\right)} \qquad \text{(T21)}$$

und mit $P = \Delta p_{Statisch} \cdot \dot{V}$ die theoretisch durch die Turbine entnommene Leistung

$$P = \sqrt{\frac{2A^2}{\rho} \cdot \Delta p_{stat}^2 \cdot \left(\Delta p_{ges} - \Delta p_{statisch}\right)} \qquad \text{(T22)}$$

Untersucht man (T22), gibt es ein **Maximum** an der Stelle

$$\Delta p_{stat} = 2/3\ \Delta p_{ges}\,. \qquad \text{(T23)}$$

Die größte Leistung kann entnommen werden, wenn der Druck auf 1/3 abfällt bzw. wenn 2/3 des Druckabfalls durch die Turbine hervorgerufen werden. Es fallen hier Analogien zur Wind- und Wasserkraftnutzung auf ( ☞ FW1 und FW2). Unterschiede gibt es durch die Verkoppelung gemäß Gl (T19).

**Maximum Power Point**
Dieser Maximum-Power-Point (MPP) nach (T23) entspricht der maximalen Fläche im nachfolgenden Kennfeld. Die optische Analogie zur Photovoltaik ist auffallend (☞Vgl. PV3!).

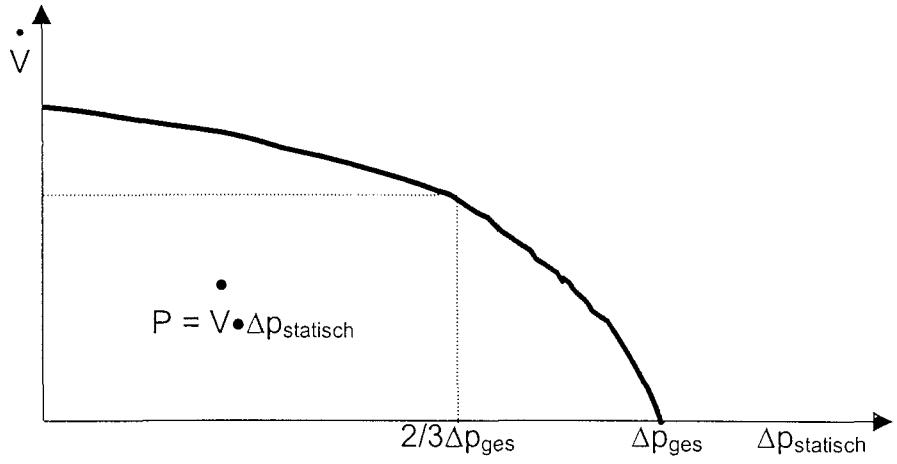
Es ist $v_{Kamin,\ MPP}$

$$v_{Ka\,min,MPP} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{ges}}{3 \cdot \rho_{Ka\,min}}} \qquad \text{(T24)}$$

bzw.

$$\dot{\ }_{Ka\,min,MPP} = \sqrt{\frac{2\,A^2 \cdot \Delta p_{ges}}{3 \cdot \rho_{Ka\,min}}} \qquad \text{(T25)}$$

**Kennliniendarstellung**
Grafisch ergibt sich der analoge Zusammenhang ( ☞vgl. PV-Kennlinie !)




**Weitere Analogien**:
$\Delta p_{statisch}$ = 0 (entspricht analogem elektrischen Kurzschluß!)
$\Delta p_{statisch} = \Delta p_{ges}$ (entspricht analogem elektrischen Leerlauf!)
dazwischen bei $2/3\Delta p_{ges}$ (vgl. maximal entnehmbare Windleistung bei 2/3 Druckabfall →Betz-Wirkungsgrad) liegt der MPP mit der maximalen Fläche P. Komplizierter ist lediglich der Zusammenhang zwischen $\Delta p_{statisch}$ und $v_{Kamin}$ die beide nicht unabhängig voneinander sind!

**Fall 2:** **Mit Turbine**

Die Turbine kann folgende maximale Leistung **aufnehmen:**

$$P_{Turbine,\ auf,\ max} = 2/3 \cdot \eta_{Koll} \cdot \eta_{Kamin} \cdot A_{Koll} \cdot E \qquad (T23)$$

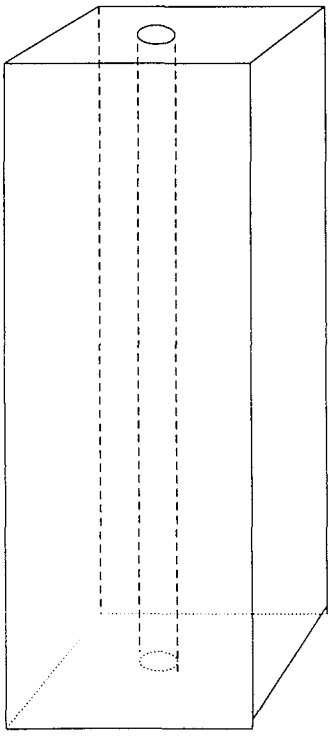
$$P_{Turbine,\ auf,\ max} = 2/3 \cdot \eta_{Koll} \cdot g / (c_p \cdot T_{Umgebung}) \cdot H_{Kamin} \cdot A_{Koll} \cdot E \qquad (T24)$$

**Erkenntnis**
Die Leistung der Aufwindanlage ist proportional zum Produkt ( $H_{Kamin} \cdot A_{Koll}$ )

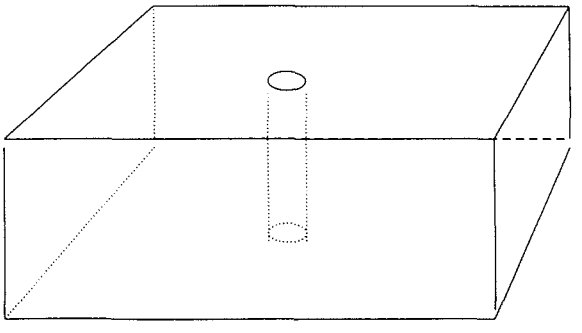
$$P_{Turbine} \sim ( H_{Kamin} \cdot A_{Koll} ) \qquad (T25)$$

**Optimum**
Es gibt **kein** physikalisch ableitbares Optimum, sondern lediglich ein Kostenoptimum. Standortabhängig entscheiden Arbeitskräfte, Lohnstruktur, verfügbare Materialien usw. über die beste Lösung. Ist Glas billig und sind die Lohnkosten für den Kollektor vertretbar, entscheidet man sich für einen überproportionalen Kollektor. Ist hingegen zum Beispiel Beton und der Turmbau zu bevorteilen, wird dieser entscheiden.

**Das Produkt ( $H_{Kamin} \cdot A_{Koll}$ ) entspricht dem über der Kollektorgrundfläche vom Turm aufgespannten Volumen.**



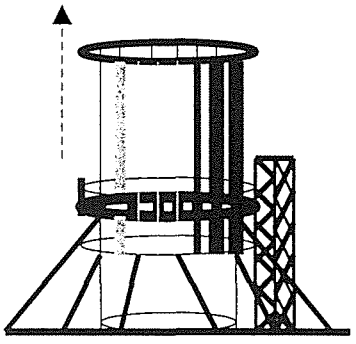
Beide Anlagen besitzen die **gleiche** Leistung!



## SVT 1.10 Erfahrungen aus dem Projekt Manzanares

Nach Jörg Schlaich: The Solar Chimney. Elektricity from the Sun. Edition Axel Menges

**Anlagenbeschreibung**
**Experimentieranlage**, 50 kW Spitzenleistung.
Nach Voruntersuchungen und Windkanalerprobungen 1981/ 82 errichtet.
**Finanzierung**: Bundesministerium für Forschung und Technologie (13 Mio DM).
**Flächenbereitstellung**: Union Electrica Fenosa (spanisches EVU)
**Ort**: Manzanares, etwa 150 km von Madrid enfernt.
**Zielstellung**: Meßtechn. Verifizierung der erarb.Theorie unter realist. Bedingungen.
Kaminhöhe 195 Meter bei 10 Meter Durchmesser; Kollektordurchmesser 240 Meter. Über 180 Sensoren erfaßten sekundlich das Anlagenverhalten. Erprobung unterschiedlicher Bauweisen. Kollektordachhöhe 2 Meter ( 2 bis 6 m für Großanlagen; für Manzanares wären 0,5 m optimal gewesen, deshalb zwar geringere Leistung aber gute Zugänglichkeit und Ermöglichung von Versuchspflanzungen als Gewächshaus). Tragekonstruktion preisgünstig nach Hängemattenprinzip. Verschiedene Folienarten (jeweils 6 x 6 m) und Glas (4mm Einfachglas) auf Zugbändern (im Abstand von 1m) bildeten das 45.000 Quadratmeter -Dach des Kollektors. Dünne Stahlstützen im Raster. Nach einer Versuchsdauer von 3 Jahren sollte die Anlage wieder ohne Spuren beseitigt werden. Der Kamin, eine Trapezblechröhre, sollte wiederverwertbar sein. Blechstärke **nur 1,25 mm** (!!!). Sickentiefe 150 mm. Vertikalstöße alle 8,6 m, alle 4m durch außenliegende Fachwerkträger ausgesteift. Ein, von 8 Rohrstützen getragener Ring in 10 m Höhe trug die Kaminröhre. Ein vorgespannter kunststoffbeschichteter Gewebemantel bildete einen strömungsgünstigen Übergang zwischen Kollektor und Kamin. Da übliche Abspannseile oder eine freitragende Betonkonstruktion den Kostenrahmen gesprengt hätten, wählte man dünne Abspannstangen aus Stahl, vierfach in der Höhe und jeweils in drei Richtungen.
Die Montage der Röhre erfolgte im **„Takthebeverfahren“** vom Boden aus. Hydraulische Pressen hoben von unten die Röhre an, fügten Teile ein und bewegten die Rohrabschnitte nach oben, wobei gleichzeitig die Abspannungen nachgezogen wurden. Wenige Fachleute reichten aus. Die verwendete Bauweise war bewußt kostensparend und demzufolge auch nicht auf eine lange Lebensdauer ausgelegt, sonst hätte man eventuell die Stahlbetonbauweise vorgezogen.
Die Turbine nutzte einen **Vierblattrotor** mit vertikaler Achse und wurde in 9 Meter Höhe auf einem separaten (strömungsgünstigen) Stahlfachwerkgerüst angeordnet.



Prinzip des Takthebeverfahrens

Verglichen mit „normalen“ Windkraftturbinen ( ☞ siehe Skript FW 2 !) sind die Strömungsverhältnisse im Aufwindkraftwerk wesentlich stabiler und „berechenbarer“. Schnelle Änderungen, Böen, Strömungsablösungen kommen normalerweise nicht vor. Der Schutz der **Blattoberfläche** braucht Hagel, Eisschlag und anderes nicht zu berücksichtigen. Die **Blattanstellwinkel** konnten sich (quasistatisch) den Temperatur- und Anströmverhältnissen **optimal** anpassen. Ein **zweistufiges Stirnradgetriebe** (150 / 1500 $min^{-1}$) koppelte Turbine und Generator. Ab 2,5 m/s (!) startete die Turbine, der Generator speiste in das öffentliche Netz.

**Dauerbetrieb**
32 Monate vollautomatischer Dauerbetrieb ab Mitte 1986 (Im Mittel 8,9 h/d = 8611 h); höchstens 1 Überwachungsperson
Verfügbarkeit >95%
Folienschäden durch Sturm wurden ohne Abschaltung repariert
Automatische Anlagenabschaltungen (durch Ausfälle des spanischen Netzes) ergaben 5%

**Ergebnisse**
Ab 1982 wurden insgesamt 15.000 Betriebsstunden absolviert.

In der neunjährigen Projektlaufzeit wurden
-unterschiedliche Kollektorabdeckungen und Bodenmaterialien erprobt
-umfangreiche Meßdaten erfaßt
-das Speicherverhalten des Erdbodens unter Verwendung unterschiedlicher Oberflächenbeschichtungen untersucht
-Turbinenregelungen erprobt
-Wartungs- und Betriebskosten analysiert
-ein Simulationsprogramm für weitere Projekte verifiziert

Glaseindeckung erwies sich gegenüber der Folieneindeckung als vorteilhaft (Haltbarkeit, Versprödung, Sturmbeständigkeit, Selbstreinigung)
Turbine nach 7jährigem Betrieb völlig in Ordnung
Abspannstangen waren nicht korrosionsgeschützt (Kostengründe, begrenztes Versuchsprogramm), deshalb starke Verrostung → 1989 Sturmschaden (Trotzdem: statt geplanter 3 Jahre: 8 Jahre !
Ergebnisse stimmten sehr gut mit geplanten Daten überein !

## SVT 1.11 Auslegungsbeispiele

Für eine angenommene sehr gute Sonneneinstrahlung von 2300 kWh /m$^2$a und auf südeuropäisches Lohnniveau abgestimmt, gibt das Ingenieurbüro ***Schlaich, Bergermann und Partner*** die nachfolgenden günstigsten Abmessungen für einige Leistungsklassen von Aufwindkraftwerken an (Für andere Verhältnisse können sich auch andere Bemessungen als günstig erweisen ; ☞ vgl. Optimum !).

| Parameter | Einheit | Manzanares | AWK 5 | AWK 30 | AWK 100 | AWK 200 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| El. Nennleistg. | Megawatt | 0,05 | 5 | 30 | 100 | 200 |
| Turmhöhe | Meter | 194,6 | 445 | 750 | 950 | 1500 |
| Turmdurch-messer | Meter | 10 | 54 | 84 | 115 | 175 |
| Kollektor-durchmesser | Meter | 238 | 1110 | 2200 | 3600 | 4000 |
| Kollektorfläche | Quadratmeter | 44.488 | 947.100 | 3.751.000 | 10.080.000 | (78.500.000) |
| Anz. d. Turbinen | Vertikale Achse | 1 | - | - | - | |
| | Horizontale Achse | - | 33 | 35 | 36 | |
| Turbinen-durchmesser | Meter | | 10 | 15 | 20 | |
| Drehzahl | Pro Minute | | 153 | 132 | 105 | |
| Schnelllaufzahl | | | 10 | 10 | 8 | |
| Temperaturhub i. Koll. | Kelvin | (17) | 25,6 | 31,0 | 35,7 | (35) |
| Gesamt-druckdiff. | Pascal | | 383,3 | 767,1 | 1100,5 | |
| Reibungs-druckverlust | Pascal | | 28,6 | 62,9 | 80,6 | |
| Druckverlust a. Kaminaustritt | Pascal | | 40,4 | 75,1 | 117,5 | |
| Druckabfall an Turbine | Pascal | | 314,3 | 629,1 | 902,4 | |
| Aufwind-geschwindigkeit | Meter/ Sekunde | 9 | 9,1 | 12,6 | 15,8 | (16,1) |
| Kollektor-wirk.grad | Prozent | 23,6 | 56,24 | 54,72 | 52,62 | |
| Maschinen-wirk.grad | Prozent | 69,30 | 77,00 | 78,30 | 80,10 | |
| Turm-wirk.grad | Prozent | 0,53 | 1,45 | 2,33 | 3,10 | |
| Anlagen-wirk.grad | Prozent | 0,09 | 0,63 | 1,00 | 1,31 | |
| Gesamt-betr.stunden | Stunden/ Jahr | 3.157 | 8.423 | 8.506 | 8.723 | |
| Nachtbetr.-stunden | Stunden/ Jahr | 244 | 4.992 | 5.071 | 5.080 | |
| Vollast-stunden | Stunden/ Jahr | | 2.780 | 2.913 | 3.052 | |
| Energie-erzeugung | Gigawatt-stunden/ Jahr | 0,044 | 13,9 | 87,4 | 305,2 | 600 |
| Bemerkung | | Experimental-anlage 1987 | | | | |

Quellen: Jörg Schlaich: Das Aufwindkraftwerk, Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart 1994
Claus Ehrenberg: Solarthermische Kraftwerke, VDI Informationsschriften 1997

## SVT 1.12 Kontinuierlicher Tag- / Nacht – Betrieb

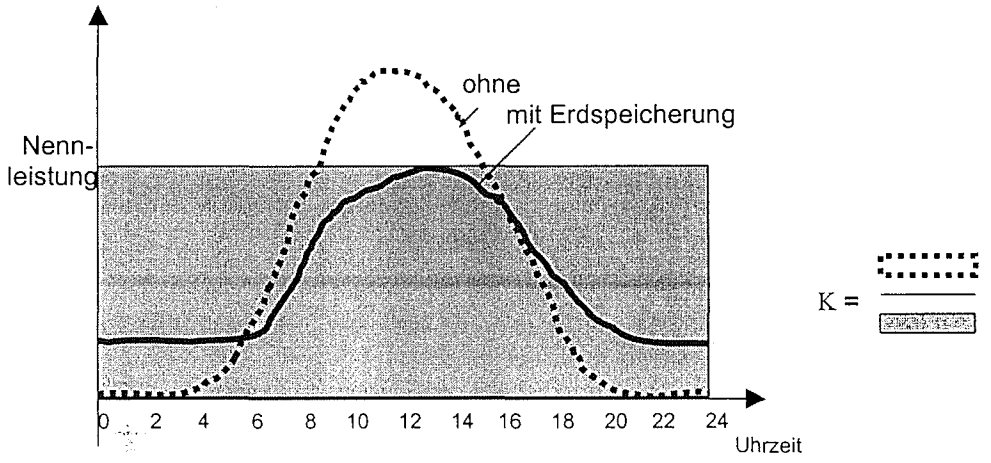
Nach Jörg **Schlaich** and Wolfgang **Schiel**: Supplement to the book „The Solar Chimney", edition September 1994, Schlaich Bergermann und Partner, Struktural Consulting Engineers, Stuttgart, August 1996, im August 2001 freundlich von Herrn Wolfgang **Schiel** übermittelt.

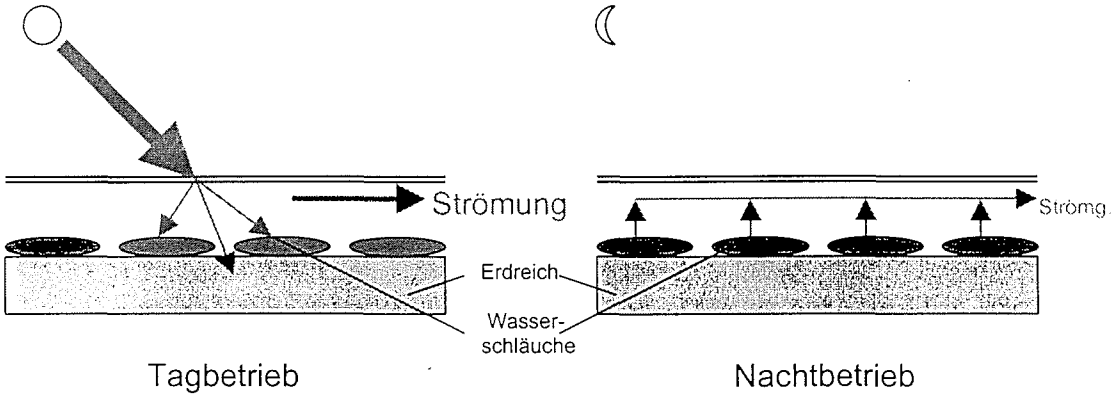
### Betriebseffektivität

$$\text{Kapazitätsfaktor } K = \frac{\text{Vollaststunden}}{\text{Jahresstunden (24 x 365 h)}}$$

(☞ Zahlenbeispiele Tabelle S. 32 )

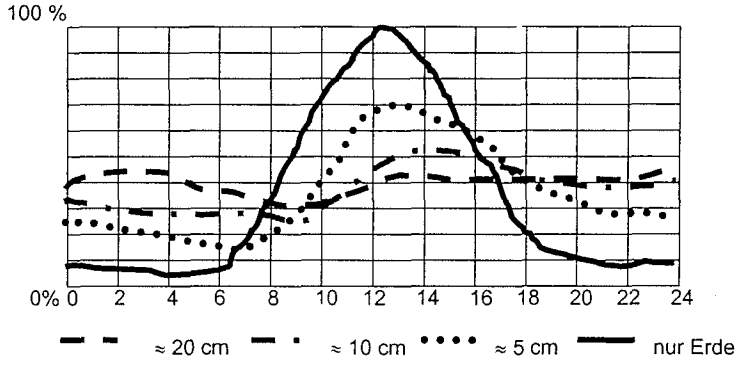
### Normale Energieproduktion




Wassergefüllte und unter Berücksichtigung der möglichen Druck- und Verdampfungsverhältnisse verschlossene thermisch schwarze Schläuche (ähnlich „Schwimmbadabsorbern") liegen auf dem (ebenfalls geschwärzten) Erduntergrund. Das Wasservolumen entspricht einer effektiven Speicherschicht von 5 ··· 20 cm.

Wasserschichtdicke




Mit einer 20cm-Wasserschicht ist die Nachtproduktion bereits größer als die Tagesproduktion. Effektiv ist in diesem Bild eine 10cm-Schicht, die eine stabile kontinuierliche Produktion gestattet. Mit Wasserpumpen kann die Wasserfüllung variiert und Lastgängen angepaßt werden.

## SVT 1.13 Übungsbeispiel

**Aufgabe:** Eine Aufwindkraftanlage mit einem Kollektordurchmesser von 2200m und einem 750m hohen und 84m im Durchmesser zählenden Kamin besitzt einen Generator mit einem Wirkungsgrad von 80 %. Berechnen Sie für eine Einstrahlungsleistung von 1000 W je Quadratmeter die mittlere abgegebene elektrische Leistung und den Anlagenwirkungsgrad !

**Erweiterung der Aufgabe:** Für eine 10 cm - Wasserschicht (Schläuche 0,5 cm Wandstärke), bündig verlegt soll näherungsweise die Speicherenergie und Speicherreichweite bei 40prozentiger Leistung berechnet werden !

## SVT 1.14 Anhang: Messung beeinflussender Größen

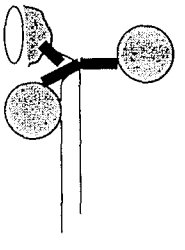
### Temperatur

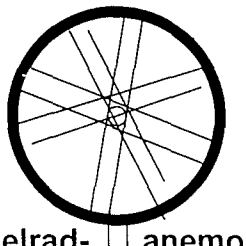
**Lufttemperatur**
Strahlungsgeschützte Thermometer, z.B. Temperaturfühler in Edelstahlrohren (Meßbereiche zwischen –200 ···+600°C; $t_{99} \approx 9s$; NiCr-Ni oder zwischen –40 ···+130°C; $t_{99} \approx 60s$; NTC)

**Oberflächentemperatur**
Anlegbare, aufklebbare Thermoelemente, , Magnetfühler (unterschiedliche Meßspitzengrößen; Meßbereiche zwischen –50 ···+400°C; $t_{99} \approx 40s$; Pt 100 oder zwischen –200 ···+600°C; $t_{99} \approx 25s$; NiCr-Ni oder zwischen –200 ···+700°C; $t_{99} \approx 3s$; NiCr-Ni oder zwischen –50 ···+150°C; $t_{99} \approx 40s$; Pt 100 oder zwischen –50 ···+170/400°C; $t_{99} \approx 25s$; NiCr-Ni); Thermopaare (bis +200 °C; 0,1 mm), ggf. Wärmeleitpaste verwenden oder kontaktlose Infrarot-Oberflächentemperaturfühler (unterschiedliche Meßfleckgrößen; Meßbereich von –18 ···+260°C; $t_{99} \approx 2s$)

### Windgeschwindigkeit

**1. Schalenkreuzanemometer**

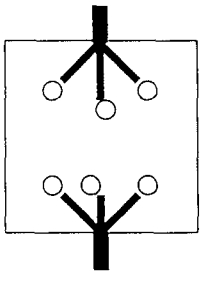




**2. Flügelrad- anemometer**
(0,25 ··· 20,0 m/s)

response-Länge: $l_{resp} = v_0 \tau$
$\tau$ = Zeitkonstante des Meßgerätes ($l_{resp} \approx 2...5m$)

**4. Ultraschallanemometer**



**Hinweg:** $t_1 = \frac{s}{c+v}$

**Rückweg:** $t_1 = \frac{s}{c-v}$

$v = \frac{s}{2}\left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}\right)$ ⇒ unabhängig von der Schallgeschwindigkeit (= f(Luftdruck; Feuchte)

s = Abstand ; c = Schallgeschwindigkeit ; v = Windgeschwindigkeit

**5. Hitzdrahtanemometer**

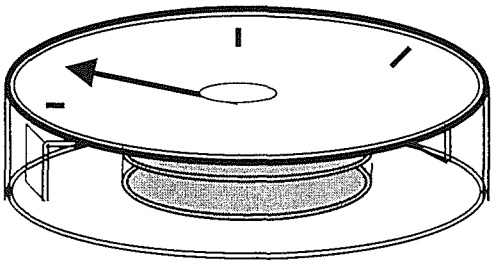
**Spannungsfall; Kühlung → sehr schnell**

## Luftdruck

### 1. Aneroidbarometer

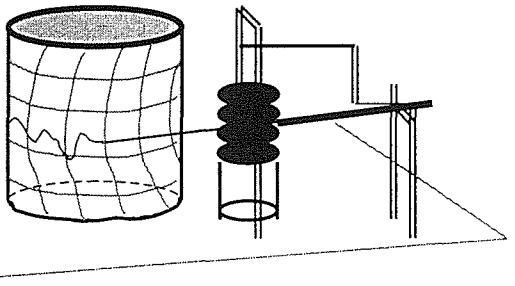
O. von Guericke

Geschlossene, luftleere Metalldose zieht sich bei höherem Luftdruck zusammen (Prinzip der Magdeburger Halbkugeln; *Otto von* ***Guericke***; 1602 - 1686) und dehnt sich bei geringerem Luftdruck aus. Die Bewegung wird auf einen Zeiger übertragen.



### 2. Barograph

Ein Barograph oder Luftdruckschreiber besitzt mehrere Aneroiddosen, die mit Luftdruckveränderungen einen Schreibarm bewegen, der das, auf einer Trommel befindliche Diagrammpapier beschreibt.



### 3. Quecksilberbarometer

Innere Röhre taucht in Quecksilberbad. Fällt infolge des Luftdrucks der Quecksilberstand, entsteht im oberenTeil der geschlossenen Röhre ein Vakuum. Den druckproportionalen Quecksilberstand kann man (ähnlich einem Thermometer) an einer druckgeeichten Skala ablesen.

### 4. Drucksonden

Differenzdrucksonden zur Messung von Strömungsgeschwindigkeit (In Verbindung mit Staurohr) und zur Messung von Differenzdruck (Meßbereiche ±100hPa; ±10hPa) Absolutdrucksonden (Meßbereich 2bar)

## Strömungsmessung

### Thermische Strömungssonden

Hitzkugelsensor NTC; Meßbereiche –20 ··· 10 m/s; -20 ··· +70 °C; ggf. mit Strömungsrichtungserkennung; reaktionsschnell

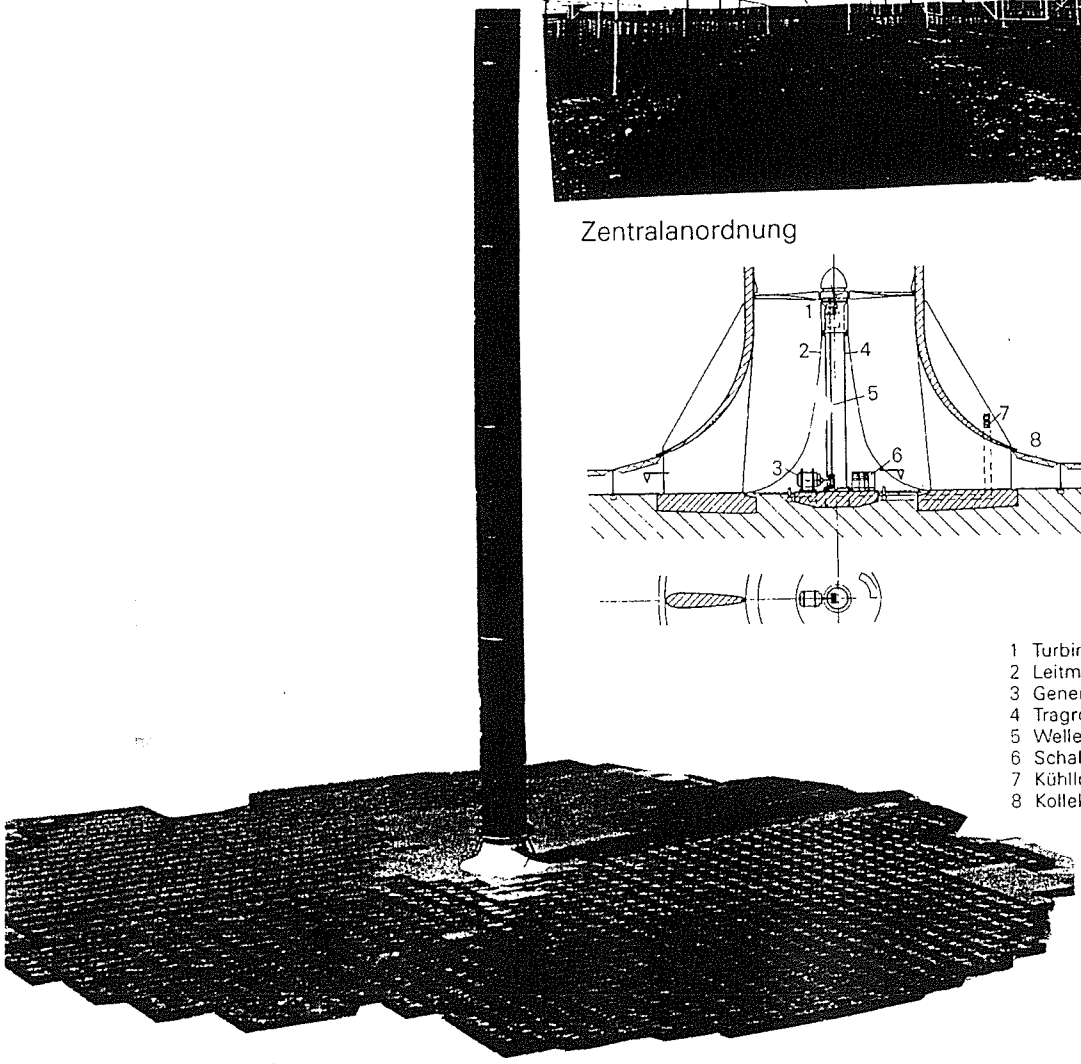
## SVT 1.15 Anlagen

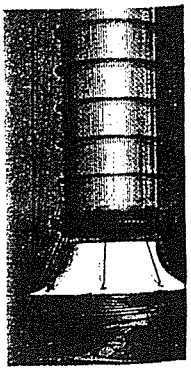
# MANZANARES

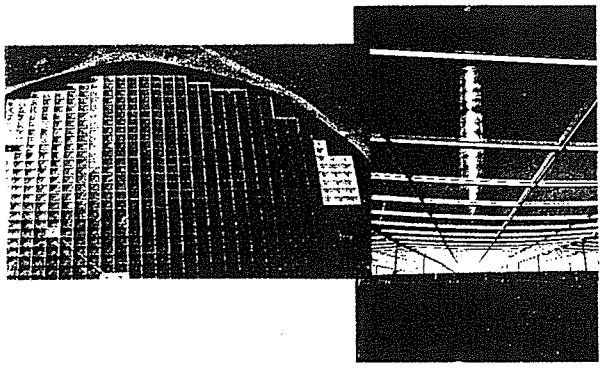
Zentralanordnung




1 Turbine
2 Leitmembran
3 Generator und Getriebe
4 Tragrohr
5 Welle
6 Schalt- und Regelstation
7 Kühlluftkanal
8 Kollektordach







Technik

SONNENENERGIE

# Sog im Schlot

Ein Stuttgarter Ingenieur will 1000 Meter hohe Betontürme bauen. Sie sollen Wüstenhitze erst in Wind und dann in Strom verwandeln.

Das war es, wonach die Expo-Macher suchten: ein markantes Symbol, das der Weltausstellung „visionare Kraft" verleihen könnte.

Der Stuttgarter Ingenieur Jörg Schlaich, 63, hatte vorgeschlagen, einen 200 Meter hohen Glasturm in den Himmel von Hannover wachsen zu lassen. Die „Welt" bejubelte ihn bereits als „Eiffelturm von Hannover". Die Expo-Planer schwärmen, so wie 1958 das Atomium in Brüssel zum Symbol der nuklearen Hoffnung wurde, so werde dieses gläserne Wahrzeichen „das Solarzeitalter einläuten".

Noch allerdings haben die ehrgeizigen Turmbauer mit Widerstand zu rechnen. Denn der Glasfinger in Hannover soll nicht mehr als eine Attrappe sein, ein ästhetisches Modell für eine neue Art sonnenbetriebener Großkraftwerke. Die Originale mußten andernorts errichtet werden.

Genau dies fürchten die Forschungspolitiker in Bonn: Wäre erst das schlanke Expo-Symbol beschlossen, so würde der Druck wachsen, die ehrgeizige Zukunftsvision auch in der realen Welt zu verwirklichen.

Für den Stuttgarter Professor Schlaich wäre das die Erfüllung eines Lebenstraums. Mit Kühltürmen, waghalsigen Brückenkonstruktionen und der Tragwerkplanung für das eigenwillige Dach des Münchner Olympiastadions machte er sich einen Na[illegible] Kraftwerksidee. Mächtige Kamine, so seine Vision, könnten den armen Ländern im trockenen Hitzegürtel der Erde umweltfreundlichen Strom liefern.

Mit seinem robusten Gigantismus verabschiedet sich Schlaich von den Small-is-beautiful-Träumen alternativer Sonnenapostel. Der Stuttgarter Visionär koppelt zwei aus dem Alltagsleben bekannte physikalische Phänomene: den Treibhaus- und den Kamineffekt. Quadratkilometerweit will er die Wüste mit Glas überdachen. Die brütende Sonne soll die Luft darin aufheizen. Durch einen 1000 oder mehr Meter hohen Betonkamin in der Mitte des überdimensionalen Gewächshauses schießt sie dann aufwärts (siehe Grafik).

*Windgeschwindigkeiten von knapp 60* Stundenkilometern lassen im Fuß des Turms Turbinen rotieren, die wiederum Stromgeneratoren antreiben. Kraftwerke mit Leistungen um die 200 Megawatt könnten so konstruiert werden – ohne daß Treibhausgase oder andere Schadstoffe entstehen.

Schon seit Anfang der achtziger Jahre streitet der Brücken- und Turmbauspezialist für sein Konzept – anfangs durchaus mit Erfolg. Mit rund 16 Millionen Mark alimentierte das Bonner Forschungsministerium seit 1979 ein Versuchskraftwerk im spanischen Manzanares. Die Experimentieranlage lief knapp drei Jahre lang zuverlässig und praktisch wartungsfrei.

Im Frühjahr 1989 jedoch legte ein Sturm die Kaminrohre um; die verrosteten Abspannstangen hatten versagt. Mit dem Stahlschlot kippte auch die Bonner Förderung. Seither gilt im Hause des „Zukunftsministers" Jürgen Rüttgers (CDU) jede weitere Mark für Schlaichs Aufwindidee als rausgeschmissenes Geld.

Die Begründungen wechseln. Fachkollegen aus der Solargemeinde bemängeln vor allem den riesigen Flächenbedarf für das Glasdach. Das bestreitet auch Schlaichs Truppe selbst nicht. Der Wirkungsgrad sei „lausig", bekennt Schlaichs Mitarbeiter Wolfgang Schiel. Doch wo Steppen und Wüsten ohnehin ungenutzt brachlagen, sei das ohne Bedeutung.

Zweifel äußern die Rüttgers-Beamten auch an der Erdbeben- und Sturmsicherheit der gewaltigen Betonrohren. „Verständlich" findet Schlaich, „daß ein Turm von 1000 Meter beim Laien erst mal einen Schreck erzeugt". Doch Experten teilten diese Bedenken nicht. Mehrfach hätten sie die technische Machbarkeit bestätigt.

Der Wucht subtropischer Stürme könne der Turm dank speichenförmiger Verstrebungen im Innern trotzen. Auch gegen Erdbeben glaubt Schlaich sein Bauwerk gefeit: Schließlich lägen im Erdbebenland Japan seit Jahren Konstruktionszeichnungen für 2000-Meter-Wohntürme auf dem Tisch.

Neuerdings verspricht die Idee eines *genial-simplen „Tageswärme-Speichers"* entscheidende Vorteile gegenüber bisherigen Solarstromkonzepten: Unter dem Glasdach wollen die Stuttgarter Kaminfreunde ein geschlossenes Netz von Wasserschläuchen verlegen. Diese heizen sich tagsüber auf und geben ihre Wärme nachts wieder ab. Windturbinen und Generatoren drehen sich dann rund um die Uhr.

Als Jörg Schlaich den Vorständen der kürzlich fusionierten südwestdeutschen Stromversorger Badenwerk und Energieversorgung Schwaben seinen Schlauchspeicher erläuterte, zeigten die sich beeindruckt.

Eine gemeinsame „Arbeitsgruppe Aufwindkraftwerke" errechnete: Das Sonnen-Wind-Konzept liegt mit kalkulierten Stromkosten von 14 Pfennig pro Kilowattstunde nur noch um 2,5 Pfennig über denjenigen eines modernen Kohlekraftwerks. Gegenüber anderen Solarstromkonzepten diagnostiziert das Gutachten schon jetzt „standortabhängig Vorteile für Aufwindkraftwerke".

Diese Auffassung teilt offenbar auch die Regierung des nordwestindischen Bundesstaats Rajasthan. Im Jahre 1995 entschied sie sich für einen Plan des Mischkonzerns „Ceylinco" aus Sri Lanka, der fünf der in Stuttgart konzipierten Superschlote zu einem 1000-Megawatt-Kraftwerk in der Wüstensteppe Thar bündeln will. Was fehlt, ist ein Finanzierungskonzept. Jeder der fünf Kraftwerksriesen würde Investitionen von mindestens 1,3 Milliarden Mark verschlingen.

Nur in derartigen Großkraftwerken könnten die Windkamine ihre volle Potenz entfalten. Dennoch hat Schlaich inzwischen eingesehen, daß sich niemand an diese Turmgiganten herantraut: „Den Zahn müssen wir uns ziehen."

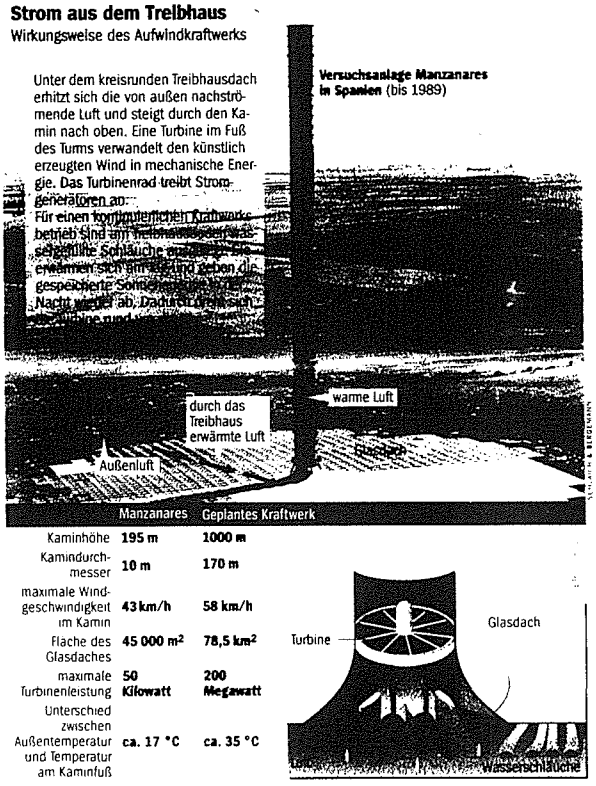
Statt dessen hofft er nun auf den Auftrag für eine 30-Megawatt-Pilotanlage. Die würde immerhin noch mindestens 335 Millionen Mark kosten.

Die Expo 2000 könnte den Ausschlag geben. Im Dezember soll über den Bau des Glasschlots von Hannover entschieden werden. In seinem Vorschlag gibt der industrienahe Aufsichtsrat der Weltausstellung zu bedenken: Das hübsche Modell mache nur dann einen Sinn, wenn gleichzeitig „irgendwo in der Welt ein großes Original-Kraftwerk" nach dem Schlaich-Konzept gebaut werde, „beispielsweise in Marokko". ◆

**Strom aus dem Treibhaus**

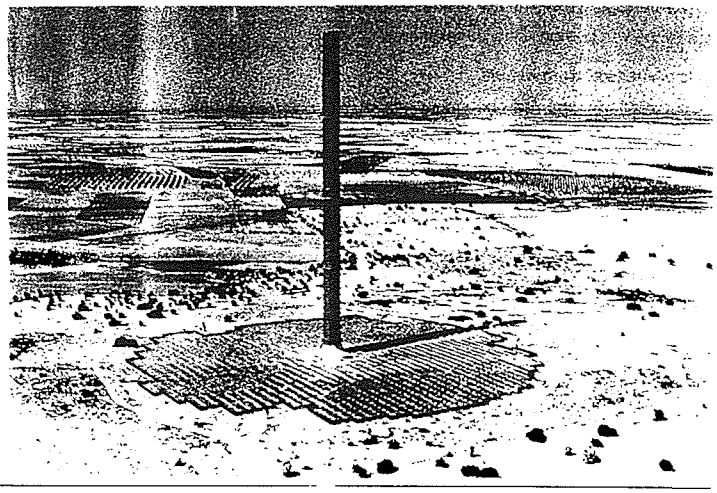
Wirkungsweise des Aufwindkraftwerks

Unter dem kreisrunden Treibhausdach erhitzt sich die von außen nachströmende Luft und steigt durch den Kamin nach oben. Eine Turbine im Fuß des Turms verwandelt den künstlich erzeugten Wind in mechanische Energie. Das Turbinenrad treibt Stromgeneratoren an. Für einen kontinuierlichen Kraftwerksbetrieb sind am [illegible] zusätzliche Schläuche [illegible] entnehmen sich [illegible] sind neben die gespeicherte Sonne[illegible] Nacht wieder ab. Dadurch [illegible]



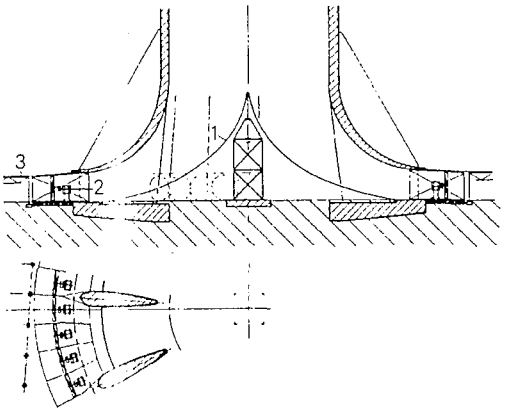

| | Manzanares | Geplantes Kraftwerk |
|---|---|---|
| Kaminhöhe | 195 m | 1000 m |
| Kamindurchmesser | 10 m | 170 m |
| maximale Windgeschwindigkeit im Kamin | 43 km/h | 58 km/h |
| Fläche des Glasdaches | 45 000 m² | 78,5 km² |
| maximale Turbinenleistung | 50 Kilowatt | 200 Megawatt |
| Unterschied zwischen Außentemperatur und Temperatur am Kaminfuß | ca. 17 °C | ca. 35 °C |



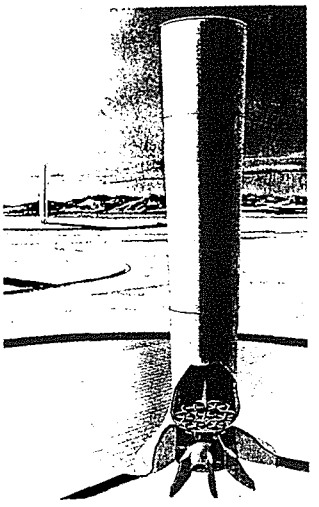


## SVT 1.15 Anlagen

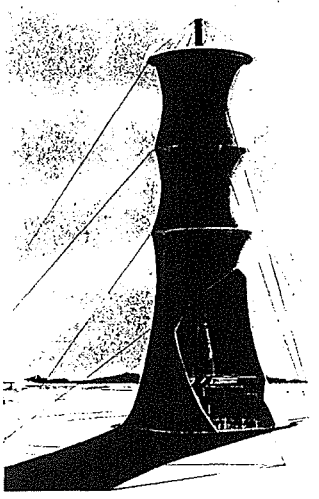
Umfangsanordnung



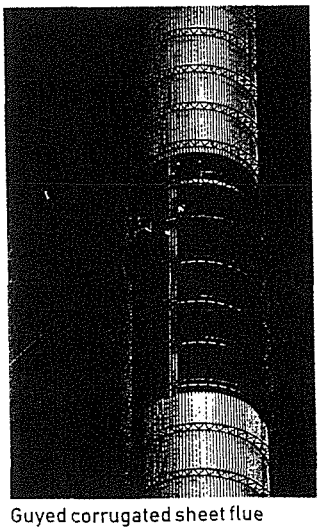

1 Leitmembran
2 Turbinen und Generatoren in Luftkanälen
3 Kollektorrohr

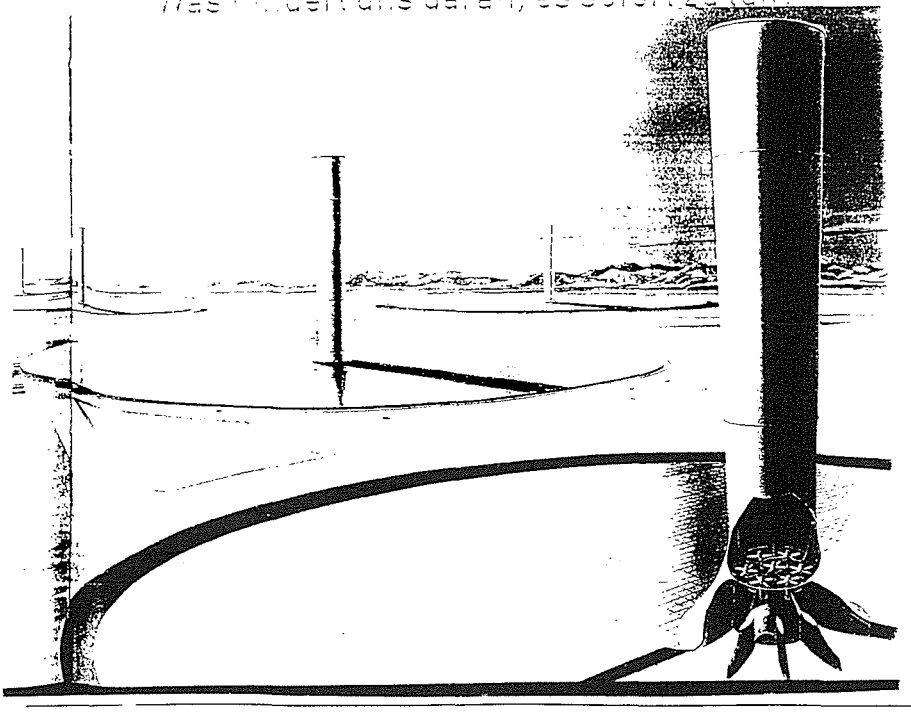


Free-standing reinforced concrete flue



Guyed membrane flue



Guyed corrugated sheet flue

Was ändert uns daran, es sofort zu tun?