



Zukunft der

**ENERGIE**

der Zukunft



„Die Energiewende beginnt im Kopf“.

Wer sich unter Freunden, in der Bahn, der Schule, am Arbeitsplatz oder am Stammtisch umhört, wird feststellen, dass in Diskussionen über die Energiewende und das Klima viel geglaubt und wenig gewusst wird. Erfolge stellen sich dabei aber am ehesten ein, wenn alle mitmachen und einen klaren Kopf behalten. Nur so kann man das Notwendige tun und das Unnütze unterlassen.

Wir sind Nutzer von hungrigen Maschinen die uns Arbeit abnehmen und das Leben erleichtern sollen. Bei klarem Verstand, dem richtigen Nutzerverhalten und einem strategische Konsum können wir Ihnen Sparsamkeit beibringen. Unsere Arbeitsgeräte und Wohnstätten müssen hierbei zur Genügsamkeit gebracht und Klimafolgen dabei abgewehrt werden.

Den restlichen Bedarf müssen wir den Naturkräften der Sonne abgewinnen. Sie schenkt uns so viel, dass wir mehr als genug davon zu unserer Verfügung haben.

Dieses Buch zeigt eine ungeheure Vielfalt an Energieanwendungen, die es heute schon gibt, und die es zu ernten gilt.

Von unserem Mutterstern bekommen wir direkte Strahlung mit viel Bewegung und Lebensenergie über den Wind, die Wellen, den Wasserkreislauf und die Biomasse.

Sie schreibt uns keine Rechnung, aber fordert uns zu einem sparsamen Umgang mit diesem Geschenk auf.

Radioaktive Zerfallsprodukte im Erdinneren tun ein Übriges. Wir können sie energetisch über die Geothermie nutzen.

Aller Anfang ist schwer und muss richtig angegangen werden. So haben wir es auch hier mit

Bremsern und Kämpfern zu tun, die alte Privilegien erhalten, Pfründe retten und alles Neue bekämpfen. Hier gilt der Satz von Mahatma Gandhi: „Erst ignorieren sie Dich, dann lachen Sie über Dich, dann kämpfen Sie gegen Dich und dann gewinnst Du“.

Die Energiewende ist Aufgabe von uns allen und wir werden sie nur gemeinsam bewältigen, indem wir mit Unternehmergeist Selbstversorger werden, und den großen Versorgern damit möglichst viele Marktanteile abjagen.

Der Restbedarf muss vom Energiedienstleister kommunal erzeugt und dann nur ein kleiner Rest noch über lange Wege aus großen und weit entfernten Projekten in unsere Häuser geholt werden.

Nur durch ein solches Konkurrenzmodell bekommen wir auch die Preisgestaltung zurück in unsere Hände und werden gleichzeitig unbeherrschbare Klimafolgen bewältigen können.

Unsere Gedanken sollten von ethischen Grundsätzen geleitet und einer überlebenswerten Umwelt und der Zukunft unserer Kinder gelten. Wir haben diesen Planeten von unseren Vorvätern für eine vorübergehende Zeit übernommen und dürfen ihn nutzen. Was man sich leiht, gibt man in einem ordentlichen Zustand weiter, so, dass die nachfolgenden Generationen darin mit dem gleichen Komfort leben können.

Ihr Energie Tisch Lübeck

## Vorwort

„Geister schmachten nach Ergebnissen, nicht nach Vorwürtern und wünschen, an das ersehnte Ziel ohne langatmige Einleitungen zu gelangen.

Deshalb beschränke ich mein Vorwort auf diese wenigen Zeilen, die meinen Entschluß kundtun, das Buch zu schreiben.“  
*Ibn al-Nadim* \*

## Worum geht es

Es geht um uns, um unseren Planeten Erde und um die Energie in ihrer vielgestaltigen Form.

Es geht darum, dass es heute - und für alle Zukunft - Energie in Hülle und Fülle gibt, und daß alle anderslautenden Informationen nicht stimmen.

Und es geht darum, diese Energie ohne räumliche und quantitative Beschränkungen allen Bewohnern unseres Planeten zu gute kommen zu lassen - ohne ökologische oder wirtschaftliche Beeinträchtigungen der Umwelt und des Lebens.

Als Beleg für diese Aussagen werden hier alle bislang entdeckten und genutzten Formen der Erneuerbaren Energie präsentiert.

Wir alle wünschen uns langfristige Substitutions-Energieträger zu folgenden Bedingungen:

- keine Möglichkeit zur Monopolisierung
- kein Verbrauch von Sauerstoff
- keine thermische Umweltbelastung
- keine Strahlungsgefährdung
- keine anderen toxischen Gefährdungen
- keine Notwendigkeit zur Exploration, Förderung oder zum Transport der zur Umwandlung nötigen Primärenergien
- keine Ressourcenbindung und kein Ressourcenabbau
- keine Bindung an besondere meteorologische, hydrologische und/oder geologische Gegebenheiten
- keine Abhängigkeit vom Tag/Nacht-Wechsel oder von der Jahreszeit
- zeitlich und örtlich kongruentes Verhältnis von Energiebedarf und -angebot
- Möglichkeit eines dezentralen Betriebs
- schnelle Verfügbarkeit, d.h. keine lange Entwicklungsdauer
- nicht kostenaufwendig, weder bei der Erstellung noch im Betrieb
- anwenderfreundlich, leichte Reparatur- und Wartungsmöglichkeit
- Synthese von Komponenten mit hohen Erfahrungswerten
- geringer Lärm
- geringe Korrosionsanfälligkeit
- geringe Arbeitsgeschwindigkeit der mechanischen Teile
- geringer Verschleiß
- Langlebigkeit, Reparierbarkeit, Modernisierbarkeit
- keine zusätzlichen betrieblichen, rechtlichen und/oder sicherheitspolitischen Auflagen und/oder Kosten
- keine Abfallprodukte

...und das alles bei erforderlichen Leistungen von einigen 1.000 MW pro System, wobei es selbstverständlich ausgesprochen vorteilhaft wäre wenn sich das Systemprinzip genauso auch im Kleinformat anwenden ließe.

*(\*) Ibn al-Nadim war der Verfasser des ‚Katalogs der Wissenschaften‘, der zehnbändigen Bibliographie sämtlicher in arabischer Sprache erschienenen Übersetzungen und Originalwerke, die im Jahre 1000 n. Chr. in Bagdad veröffentlicht wurde.*

## ***Wir sagen ein großes Dankeschön.***

*Dank an alle, die sich bei diesem Buchprojekt mit eingebracht und mitgestaltet haben und die das Erscheinen erst ermöglicht haben.*

*Uns hat die Erstellung des Buches große Freude bereitet und uns auch viele neue Erkenntnisse beschert. Unser Kunstverein in Travemünde, mit Sitz in der Alten Vogtei an der Vorderreihe 7, lädt Sie gerne zu weiteren geplanten Kunstprojekten und -aktionen ein.*

*Das Buch ist zum weitaus grössten Teil aus der Internetside „Buch-der-Synergie“ entstanden. Dazu kommt Wikipedia, andere sind gekennzeichnet.*

*Autor: Achmed Khammas*

*Autor und Grafikzusammenstellung: Jan Ingwersen*

*Initiator: Verein für Kunst und Kultur zu Travemünde e.V.*

*Druck: G&D - Grafik, Druck & Verlag GmbH, Stavenhagen*

*“Ich würde mein Geld auf die Sonne und die Solarenergie setzen. Was für eine Energiequelle! Ich hoffe, wir müssen nicht erst die Erschöpfung von Erdöl und Kohle abwarten, bevor wir das angehen.” (Zitat: Thomas Edison 1931, Erfinder der elektrischen Beleuchtung)*

Inhalt			
<b>Muskelkraft</b>	5	Die Almería-Anlage	124
Pumpen und Wassertransport	6	Gemasolar, das Solarturm-Kraftwerk	127
Pedale und Kurbeln	7	Das Mittelmeer-Projekt (Desertec)	129
Laufen	9	Weitere Projekte	135
<b>Geothermische Energie</b>	12	<b>Windkraft</b>	138
Die hydrothermale Geothermie	13	Mühlen: Standorte und Einsatzgebiete	139
Die oberflächennahe Geothermie	14	Chronologie zur Windenergienutzung	140
Geschichte	15	Die Entwicklung der Mühlenformen	141
Bundesrepublik Deutschland	15	Strom aus Wind	144
Island 18		Technik des Rotorbaues	145
Schweden, USA	19	Zeit der Wiederentdeckung und Potenzial	145
Grenzen der geothermischen Nutzung	21	Offshore-Windparks	147
<b>Biologische Kraftstoffe</b>	22	Aufwindkraftwerk	149
<b>Wasserkraft</b>	24	Vertikalachsen-Rotoren	152
Wassermühlen, Laufwasserkraftwerke	24	<b>Brennstoffzelle</b>	165
Gravitationswasserwirbelkraftwerk (GWWK)	31	<b>Micro Energy Harvesting</b>	167
Wasserfall, Staudämme, Pumpspeicherwerke	33	<b>Energiesparen</b>	182
Gletscherkraftwerke, Meereskraftwerke	38	Ausgangsposition, Sommerzeit	183
Strömungsenergie, Wellenenergie	46	Energiesparlampen, LED	185
Temperaturgradient (OTEC)	47	OLED	190
Salinitätsgradient (Osmose-Kraftwerk)	50	<b>Energiespeicherung</b>	193
Hydrosphärengenerator	53	Geschichte elektrische Energiespeicherung	193
Hydrogenerator	54	Neue Ansätze der Batterie-Technologien	196
<b>Sonnenenergie</b>	55	Thermochemische Speicher	206
Geschichte des Solarnutzung	56	<b>Druckluft</b>	210
Solarschiffe, Solarflugzeuge, Luftschiffe	64	Druckluft im mobilen Einsatz	214
Photochemische Nutzung	88	Stickstoffmotoren	
Photoelektrische Nutzung	92		
Optimierungs- und Verstärkungstechniken	104		
Sonnenfarm (Flachspiegel-Kollektoren)	113		
Parabolspiegel Anlagen (Dish-Stirling-Systeme)	114		
Sonnenturm, Sonnenofen	118		
Sonnenfarm (Parabolrinnen-Kollektoren)	120		

## Muskelkraft

Die erste nichtfossile Energiequelle, die uns Menschen im wortwörtlichen Sinne auch am nächsten liegt, ist unsere eigene Muskelkraft. Solange es Menschen gab und gibt, steht sie uns zur Verfügung – und es ist wirklich beachtlich, was man mit dem Viertel PS und Intelligenz alles erreichen kann...

Die Energiegewinnung mittels Muskelkraft ist für uns in den Industrieländer nur eine wissenschaft- und sportliche Herausforderung, aber in der Dritten Welt ist sie noch weit und in vielen Variationen verbreitet. Daher nur einige Beispiele:



*Gossamer Albatros*

Unvergesslich bleibt der mittels Muskelkraft erfolgte Überflug des Ärmelkanals am 12. Juni 1979 durch den 2007 verstorbenen Paul McCready in seinem ‚Gossamer Albatros‘ – und die noch immer ungebrochenen Weltrekorde von Günter Rochelt, der leider ebenfalls schon verstorben ist. Unter anderem stellt Rochelts ‚Musculair 2‘ mit dessen Sohn Holger Rochelt an den Pedalen am

1. Oktober 1985 einen Geschwindigkeits-Weltrekord für Muskelkraft-Flugzeuge über eine Strecke von 1.500 m auf: Die Rekordgeschwindigkeit beträgt 44,26 km/h.

1989 erhebt sich mit dem ‚DaVinci III‘ des MIT erstmals ein von menschlicher Energie betriebener Pedal-Hubschrauber für 7,1 Sekunden in die Luft – und 1994 gelingt es einem japanischen Team um Akira Naito von der Nihon University sogar, ihren Hubschrauber ‚Yuri I‘ für 19,5 Sekunden lang im Schwebезustand auf 20 cm Höhe zu halten ...alleine mit Muskelkraft! Der Pedal-Pilot sitzt hier zwischen vier großen 2-Blatt-Rotoren.



*Yuri I*

Da die American Helicopter Society 1980 den ‚Sikorsky Prize‘ von 20.000 \$ für einen einminütigen Flug in mindestens 3 m Höhe ausgelobt hat und im September 2009 von der American Helicopter Society das Preisgeld auf 250.000 \$ angehoben wird, sind viele involvierte Teams wie auch neue Akteure stark motiviert.

Beispielsweise gelingt es einem Team von 50 Doktoranden und Diplomanden der James Clark School of Engineering an der University of Maryland nach zweijähriger Entwicklungsarbeit im Juli 2011, daß ihr selbstgebauter Pedal-Hubschrauber ‚Gamera‘ kurzzeitig abhebt – allerdings nur für 12,4 Sekunden. Denn im Vergleich zum einem Fluggerät mit festen Flügeln wird dafür mindestens 15 mal mehr Kraft benötigt. Pilotin ist die 24-jährige Biologie-Studentin Judy Wexler.



*Gamera*

Nicht ganz so hoch hinaus, aber ebenfalls ausschließlich mit Muskeln betrieben, kommt das von der University College London's Student Union gebaute Luftkissenfahrzeug ‚Steam Boat Willy‘, das im August 2009 erfolgreich die Themse überquert.



*Steam Boat Willy*

Wichtigster Berater des Projektes ist Chris Roper.

Für knapp 30 \$ vertreibt Universal Hovercraft die Pläne für ein ebenfalls muskelbetriebenes Selbstbau-Luftkissenfahrzeug.

### **Pumpen und Wassertransport**

Die Effizienz der Kolbenbewegung wird jedoch von der der Rotation weit übertroffen – und deshalb entwickelt das südafrikanische Unternehmen Roundabout Outdoors ab 1989 eine Wasserpumpe für Spielplätze, mit der die Kinder 1.400 l Wasser pro Stunde aus einer Tiefe von 40 m fördern können – solange sie ihr Karussell nur schön brav mit 16 Umdrehungen pro Minute am Laufen halten. Einsetzbar sind die ‚Roundabout-Pumpen‘, die weitgehend aus Teilen von Windpumpen bestehen, bis zu einer Tiefe von 100 m.

Ein weiteres Pump-Projekt, das primär die kindliche Muskelkraft nutzt, ist die ‚Swing Pandian‘ Wippe, die im Februar 2003 an der University of Michigan-Flint vorgestellt wird.



*PlayPump Water System*

Hier wird jedoch kein Wasser gepumpt sondern Öl, das mittels einer kleinen Hydraulik Strom produziert. Ein bis zwei Minuten Wippen sollen ausreichen, und eine 20 W Birne bis zu drei Minuten zu betreiben – bei einem Einsatz von LEDs ist natürlich eine weitaus größere Lichtausbeute möglich.



*Energee-Saw*

Auch die von Daniel Sheridan an der Coventry University entwickelte ‚Energee-Saw‘ ist eine Strom-Wippe, deren erstes Modell im Sommer 2007 in Kenia installiert wird um Klassenräume zu beleuchten und Handys, Radios, mp3-Player usw. aufzuladen. Für die Umsetzung und technische Weiterentwicklung dieser Variante wird im britischen Coventry die Firma PlayMade Energy gegründet. Sheridan erhält hierfür Ende 2008 den Entrepreneurial Spirit Award.



## Pedale und Kurbeln

Zu den Pionieren der Stromerzeugung gehört ab 1993 Bart Orlando von der Humboldt State University in Kalifornien, dessen pedalbetriebene Ladegeräte dazu benutzt werden, 12 V Batterien aufzuladen. Mit dem ‚Human Energy Converter‘ von 1995 erzeugen 14 Personen gleichzeitig bis zu 1 kWh Strom – zumeist für Musikveranstaltungen und Festivals. Orlando baut noch eine ganze Reihe weiterer pedalbetriebener Stromerzeuger, Mixer, Bohrer und sogar eine Waschmaschine



*Human Energy Converter*

In der 3. Welt sind jedoch noch immer die eher konventionellen, zumeist aus Fahrradteilen zusammengesetzten Pedal-Generatoren verbreitet.



*Pedal-Generator*

Eine konventionelle 12V Autobatterie kann damit innerhalb von 6h aufgeladen werden – was wiederum ausreicht, um mit dem Strom 8 – 10 kleinere Batterie/LED-Lampen zu betreiben.

Hierzu sei angemerkt, daß Schätzungen von 2005 zufolge die Bewohner der weniger entwickelten Länder jährlich mehr als 10 Milliarden Dollar für Kerosin (Leichtpetroleum) für Beleuchtungszwecke ausgeben!

Ende 2008 beschließt die Stadtverwaltung von Barcelona sechs Weihnachtsbäume aus Metall der Designerin Martiria Figueres aufzustellen, deren Lichter solar- oder fahrradbetrieben aufleuchten sollen. Ein Aufruf zur Senkung des Energieverbrauchs insbesondere während der 44 Tage lang angeschalteten Weihnachtsbeleuchtung. Die Bäume sind 11 m hoch, verbrauchen jeweils zwischen 200 und 300 W und kosten zusammen 214.000 €.



*Fahrradstrom in Barcelona*

Im August 2008 eröffnet dann in Portland das Studio ‚The Green Microgym‘, dessen Besitzer Adam Boesel mehrere Trainingsräder aufstellt, die zu einem Generator zusammenschaltet sind, der sein Fitnessstudio mit bis zu 75 W zusätzlichen Strom versorgt. Das Patent für diese Technik wird von einem Henry Works beantragt.



*Green Microgym*



Umbauten an weiteren Trainingsmaschinen sind bereits ins Auge gefaßt, langfristig soll sogar der gesamte Elektrizitätsbedarf von den sich abstampelnden Menschen geliefert werden. Ende **2008** hat Boesels neuer Club schon über 100 Mitglieder. Inzwischen werden hier pro Stunde schon 200 W erzeugt, und Anfang **2009** sind es sogar schon 350 W.

Anfang **2009** stehen in Pekings Vorort Dong Gao Di, Bezirk Fengtai, sechs nebeneinander aufgereichte Heimtrainer in kreisbunten Farben auf der Straße, die von Passanten genutzt werden können um ihre Gesundheit zu erhalten

– und um gleichzeitig rund 180 W pro Stunde zu erzeugen, die in Batterien gespeichert werden.

Sobald diese aufgeladen sind werden sie an Familien mit niedrigem Einkommen verteilt, um dort Fernseher und andere elektrische Geräte zu betreiben. Eine voll geladene Batterie kann das Fernsehgerät 10 – 11 Stunden lang versorgen.



*Outdoor-Stromgewinnung  
in China*

Doch natürlich geht das alles auch eine Nummer kleiner: Eine frühe Form der inzwischen schon weiter verbreiteten muskelbetriebenen Taschenlampen kommt bereits **1935** auf den britischen Markt. Ebenso geht die Erfindung der mit Federwerken versehenen



*Magnet' Taschenlampe  
(ca. 1935)*

Kurbelradios auf einen Briten zurück, nämlich Trevor G. Baylis, der **1993** sein erstes Modell erfolgreich zum Funktionieren bringt.

Ein besonders interessantes und ästhetisches Design für ein neues Kurbelradio kommt aus dem Hause Porsche. Das **Eton P9110 emergency**



*Porsche-Design*

radio wird im August **2007** vorgestellt. Neben einem Mehrbandempfänger besitzt es ein starkes LED-Blinklicht, eine Notruf-Sirene, ein rotes Warnblinklicht – und es kann das Handy laden. Die Hülle besteht aus Gussaluminium, und wiegen tut das Designobjekt mit Gebrauchswert 740 g.

Ein kurbelbetriebenes Radio von Kikkerland für 25 \$, das nicht nur farblich grün ist, kommt im Juni **2009** in den Verkauf. Es ist außerordentlich kompakt und eignet sich hervorragend für den Trekking-Urlaub.



*Kikkerland Kurbelradio*

Wie nahezu jedes Radio empfängt es UKW und Mittelwelle, und bei sonnigem Wetter sorgt die eingebaute Solarzelle für die notwendige Energie. Andernfalls kann der integrierte Akku durch das Betätigen einer Drehkurbel geladen werden. Eine Minute kurbeln bringt Energie für 30 Minuten. Komplett aufgeladen erlaubt er bis zu sieben Stunden lang Musik und Nachrichten zu hören.

## Laufen

Die Entwicklung ‚POWERleap‘ ist für urbane Areele mit viel Fußgängerverkehr gedacht, wobei die von den Trittmatten erzeugte Elektrizität von den ebenfalls eingearbeiteten LEDs umgehend wieder verbraucht wird: Der schreitende Mensch hinterlässt quasi für ein paar Sekunden ein funkeln des Lichtermeer...

Statt mit Folien wollen britische Ingenieure die Energie von Fußgängern mittels zusammenpressbaren Matten abnehmen, in denen eine Flüssigkeit durch Miniturbinen gepresst wird, welche die Stromerzeugung übernehmen. Die Elektrizität wird anschließend in Supercaps gespeichert.



POWERleap



Spinnaker Tower

Die Technik soll im Rahmen des Pacesetters Project in den Treppen des 170 m hohen Spinnaker Towers in Portsmouth installiert werden, einer touristischen Aussichtsplattform.

Beteiligt sind die Firma Philips und ein Team der Hull University, wobei bereits an einem Laufschuh mit integriertem Generator gebaut wird. Außerdem soll versucht werden, die Schwankungen des Gebäudes selbst zu nutzen – was sich besonders

bei stark schwankenden Fernsehmasten und ähnlichen Objekten umsetzen ließe. Dieser Projektteil wird von einem Team der Southampton University übernommen.

An der West-Kruiskade im Rotterdamer Chinesenviertel eröffnet Anfang September 2008 die erste ‚Öko-Disco‘ der Welt, in der jede Tanzbewegung Strom erzeugt, wobei Leuchtdioden im Boden sowie Lampen an der Bühne das erreichte Energie-Level der Tänzer anzeigen. Der



Werbeslogan des ‚Club Watt‘ von Party-Guru Ted Langenbach lautet deshalb auch „We want your energy“. Kernstück ist eine flexible

elektromechanische Tanzfläche, bei welcher der Boden unter den Füßen um einige Millimeter nachgibt.

Die Schwingungen der Bewegungsenergie werden nach dem Dynamo-Prinzip in Elektrizität umgewandelt und gespeichert. Die Tanzenden können damit etwa ein Drittel des Stroms liefern, den die DJ-Bühne verbraucht.

Mittlerweile gibt es Discos mit diesem System in San Fransisco, Rio de Janeiro, Berlin usw. Aber man kann es auch mieten und so war es selbst in Darmstadt zu Gast. Eine neuere Variante wird auf Fusswegen eingesetzt und benutzt die Energie für die Beleuchtung des selbigen.





**Organic-Discø in Darmstadt**

Die verblüffendste Idee der Pedal-betriebenen Mobilität ist in meinen Augen jedoch das Konzept einer Einschienbahn, die von den Insassen selbst betrieben wird. Aufgrund der geringen Gewichte der ‚Transportmittel‘ würde der Bau sehr günstig ausfallen und ließe sich prinzipiell auch leicht und schnell in bestehende urbane Strukturen integrieren. Der Vorschlag des Designers Geoffrey Barnett wird erstmals Mitte **2008** unter dem Namen ‚**Shweeb**‘ bekannt. In dem Abenteuerpark Agrodome nahe Rotorua in Neuseeland



*2 Shweeb Gondeln*

existiert bereits eine 2 x 200 m lange Kreisbahn, die sich in einer Höhe von 2 – 4 m über dem Boden erstreckt. Auf jeder Bahn können bis zu fünf Wagen aneinander gekoppelt oder auf beiden Bahnen parallel Wettfahrten veranstaltet werden.



*Shweeb Bahnstrecke*

Vielleicht kann man schon bald die neuartigen **kinetischen Stehlampen** kaufen, die – ähnlich wie früher Standuhren – durch das Aufziehen schwerer Gewichte betrieben werden.

Hier setzen diese Gewichte jedoch kein Uhrwerk, sondern einen kleinen Generator in Gang, der den Strom für die LEDs produziert.

Postfossil ist eine Gruppe junger Schweizer Designer, die sich **2007** zusammantun. Mit der ‚**First Light reading lamp**‘ von Anna Blattert und Daniel Gafner gewinnen sie einen Design-Preis beim **salone satellite 2008**.



*First Light*

Im Oktober 2009 gewinnt der ‚Murakami‘-Schaukelstuhl des deutsch-amerikanischen Designers Rochus Jacob den ersten Preis der DesignBoom Green Life Competition. Sein Schaukelstuhl wandelt die kinetische Energie beim Schaukeln in Strom um, um sie für eine sehr klassisch wirkende Leselampe zu verwenden. Diese sieht allerdings nur so aus und ist in Wirklichkeit ein OLED-Licht, das nur wie ein Lampenschirm geformt ist. Die OLED-Lampe kann sogar registrieren, ob es dunkel oder hell ist: Solange es noch hell ist, speichert sie die beim Schaukeln gewonnene Energie in einem Akku, um dann am Abend Helligkeit zu bieten. Die Stromerzeugung selbst soll durch eine ‚fortschrittliche Nano-Dynamo-Technologie‘ erfolgen, die in den Kufen des Schaukelstuhls integriert sind.



*Murakami*

Kräftig drücken muß man, wenn man durch eine Drehtür geht. Häufig werden diese inzwischen von Motoren angetrieben – womit es nahe lag, diese Technik umzudrehen und statt dem Motor einen Generator zu integrieren. Das Konzept erscheint Anfang 2008 erstmals in den Blogs und stammt aus dem Fluxxlab Studio in New York.



*Strom-Drehtür*

Tatsächlich dauert es nicht lange, bis der holländische Türenhersteller Royal Boon Edam Ende 2008 eine derartige mit Energie-Generator ausgestattete Drehtür in dem Naturcafé La Port installiert. Die Tür ist Teil der von dem Architekturbüro RAU entworfenen Renovierung des Bahnhofs Driebergen-Zeist, einem Durchgangsbahnhof der niederländischen Bahngesellschaft NS auf dem Gebiet der Gemeinde Utrechtse Heuvelrug.

Die Tür ist mit Reihe von Super-Kondensatoren ausgestattet, welche die erzeugte Energie als Puffer speichern und den LED-Leuchten an der Decke eine dauernde Stromversorgung bieten. Es wird



*Strom-Drehtür - Detail des oben angebrachten Generators*

Es wird erwartet, daß die Energie-Drehtür rund 4.600 kWh Strom im Jahr erzeugt. Die Entwickler entschieden sich für eine transparente Decke um zu zeigen, wie das System funktioniert. Die aufleuchtenden grünen LEDs belegen, wie viel Energie jedes Mal erzeugt wird, wenn jemand durch die Tür geht.



## Geothermische Energie



*Geysir in Island*

Geothermische Energie ist die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der festen Oberfläche der Erde. Pro Liter Erdinnenraum sind im Mittel 2,6 kWh Energie gespeichert. Oder anders ausgedrückt: 99 % der Planetenmasse sind wärmer als 1.000°C. Der Wärmeinhalt der Erde würde den heutigen Weltenergiebedarf für 30 Millionen Jahre decken. Bemerkenswert sind sie besonders in Ausnahmefällen ... bei Geysiren, Lavaströmen und Vulkanausbrüchen.

Diese Energie wird seit Jahrtausenden gezielt verwendet, wie durch mündliche Überlieferung und Geschichtsschreibung bekannt ist.

Schon die ‚frühen‘ Menschen haben geothermisches Wasser, das in natürlichen Becken und heißen Quellen auftrat, vermutlich zum Kochen und Baden benutzt – und um sich warm zu halten. Es gibt archäologische Beweise dafür, dass amerikanische Indianer die Orte an diesen geothermischen Quellen seit mehr als 10.000 Jahre benutzten. Und auch die geschriebene Geschichte zeigt, dass geothermische Ressourcen von Römern, Japanern, Türken, Isländern, Zentraleuropäern und den Maoris in Neuseeland zum Baden, Kochen und als Heizung verwendet wurden.

In Chaudes-Aigues im Zentrum von Frankreich wurde das heute noch existierende erste geothermische Fernwärmenetz bereits im **14. Jahrhundert** begonnen!

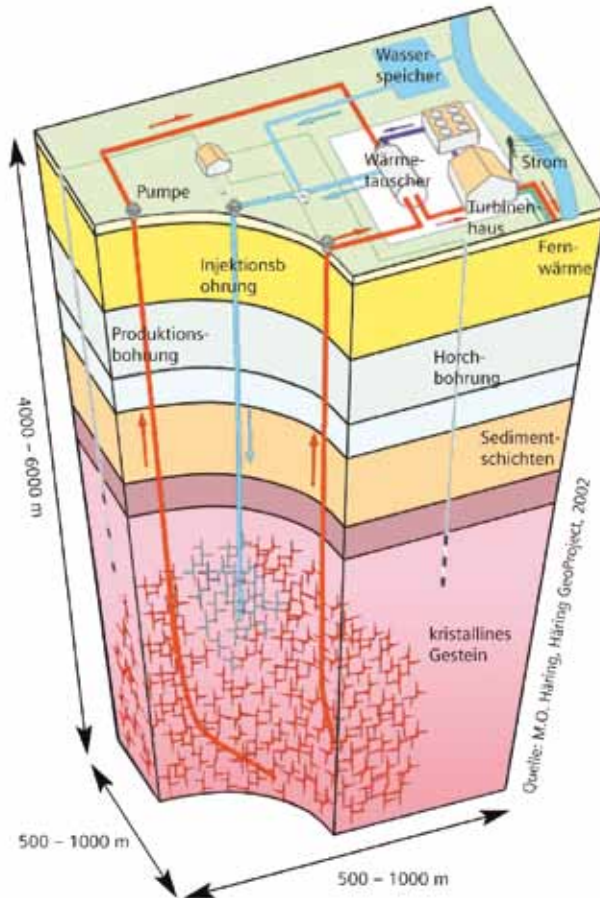


*Fliessender Lavaström*

Über die überall vorhandene Erdwärme ist bekannt, dass sie zu 70 % durch den Zerfall radioaktiver Elemente wie Uran, Thorium und Kalium entsteht, durch den Druck und durch die Reibung in den tieferen Schichten. Die überwiegenden Isotope, die für die radiogene Erwärmung verantwortlich sind, sind das Kalium-Isotop K 40, die Uran-Isotope U 235, U 238 und das Thorium-Isotop Th 232. Von den restlichen 30 % wird vermutet, dass sie noch aus ‚Restwärme‘ aus der Entstehungszeit des Planeten bestehen. Bis zu einer Tiefe von 20 - 30 km steigt die Temperatur alle 1.000 m um etwa 30°C an. In 8.000 m Tiefe beträgt die Temperatur durchschnittlich 240°C. Noch viel tiefer liegt das Magma mit Temperaturen von rund 5.000°C.

**Es gibt zwei unterschiedliche Technologien der Nutzung**

## Die hydrothermale Geothermie



Die Grafik zeigt eine Anlage der hydrothermalen Geothermie in schematischer Darstellung.

Für die hydrothermale Geothermie werden in Tiefen von ca. 2.000 - 4.000 Metern Wasser führende Schichten angezapft. Diese natürlich vorkommenden Thermalwasservorräte werden auch als **Heißwasser-Aquifere** bezeichnet.

Je nach Temperatur des Thermalwassers kann die hydrothermale Geothermie sowohl zur Wärme- als auch zur Stromerzeugung genutzt werden.

Die hydrothermale Geothermie kennt drei unterschiedliche Wärmequellen:

**Thermalwasserfelder, hydrothermale Heiß- und Trockendampfvorkommen.**

**Thermalwasserfelder** liefern warmes Wasser mit Temperaturen zwischen 40 und 100°C, das als warme Quelle entweder von alleine an die Erdoberfläche tritt oder mit Pumpen gefördert werden kann.

**Hydrothermale Heiß- und Trockendampfvorkommen** haben Temperaturen von 100 bis 250°C. Die Vorkommen stehen meist unter hohem Druck. Beim Anbohren kommt es zu Entspannung. Ein Wasser-Dampf-Gemisch oder trockener Dampf entweichen. Diese können direkt zur Wärme- und Stromerzeugung genutzt werden. Für die geothermische Stromerzeugung sind Heißdampffelder am attraktivsten.

In Deutschland kommen bis auf wenige Ausnahmen nur Thermalwasserfelder vor. Aufgrund des meist hohen Mineralgehalts des Thermalwassers (2 Gramm/Liter) werden diese Anlagen im Dublettenbetrieb, d.h. mit getrennten Wasserkreisläufen gefahren. Dabei wird das heiße Thermalwasser aus 1.000 bis 3.000 Metern Tiefe über eine Förderbohrung an die Oberfläche gebracht.

Das geförderte Thermalwasser zirkuliert an der Erdoberfläche in einem geschlossenen Kreislauf. Über Wärmetauscher gibt es seine Wärme an einen Wärmeträger ab. Dieser zirkuliert in einem separaten zweiten Kreislauf und kann z.B. Turbinen zur Stromerzeugung oder ein Nahwärmenetz speisen.

Das ausgekühlte Thermalwasser wird über eine zweite Bohrung wieder in den Untergrund geleitet, und zwar in die Schicht, aus der es entnommen wurde.

## Die oberflächennahe Geothermie



Die Grafik zeigt oberflächennahe Geothermie mit Erdwärmesonden oder -kollektoren zum Heizen

In einer **Erdwärmesonde** in ca. 100 Meter Tiefe erwärmt sich eine Flüssigkeit (z.B. Wasser) auf bis zu 13°C. Alternativ kann Wasser auch in einem **Erdwärmekollektor** auf eine Temperatur von maximal 10°C erwärmt werden. Der Kollektor breitet sich im Gegensatz zur Erdsonde auf einer ausgedehnten Fläche horizontal in nur ca. 80 - 160 cm Tiefe aus.

Die **Erdwärmepumpe** überträgt die Erdwärme aus der Erdsonde bzw. aus dem Kollektor auf einen Wärmeträger. Der Wärmeträger nimmt diese Wärme auf und verdampft schnell.

Der elektrische Kompressor der Erdwärmepumpe erhöht den Druck und verdichtet den Dampf. Dadurch steigt dessen Temperatur. Die Wärme kann dann in einem Pufferspeicher gesammelt werden und zum Heizen und für die Warmwasserbereitung zur Verfügung gestellt werden.

Die Erdwärmepumpe nutzt die Tatsache, dass sich Gase unter Druck erwärmen. Dieser Effekt ist z.B. bei einer Fahrrad-Luftpumpe spürbar. Die Wärmepumpe hebt die Erdwärme auf ein höheres Temperaturniveau, das für eine Heizungsanlage notwendig ist. Für eine Heizleistung von 3 - 5 Kilowattstunden Wärme benötigt sie ca. 1 Kilowattstunde Strom.

Eine Erdwärmepumpe kann den Wärmebedarf eines Gebäudes zu 100% decken.

Für die **Beheizung von Wohnflächen** reichen schon Bohrungen in heißwasserführende Schichten relativ geringer Tiefe. Hierbei hat sich 100°C - 200°C heißes Wasser gut bewährt, sogar über längere Zeiträume hinweg. Insbesondere dieser ‚nassen Geothermalenergie‘ wird neuerdings mehr Beachtung gezollt, da die Heizkosten hierbei niedriger sind als bei Öl oder Kohle, außerdem ist die Nutzung wesentlich krisenfester.



Vulkanausbruch in Costa Rica in der Dämmerung.

Künstliche Hohlräume im Untergrund können ebenfalls als thermisch nutzbare Grundwassersammler oder -reservoirs dienen. Dabei handelt es sich vor allem um Bergwerke (stillgelegt oder noch in Betrieb) sowie Tunnel, bei denen die Hohlräume nicht primär für eine thermische Nutzung geschaffen wurden. Bei tiefen Gruben und Tunneln wird der Bereich der oberflächennahen Geothermie teilweise bereits verlassen. Überlegungen existieren z.B. zur thermischen Nutzung eines Kohlebergwerks im östlichen Ruhrgebiet, das deutlich tiefer als 1 km ist.



## Geschichte

Die Anwendung geothermischer Energie für die **Stromerzeugung** begann in Italien mit Versuchen des Fürsten Ginori Conti in den Jahren **1904** und **1905**. Das erste Kraftwerk (250 kW elektrische Leistung) wurde in Larderello im Jahr **1913** in Betrieb genommen.

Nutzung geothermischer Energie weltweit Auszug (Stand 2010)					
Land	Installierte Leistung [MWt]	Nutzung [GWh/yr]	Installierte Leistung [MW]	Produzierte Jahresleistung [GWh]	Anzahl der Kraftwerke
USA	12611,00	15710,00	3093,00	16.603	209
Philippinen			1.904	10.311	56
China	8898,00	20931,00	24,00	150,00	8,00
Indonesien			1.197	9.600	22
Schweden	4460,00	12585,00			
Norwegen	3300,00	7001,00			
Deutschland	2485,00	3546,00	6,00	50,00	3,00
Japan	2100,00	7139,00	536,00	3064,00	20,00
Türkei	2084,00	10247,00	82,00	490,00	4,00
Island	1826,00	6768,00	575,00	4597,00	25,00
Niederlande	1410,00	2972,00			
Frankreich	1345,00	3592,00	16,00	95,00	3,00
Kanada	1126,00	2465,00			
Schweiz	1061,00	2143,00			
Österreich	663,00	1036,00	1,40	3,80	3,00
Neuseeland	393,00	2654,00	628,00	4055,00	43,00
Russland	308,00	1707,00	82,00	441,00	11,00
<b>GESAMT</b>	<b>50.584</b>	<b>121.701</b>	<b>10.715</b>	<b>67.246</b>	<b>526,00</b>

*Internationale Übersicht der Geothermie-Nutzung sowohl zur Stromproduktion (MW) als auch zur Wärmeproduktion (MWt)*

Im Mai **2009** weist ein Bericht des Emerging Energy Research Institute Geothermieprojekte im Umfang von 9 GW aus – was etwa 80 % der im Laufe der vergangenen drei Dekaden installierten Leistung entspricht, die von aktuell 10,5 GW auf über 31 GW im Jahr **2020** steigen soll.

Im Juli **2009** veröffentlicht Prof. Melissa Schilling von der NYU Stern University eine Studie, welche die Geothermie als effizienteste aller erneuerbaren Energie ausweist. Mit einer Investitionssumme von 3,3 Mrd. \$ für

weitere Forschungen solle es außerdem möglich sein, die Stromgestehungskosten unter die von fossilen Brennstoffen zu senken.

Auch eine Studie von Deutsche Bank Research kommt Ende **2009** zu einem ähnlichen Ergebnis. Bis **2030** könnte ein neues Investitionsvolumen in Bauvorhaben und Technik von bis zu 75 Mrd. € anfallen.

Sehr interessant ist eine Meldung, die im Dezember **2009** die Runde macht. Das kalifornische Unternehmen Simbol Mining findet eine Methode, wie aus dem heißen Abwasser geothermischer Kraftwerke **Lithium** extrahiert werden kann. Dieses ist insbesondere bei der Batterieherstellung zunehmend gefragt, wo sich der weltweite Verbrauch bis **2020** mindestens verdreifachen wird. Die größten technisch relativ leicht ausbeutbaren Lithiumvorkommen befinden sich in den Salzseen in Bolivien und Chile sowie im Salton Sea in den USA, wo ein geothermisches Demonstrationswerk bald mit der Gewinnung von einer Tonne Lithium im Monat beginnen wird.

## Nutzung in ausgewählten Ländern

### Bundesrepublik Deutschland

Heiße Tiefenwässer gibt es vor allem in drei Regionen Deutschlands: im Rheingraben, im Norddeutschen Becken und im süddeutschen Molassebecken. Folgende Gebiete haben sich als besonders aussichtsreich herausgestellt: Eifel, Westerwald, Vogelsberg, Rhön, Hegau und das Uracher Vulkangebiet. Im Raum München werden in 2.000 – 3.000 m Tiefe Wassertemperaturen bis zu 85°C gemessen, denn die südbayerischen Malm-Schichten – die oberste Jura Formation – weisen eine ergiebige Wasserführung auf. Im Alpengebiet erwartet man in 7.000 m Tiefe eine Temperatur von etwa 300°C und in den Erdölfeldern bei Landau wird ein innerirdischer Wärmestrom gemessen, der auf Temperaturen von ca. 150°C bei einer Tiefe von 2.000 m schließen lässt.

Die Universität Bochum bereitet daher einen Versuch in der Eifel vor, bei dem eine 4.000 m tief liegende Magma-Kammer unter dem Laach-See angebohrt werden soll. Es werden Temperaturen bis 1.000°C erwartet. Das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung wendet dagegen moderne geophysische und geochemische Methoden an, um auch ohne Tiefbohrungen wirtschaftlich nutzbare Wärme zu finden. Um den für dieses Vorhaben wichtigen ‚Curie-Punkt‘ im Tiefengestein errechnen zu können (dieser liegt im Normalfall bei etwa 560°C), reicht bei den modernen Methoden schon eine Bohrung von nur 30 m - 50 m Tiefe aus.

Die erste Pilotanlage für das sogenannte ‚hot-dry-Rock-Verfahren‘ (HDR) entsteht ab 1977 in Bad Urach, südlich von Stuttgart, auf der Schwäbischen Alp in



*RWE Dea Bohrmeißel*

Württemberg. Dieses nationale Projekt läuft bis 1996. Bei diesem Verfahren dient das trockene, heiße Tiefengestein als ‚Tiefsieder‘. Kaltes Wasser wird hinunter- und erhitztes Wasser wieder hinaufgepumpt. Ziel ist die Beheizung von 1.500 Wohneinheiten. Die Arbeitsgruppe Geothermik, die das 13 Mio. DM Projekt durchführt, wird zu 75 % vom BMFT gefördert, den Rest teilen sich die Stadt Bad Urach und die EG. Ausgewählt wird der Ort deshalb, weil an dieser lokalen Anomalie die Wärme pro 100 m Tiefe um 5°C steigt, statt – wie sonst im Durchschnitt – nur um 3°C. Ein zweites nationales Projekt läuft zwischen 1977 und 1986 in Falkenberg.

Die **erste Tiefenbohrung der Welt** wird **1867 in Spereberg** vorgenommen. Man findet heraus, dass in 1.000 m Tiefe Temperaturen von 30°C bis 40°C, und in 2.000 m sogar schon 60°C bis 70°C vorkommen.

Seit **1980** wird die Erschließung der Erwärmung in

verschiedenen Projekten vorangetrieben. Bei Bohrungen zur Erdöl- und Erdgasprospektion im Norden der DDR werden in 8.000 m Tiefe 280°C gemessen, was zeitweilig sogar einen Weltrekord darstellt.

Ab **1984** wird in **Waren-Papenberg** (am Müritzsee) 60°C - 90°C heißes Thermalwasser aus 1.500 m Tiefe gefördert, das für die Beheizung und den Warmwasserbedarf von 860 Wohnungen, 11 Einfamilienhäusern, einer Schule und einem Kindergarten der Stadt genutzt wird. Da das Wasser einen sehr hohen Salzgehalt von 250 – 350 g pro Liter hat (Ostsee: 9 – 10 g/l), wird es über eine Verpreß-Sonde wieder in den Boden gepumpt. Die Energieleistung der Anlage beträgt 3,5 MW, gekostet hat sie 10 Mio. Ost-Mark.

Ende **1998** stimmt der EU-Forschungsministerrat geschlossen dagegen, auch die Geothermie in das 5. Forschungsrahmenprogramm der EU aufzunehmen. Bis **2004** bestehen dadurch nur noch eingeschränkte Fördermöglichkeiten.

Im November **1999** beschließt der Bundestag wiederum, die Geothermie-Forschung bundesweit mit 20 Mio. DM zu fördern. Das GeoForschungsZentrum (GFZ) in Potsdam erhält seitdem rund 3 Mio. DM pro Jahr.

Die Gemeinde **Unterhaching** (20.000 Einwohner) startet **2002/2003** das bundesweit erste hydrothermale geothermische Strom- und Wärmeerzeugungsprojekt im sogenannten ‚Süddeutschen Molassebecken‘. Es ist geplant, zwei Bohrungen in eine Tiefe von jeweils ca. 3.400 m niederzubringen und bis zu 150 l/s an Thermalwasser mit einer Temperatur zwischen 100°C und 120°C zu gewinnen. Mit dem heißen Tiefenwasser sollen bis zu 3,1 MW elektrischer und 16 MW thermischer Leistung erzeugt werden.



Das Institut für Energetik und Umwelt in Leipzig schätzt **2004** das **Strompotential** der Geothermie in Deutschland auf etwa 290 TW/a (bei gleichzeitiger Bereitstellung von Niedertemperaturwärme in erheblicher Größenordnung). **2006** plant die Essener Enro AG den Bau eines geothermischen Kraftwerks in **Brandenburg**. Mit einer veranschlagten Leistung von 25 MW wäre es die größte Anlage dieser Art in Deutschland. Mit einer Investition von 250 Mio. € soll in 5.000 m Tiefe die Wärme von Vulkangestein erschlossen werden. Die Probebohrungen lassen 190°C heißes Thermalwasser erwarten, das dann eine ORC-Turbine antreiben soll.



#### Karte mit Geothermie-Standorten in Deutschland.

Die im Winter **2007/2008** ins Fernwärmenetz eingespeiste Geothermie-Fernwärme beträgt rund 25.000 MWh, was rechnerisch rund 2,5 Mio. Liter Heizöl entspricht. Eine thermische Anschlussleistung von ca. 28 MWth ist bereits vertraglich gesichert. Langfristiges Ziel ist die Installation von 70 MWth Anschlussleistung.

Projektstudien der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, wo im Dezember **2007** eine Professur für Geothermie eingerichtet worden ist, beschäftigen sich Mitte **2008** an drei Standorten in **Rheinland-Pfalz**, wo es mehr als 1000

stillgelegte Bergwerke gibt, mit der Nutzung von warmem Stollenwasser zu Heizzwecken. Grubenwasser entsteht in den Bergwerken, wenn die Pumpen abgestellt sind und das Grundwasser in der Grube ansteigt. Je tiefer die Bergwerke sind, desto wärmer ist das Wasser, so dass in einer Tiefe von 1.000 m eine Wassertemperatur von etwa 40°C vorgefunden wird.

An einem weiteren Verbundvorhaben, das ebenfalls im Februar **2009** initiiert wird, beteiligen sich die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, die Fachhochschule Kiel sowie vier in Schleswig-Holstein ansässige Unternehmen (CITTI Handelsgesellschaft mbh & Co. KG, AX5 Architekten bda, GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH und Sensatec GmbH). Vom Ministerium für Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr des Landes Schleswig-Holstein werden Fördermittel für drei Jahre bereitgestellt, um mit den erwarteten Ergebnissen mittelständischen Unternehmen den Einstieg ins Geothermie-Geschäft zu erleichtern und ihre wirtschaftliche und wissenschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Dabei übernimmt das Ministerium die Hälfte des Finanzvolumens von 3,2 Mio. €. 2009 werden in Deutschland bereits mehr als 100 MW Wärme aus der Geothermie bereitgestellt.



*Bohrturm für Geothermie bei Hannover*

## Island

Die Tradition, heiße Quellen zu nutzen, reicht in Island bis ins **12. Jahrhundert** zurück.

In der Hauptstadt **Reykjavik** wird die Erdwärme schon seit langem zu Heizzwecken genutzt. Bereits **1928** wird dort mit systematischen Bohrungen nach natürlichem Heißwasser begonnen, und ab **1930** beginnt man mit dem Ausbau der Fernwärmeversorgung der Stadt. Man schätzt, dass die Wärmereserven erst in mehreren zehntausend Jahren aufgebraucht sein werden.

Die erste reguläre Geothermieanlage wird Anfang der **1970er** in **Krafla** eröffnet. Nachdem das erste Bohrloch niedergebracht ist, wird die Gegend jahrelang von vulkanischen Eruptionen erschüttert.



*Geothermieanlage Krafla 2*

**1990** verbrauchen die Isländer pro Kopf etwa 17.500 kWh Geothermalenergie. **1991** gehört zum ordentlichen Eigenheim auch eine Heizung unter der Einfahrt und dem Fußweg – man müßte ja sonst Schnee schippen. Zu dieser Zeit gibt es in Island ein 15 MW Kraftwerk und insgesamt rund 100.000 m<sup>2</sup> geobeheizte Gewächshäuser (**1996**: 175.000 m<sup>2</sup>).

**1996** beliefert der kommunale Fernwärmeversorger Hitaveita Reykjavíkur 99,7 % der Bevölkerung der Hauptstadt (155.000 Bewohner) und ihren sechs Nachbargemeinden mit ca. 75°C heißem Wasser für Heizkörper und Bäder. 56 Bohrungen, 640 MW installierte Wärmeleistung und 1.211 km Fernwärmeleitung bilden ein weltweit einmaliges System. Dazu gehören auch 250.000 m<sup>2</sup> Bürgersteige und Parkplätze, unter denen Rohrleitungen mit

35°C warmem Wasser verlaufen und im Winter für Schnee- und Eisfreiheit sorgen. Insgesamt sind in Island zu diesem Zeitpunkt 1.450 MW geothermischer Wärmeleistung und 50 MW elektrischer Leistung installiert – was allerdings nur rund 1,5 % der erschließbaren Vorkommen entspricht. Der Grund hierfür liegt im Überangebot an Energie: Der isländische Strombedarf wird nämlich zu 95 % aus Wasserkraftwerken gedeckt.

**1999** wird die Icelandic Hydrogen an Fuel Cell Company gegründet, an der DaimlerChrysler, der Ölmulti Shell und der norwegische Mischkonzern Norsk Hydro beteiligt sind. Mittels dem durch hydro- und geothermale Energiequellen erzeugten Wasserstoff soll Island das erste Land der Welt werden, das komplett auf einer Wasserstoffwirtschaft aufbaut.



*Badetherme Blaue Lagune mit Geothermieanlage*

Im Jahr **2004** startet das Iceland Deep Drilling Project (IDDP), das sich 5 km tief unter die Erdoberfläche graben will, um dort an die Energie des Magmas zu gelangen. Die Bohrarbeiten selbst beginnen Anfang **2005**: Erst geht es 2,5 km tief, im Jahr darauf dann hinunter auf 4 km, und der endgültige Tiefpunkt soll **2007** erreicht werden. In dieser Tiefe wollen die Geologen auf 400°C bis 600°C

heißes Wasser stoßen, das sich durch die direkt darunter liegende Magmaschicht in eine überkritisch-fluide Flüssigkeit verwandelt mit einem Druck von 221 Bar hat. Das bedeutet, dass sie über die Eigenschaften sowohl von Flüssigkeit als auch von Gas verfügt und voller gelöster Mineralien sowie Metallen ist. Diese höchst interessante Materieform verspricht eine extrem hohe Energieausbeute und könnte gleichzeitig eine echte ‚Goldmine‘ sein falls es gelingt, seltene Stoffe aus ihr herauszufiltern. Aufgrund der technischen Schwierigkeiten verzögert sich das Erreichen der Endtiefe jedoch bis **2009**.

Zu diesem Zeitpunkt heizen bereits 90 % der Einwohner Islands ihre Häuser und Wohnungen mit geothermischer Energie, während die elektrische Energiebereitstellung auf über 500 MW angewachsen ist.

Die Gesamtleistung der kommunalen Fernwärmesysteme in Island beträgt **2007** rund 1.400 MW. Etwa 30 regionale Fernwärmenetze werden von den Kommunen betrieben, an die mehr als 85 % der Haushalte angeschlossen sind. Daneben gibt es rund 25 kleinere, privat betriebene Netze, die jeweils mehr als 50 Haushalte versorgen.



*Ausbruch des Fimmvorduhals auf Island*

## **Schweden**

In Schweden wird Geothermie in erster Linie zum Heizen von Gebäuden mittels Wärmepumpen verwendet. Trotz der nicht gerade idealen geologischen Bedingungen gelingt es die Geothermie in weitem Umfang zu etablieren.

**1985** sind beispielsweise in der Universitätsstadt **Lund** schon 75 % aller Häuser an ein Geo-Fernwärmenetz angeschlossen.

Inzwischen halten die Wärmepumpen 90% des Marktanteils bei Heizsystemen in Schweden. Als Wärmequelle werden ca. 90 % Erdwärmesonden und ca. 10 % Erdkollektoren eingesetzt. Eine Erdwärmesondenbohrung von 100 m Tiefe kostet inklusive Hausanschluss ca. 3.500 €.

## **USA**

Die Stadt **Hot Springs** in Arkansas wird **1807** gegründet. Als **1830** erstmals die Gebühr von einem Dollar für die Nutzung der heißen Bäder erhoben wird, markiert dies den Beginn der kommerziellen Nutzung der Erdenergie in Amerika.

In **Boise**, Idaho, werden ab **1892** mehrere Stadtgebäude mit Fernwärme aus Geothermalquellen versorgt.

Im Sommer **1926** unternimmt die General Electric Co. etwa 60 km nördlich von **San Francisco** den ersten Versuch, Dampf mit hohem Druck und hoher Temperatur zu erbohren. Bald darauf sind mehrere Bohrlöcher angelegt, die z.T. sehr große Dampfmenngen mit Temperaturen von 150°C – 190°C und einem Druck bis zu 13 Atmosphären liefern. Es wird allerdings nur ein kleiner Turbinensatz von 35 kW für Beleuchtungszwecke und zum Betrieb der Bohranlagen installiert. Um die Möglichkeiten einer umfangreicheren Verwertung kennen zu lernen wird eine Studienkommission nach Larderollo in Italien geschickt.

Seit **1970** existiert ein besonderes Gesetz (Geothermal Steam Act), das die Nutzung der Erdwärme vorantreiben soll. Das Ziel ist es, bis **1985** die 20.000 MW Marke zu erreichen - und bis **2025** sollen sogar rund 100 GW Leistung geothermal erzeugt werden.



**1988** erreicht eine Probebohrung in Kalifornien ein Gebiet mit teilweise geschmolzenem Gestein – in 6.400 m Tiefe. Dort werden 500°C gemessen. **1991** wird in Kalifornien bereits die Hälfte des Heizbedarfs von sechs Millionen Einwohnern im Ballungsraum San Francisco-Oakland mit Erdwärme gedeckt.

Im April **2006** wird eine Schätzung bekannt, der zufolge ungenutzte Öl- und Gas-Bohrungen in **Alabama, Arkansas, Florida, Louisiana, Mississippi, Oklahoma** und **Texas** das Potential von mindestens 5.000 MW Geothermie-Strom aufweisen.

**2008** beginnt eine regelrechte Renaissance der Geothermie in den USA. Für den Boom ist möglicherweise ein Bericht des Department of Energy (DOE) mitverantwortlich, in dem festgestellt wird, dass das technisch nutzbare Geothermiepotential 3000 Mal so groß ist wie der gesamte gegenwärtige Energieverbrauch des Landes.



Auf der Abbildung ist das Geothermiepotential der USA in 6.000 m Tiefe dargestellt.

Nach Informationen des amerikanischen Geothermieverbands GEA stehen in den USA im April **2008** knapp 90 Projekte mit einer Gesamtleistung zwischen 2,5 GW und 3,5 GW in der Entwicklung.

Ende **Juni 2008** gibt das US-Energieministerium (US Department of Energy, DOE) bekannt, dass es 90 Mio. \$ in die Geothermie-Forschung stecken wird, wobei schon in **2008** 10,5 Mio. \$ bereitstehen. Für **2009** sind 30 Mio. \$ und für **2010** sogar 49,5 Mio. \$ vorgesehen.

Zeitgleich gibt das US-Innenministerium bekannt, dass es in 11 Staaten insgesamt 475 Millionen Hektar für die Geothermie-Exploration und Verpachtung zur Verfügung stellen wird. Auf dieser Fläche soll ein Energie-Potential von 5.540 MW bestehen, das ab **2015** genug Strom für rund 5,5 Mio. Haushalte liefern könnte. Bis **2025** könnte dieser Betrag sogar auf 12.100 MW steigen.

*Wenn alles gut geht, werden wir bald in der Lage sein, zumindest in kleinen Durchmesser sehr schnell und sehr tief bohren zu können – und zwar mittels Flammen-Jets mit einer Temperatur von 4.000°C, die jede Art von Material durchdringen und eine Bohrgeschwindigkeit bis zu 100 m/s erreichen!*

Der potentielle Schlüssel zu einer günstigen Geothermie geht auf den Erfinder Jared Potter zurück, der mit seinem Spezialbohrer tiefliegende Magma-Kammern erreichen will, um dort eingepresstes Wasser in einen superheißen Zustand zu verwandeln. Anstatt den mechanischen Abrieb zu nutzen soll ein extrem heißer Flammenstrom genutzt werden, der das Gestein ohne direkte Berührung schlicht wegschmelzen lässt. Ein kleiner Prototyp mit einer Wasserstoff-Flammenlanze (1.760°C) schafft bereits gut 30 m in der Stunde. Ein weiterer Prototyp arbeitet mit einem auf 4.000°C überhitzten Wasserstrahl, der auch in sehr großen Tiefen bis 15.000 m und unter extremem Druck funktionieren soll.

## Grenzen der geothermischen Nutzung

Erdwärme-Kraftwerke lassen sich regional begrenzt und oft nur in aktiven oder ehemaligen Vulkanzonen errichten. Meist finden sich die Vorkommen auch in dünn besiedelten Gegenden, wo man sie eigentlich gar nicht braucht. Es besteht neben der unberechenbaren Auswirkung auf die Vulkantätigkeit auch eine Gefahr durch großflächige Bodensenkungen oder durch die Auslösung lokaler Erdbeben, wie Ende 2006 und Anfang 2007 im Zuge des Deep-Heat-Mining-Projekts in Basel. Die aus der Tiefe austretende heiße Sole besteht zumeist aus Wasser, Dampf und einem bestimmten Feststoffgehalt – sie muss also getrennt werden.

Zum Teil treten auch giftige Gase oder aggressive und ätzende Flüssigkeiten aus, darunter Schwefel, Ammoniak, Kohlendioxid, Wasserstoff, Floursäure und Borsäure (in Kalifornien erreicht der Gehalt an Salzen und Mineralien 15 – 20 % !!), die nicht nur die Leitungen sondern auch die Maschinen, vor allem die Turbinen zerstören können. Mit steigender Temperatur steigt meist auch die mineralische Verunreinigung und ihre Aggressivität – und damit die Korrosion und die potentielle Umweltgefährdung.

Das Wasser aus den Tiefen der Erde ist manchmal auch leicht radioaktiv und enthält Kontaminationen von Thorium und Uran, so dass es behandelt werden muss um keine Folgeschäden zu verursachen.

Versuchs- und Erschließungstiefbohrungen sind extrem teuer, desgleichen auch die Installationen. Die Systeme sind sehr energieaufwendig, so ist z.B. für einen Pumpbetrieb ‚nach unten‘ ein sehr hoher Druck erforderlich (bis zu 500 Atmosphären). Technisch und wirtschaftlich gut nutzbare Temperaturen (um 300°C) gibt es meist erst unterhalb von 10.000 m. Einer EG-Studie zufolge liegen wirtschaftlich sinnvolle Aufschlusstiefen allerdings bei höchstens 3.000 m. Die Entnahmedauer für Dampf ist nicht exakt vorausrechenbar.

Beim Hot-Dry-Rock-Verfahren (HDR) ist besonders die notwendige Gesteinsauflockerung sehr aufwendig, die Frac-Ausbreitung ist außerdem nicht vorhersehbar.

Da auch im Heizbetrieb (bei niedrigeren Temperaturen) nur mineralfreies Wasser benutzt werden kann, bedarf es hier teurer Wärmetauscher.

Geothermalkraftwerke sollen sehr laut sein, sie werden mit einem ‚startenden Jumbo‘ verglichen. Nennungen über exakte Wirkungsgrade liegen mir nicht vor, doch die Entwicklung von bei relativ kühlem Dampf effizient funktionierenden Turbinen ist im allgemeinen noch nicht weit fortgeschritten – entsprechend niedrig sind die Wirkungsgrade anzusetzen.



*Geothermie Bohrturm in Kleinmünchen Basel-Schweiz, nach kleinen Erdbeben der in der Zwischenzeit abgebaut*



## Biologische Kraftstoffe

Pflanzen wandeln bei geringen Investitionskosten Sonnenenergie direkt in Biomasse mit brennbarer Zellulose, mit Ölen, Zucker und Stärke um. Statt die Pflanzen sofort zu verbrennen, läßt sich die gespeicherte Energie auch über verschiedene Zwischenprozesse separieren und indirekt nutzen. Aus diesem Grund wurde diese Form der Verwertung auch nicht dem Oberbegriff ‚Sonnenenergie‘ untergeordnet, obwohl die Photosynthese anerkanntermaßen die verbreitetste ‚Solartechnik‘ ist. ‚Nachwachsende Rohstoffe‘ und die Entwicklung und Produktion synthetischer Treib- bzw. Kraftstoffe bilden inzwischen einen wichtigen Punkt nationaler und internationaler Energieprogramme.

*Aber solange Menschen an Hunger sterben, ist eine Technologie die Lebensmittel für die Energieversorgung vernichtet, ethisch nicht zu verantworten.*

Wenn aber Abfallstoffe und nicht extra angebaute Pflanzen verwendet würden, dann wäre dieses interessant. Aber die Bundesregierung subventioniert nur den Einsatz von extra angebauten Pflanzen.

Hier nur die kurze Aufzählung der möglichen Kapitel.

- **Bakterielle Energiegewinnung**

Zur bakteriellen Energiegewinnung gehören viele unterschiedliche Stämme mit ebenso viel unterschiedlichen Resultaten. Die wichtigste Form ist wohl die Biogasgewinnung. Allerdings gibt es auch andere – natürliche und ‚künstliche‘ – Stämme, die in Zukunft möglicherweise größere Bedeutung erlangen könnten. Im Umkreis vulkanischer Quellen in 2.000 – 3.000 m Tiefe werden Bakterien gefunden, welche die Erdwärme nutzen um CO<sub>2</sub> und SH<sub>2</sub> in organische Kohlenstoffverbindungen zu überführen, die sie als Energiequelle benötigen.

- **Biokraftwerke und Biodiesel**

Das ausgepresste Öl der verschiedensten Pflanzen und Früchte wird schon seit Jahrtausenden zu Beleuchtungszwecken verwendet – und sogar heute noch haben Millionen Menschen auf der Welt kein anderes Leuchtmittel als Öllampen, wie wir anderen sie nur noch aus dem Märchen als Zaubерlampe – oder als ‚ewiges Licht‘ in der Kirche kennen. Doch im Zuge der Industrialisierung bekam das Pflanzenöl eine neue Bedeutung... fast jedenfalls!

- **Separation aus der Biomasse**

Da Holz in der Bundesrepublik Deutschland in breitem industriellem Umfang kaum infragekommt, beschäftigt man sich hier auch mit anderen Alternativen, wie z.B. mit Stroh. Je nach Getreideart fallen pro Tonne Getreide eine halbe bis eine Tonne Stroh an. Drei Tonnen luftgetrocknetes Stroh können etwa 1.000 Liter Heizöl ersetzen. Der Brennwert des Strohs von einem Hektar Getreide entspricht – auf dem Niveau dieses Landes – etwa 1.200 l Heizöl. Es wird gesagt, daß der Ertrag von 2 bis 4 Millionen Hektar der Verbrennung zuführbar sind. Von den derzeit produzierten 25 Mio. t Stroh sind 20 % nicht nutzbringend verwendbar, könnten also ohne Schwierigkeiten zur Energiegewinnung genutzt werden. Diese Menge entspräche ca. 1,3 Mio. Tonnen Heizöl. Leider aber verwendet man meistens Mais.

- **Ethanol (Äthanol)**

Trivialname: Alkohol, ist eine bei Raumtemperatur farblose, leicht entzündliche Flüssigkeit mit der Summenformel C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O. Die reine Substanz hat einen brennenden Geschmack und einen charakteristischen, würzigen Geruch. Bekannt ist Ethanol als Bestandteil von Genussmitteln und Volksdrogen wie Wein, Bier usw.

- **Der Elsbett-Motor**

Im Deutschen Raum ist der Elsbett-Motor wohl einmalig, und das aus verschiedenen Gründen. Zum einen hat sich damit nicht ein Einzelerfinder, sondern eine ganze ‚Erfinder-Familie‘ beschäftigt, zweitens hat der Motor bewiesen, daß er mit wirklich jeder Art Öl fahren kann, und drittens ist er auch technisch auf dem Niveau der Karossen, in die er eingebaut wird – wie zum Beispiel Wagen der Marke Mercedes.

1 Liter Benzin enthält 31,17 Mega-Joule und entwickelt in einem Ottomotor mit Katalysator einen 26% Wirkungsgrad, was einer Wirtschaftlichkeit von 100% entspricht. (Bezuggröße)

1 Liter Raps-Methyl-Ester enthält 32,60 Mega-Joule und entwickelt in einem Kammerdiesel einen 28% Wirkungsgrad, was einer Wirtschaftlichkeit von 108,5% entspricht.

1 Liter Pflanzenöl kaltgepresst und unbehandelt enthält 33,7 Mega-Joule und entwickelt in einem Elsbett-Motor einen 40% Wirkungsgrad, was einer Wirtschaftlichkeit von 160% entspricht.

- **Pflanzenölkocher**

In den Entwicklungsländern kochen im Jahr 2006 noch immer 2 – 2,5 Milliarden Menschen an offenen Feuerstellen mit Holz, gefährden dabei ihre Gesundheit und ruinieren die Umwelt. Bis zu 700 kg Feuerholz werden in den armen Ländern für jedes Familienmitglied jährlich zur Essenszubereitung verfeuert.

Die Universität Hohenheim entwickelt daher gemeinsam mit der landwirtschaftlich ausgerichteten philippinischen Leyte State University einen Pflanzenölkocher mit dem Namen ‚Protos‘, der ab 2004 während einer über einjährigen Erprobungsphase in 100 philippinischen Haushalten und ländlichen Garküchen seine Bewährungsprobe besteht. Er erreicht Brenntemperaturen bis 1.400°C.

- **Methan (Biogas)**

Reines Methan könnte auch im Rahmen der Untertage-Kohlevergasung gewonnen werden, wobei die Reaktion von Kohlenstoff mit Wasserstoff durch in den Flöz eingepumpten Wasserstoff stattfindet. Eine weitere Methode ist die Gewinnung aus Kalk. Dabei wird der Kalk unter Zugabe von Nickel bzw. Magnesiumhydroxid als Katalysator auf 400°C erhitzt, worauf Methan frei wird. Aus Kalk bestehende Gebirgsstöcke stellen die größten Lagerstätten von gebundenem Kohlenstoff dar.

- **Methanhydrat**

Methan, das am Meeresgrund austritt, wird durch den hohen Druck und die tiefe Temperatur zu festem Methanhydrat, auch als „Methaneis“ bezeichnet, umgewandelt.

- **Methanol (Methylalkohol)**

Methanol ist eine organische Grundchemikalie und ein mengenmäßig bedeutender großtechnisch hergestellter Alkohol. Die technische Herstellung von Methanol erfolgt ausschließlich in katalytischen Verfahren aus Synthesegas, einem Gemisch von Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff im Verhältnis von etwa 1:2. Das zur Methanolsynthese notwendige Synthesegas kann aus fossilen Rohstoffen wie Kohle, Braunkohle, Erdölfraktionen und Torf hergestellt werden. Beim Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen wie Holz, Biogas oder anderer Biomasse bezeichnet man das Produkt auch als Biomethanol. Weiterhin kann auch Müll oder Klärschlamm zur Synthesegasherstellung eingesetzt werden.

## Wasserkraft

Wasserkraft ist die einzige sich erneuernde Energiequelle, die schon länger großtechnisch genutzt wird und nennenswert zur Versorgung der Erdbevölkerung beiträgt. Die Art und Weise dieser Ausnutzung ist sehr unterschiedlich, zu Energiezwecken wird aber meistens ein natürlicher oder künstlich hervorgerufener Wasserstrom bzw. Wasserfall durch Turbinen geleitet, welche – unabhängig von Ihrer Art – die Strömungsenergie oder die Fallenergie des Wassers in mechanische Rotationsenergie umwandeln, wobei nachgeschaltete Generatoren aus dieser Rotationsenergie wiederum elektrischen Strom erzeugen. Sämtliche Transformationsprozesse dieses Vorgangs laufen mit sehr hohen Wirkungsgraden ab, auch haben die Installationen im Allgemeinen eine recht lange Lebensdauer und die potentielle Gefährdung der Umwelt ist relativ gering.

Das wirtschaftlich ausbaubare **Wasserkraftpotential** der Welt umfasst 15 Milliarden MWh jährlich. Davon werden erst rund 20 % genutzt, obwohl Wasserkraft unter den erneuerbaren Energien bereits eine herausragende Stellung einnimmt: Etwa 3 % des gesamten deutschen Nettostromverbrauchs stammen im Jahre **2011** aus dieser Energiequelle, während alle anderen regenerativen Energien zusammen lediglich 17 % betragen. Vor 10 Jahren war das noch ganz anders.

Es gibt kaum Kritik am Konzept der Wasserenergienutzung, eine Ausnahme bildet hierbei die Behauptung, dass das ‚lebendige‘ Wasser in Schnellläuferturbinen sozusagen ‚totgeschlagen‘ wird. Als Alternative wird vorgeschlagen *Wirbelturbinen* einzusetzen, die auch einen höheren Wirkungsgrad besitzen sollen.

Voith Siemens Hydro hat für amerikanische Kunden Turbinen entwickelt, die durch spezielle Kanäle Luft ins Wasser blasen. So ergänzen sie den schlechten Sauerstoffhaushalt eines Flusses. Sogar fischfreundliche Turbinen hat das Unternehmen im Programm. Ihre Schaufeln sind so geformt, dass sie den Fischen ein sicheres Durchschwimmen ermöglichen.

Es kann in jedem Fall konstatiert werden, dass trotz der inzwischen Jahrhunderte langen Erfahrung im hydromechanischen und hydroelektrischen Bereich die Entwicklung noch lange nicht abgeschlossen ist; sondern dass wir sogar erst am Beginn dieser Entwicklung stehen.

## Geschichtlicher Rückblick

### Wassermühlen

Historisch dokumentiert ist das **von Menschen betriebene Schöpfrad** in einem Schadensbericht, der sich vor etwa 3.200 Jahren in Mesopotamien zugetragen hat. Auf einer Tontafel ist vermerkt, dass ein Mann für ein 17-stufiges, 6 m hohes Tretrad eines Wasserschöpfrades Ersatz zu leisten habe.

Die wahrscheinlich **ältesten Maschinen dieses Planeten**, die sich seit etwa **2.500 Jahren** (!) mehr oder minder ununterbrochen in Bewegung befinden, sind die **römischen Wasserräder am Orontes in Syrien**.

Diese zum Teil über 20 m durchmessenden Schöpfräder, die an kilo-meterlange Viadukte angeschlossen

sind, werden von der Strömungsenergie des Flusses selbst angetrieben, ihr Wasser diente lange Zeit zur Wasserversorgung der Stadt Hama. Heute wird es nur noch zur Bewässerung genutzt.



*Norias am Orontes*



Wasserräder mit archimedischer Spirale  
(Modell)



Schwimmende Mühle (Modell)

Eine interessante Anwendung des Wasserrades findet man in den **schwimmenden Mühlen**. Erfunden wurden sie während der Belagerung Roms durch die Goten **537 n. Chr.** durch den byzantinischen Feldherrn Belisarius (Balisar), der ein Jahr zuvor die meisten römischen Provinzen auf der italienischen Halbinsel besetzt hatte.

In jener Zeit wurden die meisten Wassermühlen in Rom durch Wasser aus den Aquädukten betrieben. Die Belagerer zerstörten diese Wasserzufuhr, um die Römer auszuhungern. Daraufhin ordnete Belisarius an, Getreidemühlen mit Wasserrädern auf Schiffen zu bauen, die im Tiber verankert wurden. Belisar soll auch auf die Idee gekommen sein, Schaufelräder zu nutzen, um gegen die Strömung zu fahren. Dabei wickelten die vom strömenden Wasser angetriebenen Räder ein Seil auf, und zogen das **Schaufelradboot** flussaufwärts. Im **12. Jahrhundert** wurden drei schwimmende Mühlen unter dem Brückenbogen des Grand Pont in Paris installiert.

Es muß wohl gegen Ende des **15. Jahrhunderts** gewesen sein, als Leonardo da Vinci die ‚archimedische‘ Spirale weiterentwickelte. Statt einer starren, inneren Schraube wickelte er Schläuche um die schrägliegende Rundachse – und löste damit nebenbei das Problem der Undichtigkeit.

Die Bezeichnung ‚**Turbine**‘ wurde **1824** (o. **1826**) im Rahmen eines öffentlichen Wettbewerbs der Société d’Encouragement pour



da Vinci Spirale (Modell)

l’Industrie Nationale gefunden. Es war ein Preis von 6.000 Franc für die Konstruktion eines Wasserrades ausgesetzt, das industriell verwendet werden konnte – ohne Leistungsverlust unter Wasser. Einer der Mitbewerber, der Franzose Claude Burdin (1790 – 1873), schlug vor, ein solches Rad ‚Turbine‘ zu nennen, nach dem lateinischen Wort **turbo, Wirbel**.

Als das größte Wasserrad Europas gilt das 1854 von dem Ingenieur Robert Casement errichtete Great Laxey Wheel,

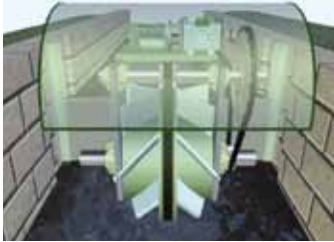


Great Laxey Wheel

das bis 1929 dazu diente, Wasser aus dem Bergwerk der Blei und Zink abbauenden Great Laxey Mining Company zu pumpen. Mit

seinem Durchmesser von rund 22 m gilt es heute als eine der wichtigsten Touristenattraktionen im Nordosten der Isle of Man. Es ist auch auf der britischen 20 Pfund Note abgebildet.

Im Laufe der Jahrzehnte wurden viele Weiterentwicklungen gemacht. Wenden wir uns aber nun der neueren Zeit zu.



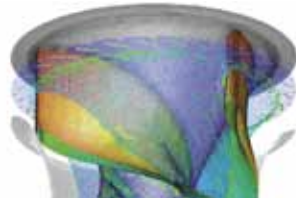
*Staudruckmaschine*

Eine Entwicklung aus Österreich ist die **Staudruckmaschine** (SDM) des 2008 verstorbenen Adolf Brinnich. Sie ist auch bei niedrigen Wasserständen einsetzbar, kann mit einem oder mehreren Laufrädern

nebeneinander ausgestattet werden und besitzt eine hohe Umweltverträglichkeit.

Der Wirkungsgrad soll bei 90 % liegen. Angeboten wird die Innovation von der Firma Wicon-Generatoren in Wien.

2008 wird erstmals eine neue magnetisch gelagerte Turbine getestet. Die Untersuchungen im Auftrag der Free Flow Power, die entlang des Mississippi Tausende Unterwasserturbinen installieren will (s.u.) erfolgen im Strömungskanal der Alden Labs in Holden, Massachusetts.



*Alden Turbine (Grafik)*

Im März 2010 sucht das Electric Power Research Institute (EPRI), ein unabhängiges non-profit Institut, nach einem Standort um die besonders Fisch-freundliche **Alden Turbine** zu testen und zu bewerten.

## Laufwasserkraftwerke



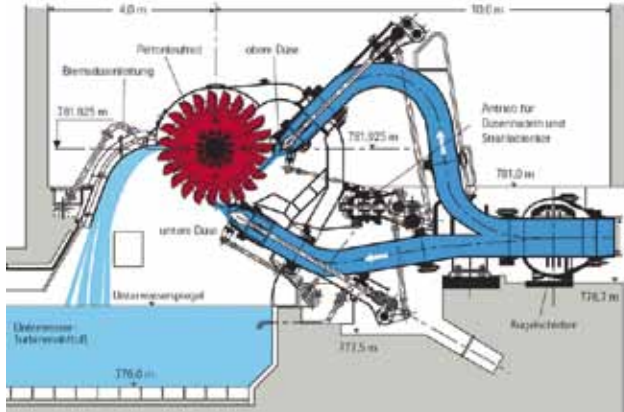
*Laufwasserkraftwerk Säcking*

Es scheint die Grand Rapids Electric Light and Power Co. in den USA gewesen zu sein, die **22.03.1880** das erste ‚hydroelektrische‘ Kraftwerk installierte. Die Anlage wurde in der Fabrik der Wolverine Chair Company errichtet und versorgte ein Theater und die Schaufenster von Geschäften mit elektrischem Licht. Die erste ‚kommerzielle‘ Anlage wurde zweieinhalb Jahre danach, am **30.09.1882** in Appleton, Wisconsin, am Fox River installiert. Die später Appleton Edison Light Company genannte Anlage war von dem Papierfabrikanten H. F. Rogers in Auftrag gegeben worden, der sich von Thomas Edison hatte inspirieren lassen. Die Anlage war mit einer 107 cm durchmessenden Wasserturbine ausgerüstet und lieferte 25 kW. Ab diesem Zeitpunkt begann man überall auf der Welt mit dem Bau von Wasserkraftwerken.

Ein klares Unterscheidungsmerkmal gegenüber anderen hydroelektrischen Anlagen ist, dass bei Fluß- oder Laufwasserkraftwerken höchstens Wehre, nicht jedoch Dämme errichtet werden. Man bemüht sich hier, das freie Fließen des Flusses möglichst wenig einzuschränken.



Die stark gefallen Kosten für Wasserturbinen und Generatoren lassen inzwischen wieder den ehemals vorhandenen und dann durch die billigen Kohle- und Ölpreise aufgegebenen Einsatz von ‚Mini-Stationen‘ an kleineren Flüssen und größeren Bächen sinnvoll erscheinen – hier liegt sogar im mitteleuropäischen Raum ein recht großes Potential brach.



*Wasserturbine mit Generator*

Um **1900** waren in Deutschland noch etwa 70.000 vorwiegend kleine Wasserkraftwerke in Betrieb – heute, rund 100 Jahre später, existieren höchstens noch 10 % davon. Bei einer Erhebung in Bayern im Jahr **1983** wurden exakt 4.054 Kleinanlagen unter 1 MW gezählt.

Da es sich bei der Wasserenergie um die weltweit größte und sauberste Quelle erneuerbarer Energie handelt – und da es im Sinne einer weltweiten dezentralen Nutzung der Wasserenergie in erster Linie um besonders kleine Wasserkraftwerke geht, werde ich die aktuelle Entwicklung in diesem Bereich hier näher beleuchten.

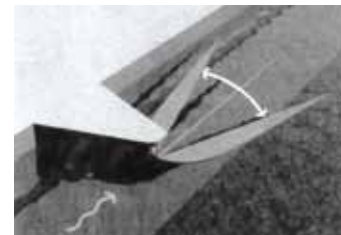
In Vietnam gibt es **Pico Hydro** Anlagen, man rechnet inzwischen mit über 100.000 Stück, die sich landesweit im Einsatz befinden, wobei ein Generator mit einer Leistung von 300 W nicht mehr als 20 \$ kostet und den Stromverbrauch

einer ganzen Familie decken kann. Da diese Leistung auch über 365 Tage im Jahr und 24 Stunden am Tag geliefert wird, erübrigt sich eine teure Batteriespeicherung. Selbst das komplette System inklusive aller Rohre, Kabel, Montagekosten usw. kostet selten mehr als 200 oder 300 \$ und ist damit auch für einen großen Teil der Bevölkerung erschwinglich.



*Mikro-Hydro Turbinen (Vietnam)*

Eine weitere neue Methode, die Fließgeschwindigkeit des Flusses energetisch zu nutzen, hat der deutsche Ingenieur Lutz Kroeber entwickelt. Sein **Transverpello** besteht lediglich aus einem Flügelement, das wie eine Fahne am Mast an einer vertikalen Achse im Wasser hängt und sich mit der Strömung hin und her bewegt. Diese Pendelbewegung wird am freien Ende des Flügels abgenommen. Eine Pleuelstange überträgt die Kraft der Pendelbewegung über eine drehende Schwungmasse auf den Generator an Land. Jedes mal dann, wenn der Flügel seine äußerste seitliche Auslenkung erreicht hat, kehrt sich die Flügelwölbung durch die Kraft der Strömung um.



*Transverpello Funktion*

Das Wasser eines 2 m tiefen Flachlandflusses erzeugt an einem zwanzig Meter langen Flügel eine enorme Zugkraft. Sie entspricht ca. 10 t und wächst mit wachsender Flügelänge. Wird nun in einem gemächlich fließenden Flachlandfluß ein nur relativ kleiner Fleck Sohle von beispielsweise 50 x 15 m betoniert, so fließt über dieser Platte das Wasser doppelt so schnell. Die erhöhte Fließgeschwindigkeit bringt an dieser Stelle die mehrfache

Das Wasser eines 2 m tiefen Flachlandflusses erzeugt an einem zwanzig Meter langen Flügel eine enorme Zugkraft. Sie entspricht ca. 10 t und wächst mit wachsender Flügelänge. Wird nun in einem gemächlich

Energie, sie liegt zwischen dem Vier- und dem Achtfachen. Im Jahr **2006** erhält die **VLH Turbine** der Firma MJ2 technologies S.A.R.L aus Frankreich, ein internationales Patent, das bereits **2003** beantragt worden ist. Schon im April **2004** stellt MJ2 ein weiterentwickeltes Konzept vor, doch es dauert noch bis zum März **2007**, als diese äußerst solide Turbine erstmals im französischen Troussy (Millau) installiert wird. Ihr Wirkungsgrad soll rund 90 % betragen. Die VLH Turbine hat eine sehr niedrige Kopfhöhe und wird schräg abwärts zum Wasserfluß montiert. Sie ist auch bei Fallhöhen unter 3,2 m einsetzbar. Die Rotorblätter ähneln denen einer Kaplan-turbine. Durch ihren großen Durchmesser und die langsame Drehzahl gilt die VLH-Turbine mit unter 5 % Sterblichkeit als sehr fischfreundlich.



*VLH Turbine*

Ein ganz aktuelles und sehr durchdachtes schwimmendes Kleinkraftwerk kommt aus Österreich: die Strom-Boje der Firma Aqua Libre Energieentwicklungs-GmbH in Munderfing. Hier dreht sich der Rotor in einem an Seilen befestigten, frei schwebenden Strömungskanal, der sich in Höhe und Fließrichtung selbst reguliert und ohne jeden Eingriff oder jede bauliche Maßnahme im Fluß auskommt. Wirtschaftlich einsetzbar ist die Strom-Boje in Flüssen ab einer durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit von 2 m/sec, gut geeignet sind mittlere bis große Flüsse mit einer

Mindestbreite von 4 m und einer Mindestdiefe von 2 m. Das Unternehmen plant, Strom-Bojen als einzelne Module mit verschiedenen Leistungen bis ca. 140 kW und mit Rotordurchmessern bis ca. 4 m zu entwickeln. Mehrere Module können dann zusammengehängt werden, wodurch ‚Wasserparks‘ mit einer Gesamtleistung von je 1.000 - 2.000 kW und einem jährlichen Ertrag von bis zu 10 Millionen kWh entstehen.

Das erste 1:1-Modell wird **2006** in den Fluß Wachau eingehängt und erfüllt die Hoffnungen des Entwicklerteams in vollem Maße. **2008** wird an der Optimierung der Leistung anhand von Modellen im Schleppkanal der SVA Potsdam, sowie an der Fertigungstechnik gearbeitet. Dieses Projekt wird im Rahmen des Ziel 2-Programms aus Mitteln des EFRE (Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung) sowie aus Landesmitteln der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) gefördert.



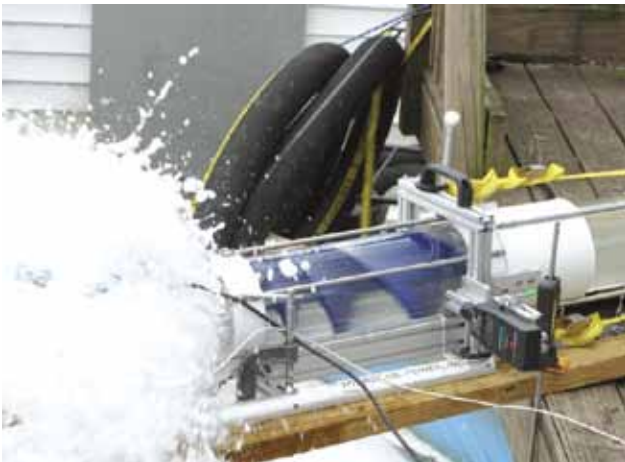
*Strom-Boje beim Transport*

Die neuesten Entwicklungen der Jahre **2009** und **2010** beweisen, dass diese Technologie einerseits noch weiter optimierbar ist, und andererseits, dass es in Österreich für kleinere und mittlere Unternehmen wesentlich einfacher ist als in Deutschland, für ihre innovativen Projekte öffentliche Unterstützung zu erhalten. Außerdem zeigt sich, dass die Strom-Boje das Donau-Hochwasser schadlos überstanden hat.



Ab Oktober **2009** schwimmt der zweite, schon seriennahe Prototyp **Strom-Boje 2** - ebenfalls mit einem 150 cm Rotor - in der Donau. Bis Juni **2010** wird er getestet, verbessert und zur Serienreife entwickelt. Diese Baugröße mit 15 kW Nenn- und 30 kW Engpaßleistung wird dann einen Jahresertrag von etwa 100.000 kWh erbringen. Am 1. Juni wird sogar ein neuer Weltrekord für Strömungskraftwerke aufgestellt - bei einer Fließgeschwindigkeit von 3 m/s: Das Kraftwerk leistet bis zu 10 kW pro Quadratmeter Rotorfläche!

Ab dem Herbst **2010** wird die nächste Baugröße mit einem 250 cm Rotor und einer Leistung von 40 - 80 kW und ca. 250.000 kWha gebaut, eingehängt und getestet. Der Start einer Kleinserienproduktion soll dann **2011** erfolgen.

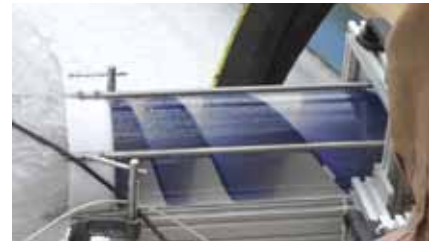


*HydroCoil Turbine im Test*

Im Juni **2008** präsentiert **HydroCoil Power Inc.** aus Wynnewood, Pennsylvania, eine patentierte kleine Wasserturbine, deren Schneckenrotor in Richtung Ablaufseite einen abnehmenden Anstellwinkel aufweist (im Unterschied zur archimedischen Spirale). Die mitsamt verkapseltem Generator 18 kg schwere **HydroCoil Turbine** ist 85 cm lang, hat einen Durchmesser von 15 cm und soll

bis 1,5 kW leisten. Für größere Anlagen kann man die Rohrturbinen bündeln.

Die Technologie dieses Schneckenrotors ist bei der im Jahr **2000** gegründeten und ebenfalls in Wynnewood ansässigen Firma **FLUID motive Inc.** entwickelt worden, allerdings als Antriebs- bzw. Pumpsystem. Die Firma gehört auch dem Besitzer der HydroCoil Power.



*HydroCoil Turbine (Detail)*

Der sogenannte Ribbon Drive erhält im **2001** und **2002** mehrere Patente, **2003** ist der erste Edelstahl-Prototyp fertig. Vermutlich ist die mangelnde Resonanz der Grund dafür, die Technologie für die Energieerzeugung zu adaptieren.

Im Juni **2008** beginnt das österreichische E-Werk Kindberg an der Mürz, das mit zwei Francis-Turbinen ausgerüstet ist, mit der Einspeisung von zusätzlicher elektrischer Energie, die durch eine **Restwassermaschine** gewonnen wird. Die wirtschaftlichste Lösung, die innerhalb von nur 7 Monaten umgesetzt werden kann, ist eine **Wasserkraftschnecke**, die zu diesem Zeitpunkt als die weltweit größte gilt. Dabei handelt es sich um eine Umkehrung des Prinzips der Archimedischen Schraube.

Das jahrelang ungenutzte Restwasser der bereits **1905** errichteten Wehranlage liefert nun jährlich rund 500.000 kWh Strom. Bei einer Auslegung auf 5 m<sup>3</sup>/s und einer Fallhöhe von 3,7 m



*Wasserkraftschnecke*

hat die Maschine einen Durchmesser von 3,6 m bei einer Länge von 19 m. Die 24 Tonnen schwere Anlage der BEA Electric GmbH aus Wien erreicht bei einer Nenndrehzahl von 21 U/min eine Maximalleistung von 142 kW, angeschlossen ist ein 160 kW Generator. Der Wirkungsgrad liegt zwischen 80 % und 90 %, die Anlage ist robust, verschleiß- und störungsarm, benötigt keine Reinigung und nur wenig Wartung. Im Vergleich zu Turbinenanlagen sind auch nur geringe Tiefbauarbeiten erforderlich. Neben Kindberg sind Wasserkraftschnecken in Österreich auch Niklasdorf bei Brigl & Bergmeister, in Lunz NÖ sowie in Salzburg-Stadt verbaut worden.

Im August startet der Betrieb des Wasserkraftwerk am Blümer Wehr in Hann. Münden. Nun wird direkt an der alten Werrabrücke Ökostrom, mit zwei imposante



*Bau des Wasserkraftwerk am Blümer Wehr in Hann. Münden im März 2011*

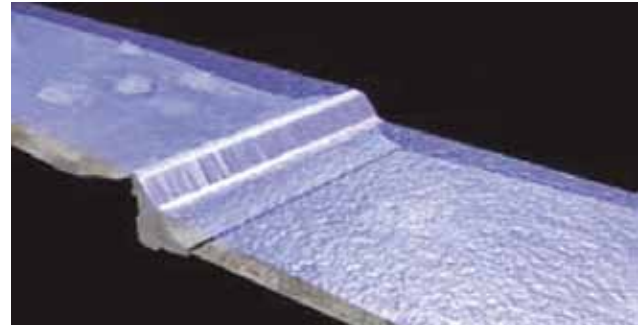
Wasserkraftschnecken (je 75kW), produziert. Durch die beiden fischschonenden Wasserkraftschnecken können pro Sekunde zusammengerechnet bis zu 17 Kubikmeter Wasser fließen.

Die weltweit erste bewegliche, über- und unterströmbare Wasserkraftanlage der Firma **Hydro-Energie Rohr GmbH** aus Karlsruhe wird Mitte **2009** für den Anlagenstandort Sophienwehr/Ilm in Bad Sulza gebaut. Die Anlage, die sich automatisch dem Wasserstand anpasst, erzeugt 60 kW elektrische Leistung, was pro Jahr etwa 400.000 kWh Strom entspricht. Das Krafthaus, welches die Turbine und den Generator enthält, besteht aus einem 18 m langen und 5 m breiten Stahlkörper, der komplett unter der Wasseroberfläche liegt. Er ist in einen nach oben offenen



Betontrog eingebettet und an seinem oberen Ende drehbar gelagert. Bei niedrigem Wasserstand liegt das Krafthaus mit seinem unteren Ende auf dem Boden des Betontrogs auf. Führt der Fluss viel Wasser, wird es automatisch über Hydraulikzylinder bis zu 2,5 m nach oben geschwenkt, sodass der Stahlkörper oben und unten vom Fluss umströmt wird. Dadurch entsteht am Ende des Krafthauses ein starker Sog, der die Druckunterschiede in der Turbine erhöht und rund 10 % mehr Strom gewinnt als ein herkömmliches Kraftwerk gleicher Größe.

Das System ist besonders umweltschonend, da Fische, Geröll und Treibgut die Anlage darüber und darunter passieren können. Ebenso ist die Wanderung von Fischen gegen den Strom möglich.



*Hydro Energie Roth (Grafik)*

Im Juli 2010 wird auf der Elbe in Magdeburg eine neuartige, auf dem Wasser schwimmende Wasserkraftanlage getestet, die weder die Schifffahrt auf der Elbe behindert, noch in die umliegende Vegetation eingreift.

Die 16 m lange und 6 m breite Wasserkraftanlage Anlage am Petriförder, Magdeburgs Elb-Promenade, verfügt über eine Leistung von 130 kW und erinnert optisch an einen Katamaran, in dessen Mitte ein Schaufelrad befestigt ist. Der Ertrag reicht aus um 300 Haushalte zu versorgen. Bei der jetzigen Auslegung des Schaufelrades benötigt die Anlage eine Eintauchtiefe von 1,20 m um gute Leistungen zu erzielen.



*Testanlage bei Magdeburg*

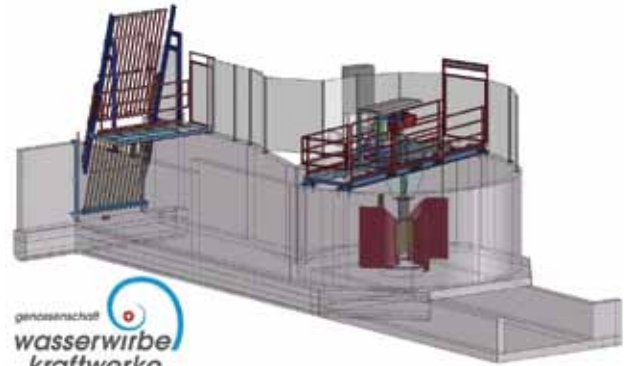
Im März 2011 geht ferner ein River Rider der Firma Bänecke Industrieservice & Wasserkraft aus Königshütte/Harz in den Testbetrieb, dessen Raddurchmesser 2 m und dessen Breite sogar 4 m beträgt.



*River Rider I, erster Flussmühlen-Prototyp im Auslaufbereich der Talsperre Wendefurth/Harz*

Dieses zum Patent angemeldete Wasserrad, das eigentlich den Schiffsmühlen zugeordnet werden kann, leistet 1 - 2 kWh und ist dort installiert, wo die Bode aus der Talsperre Wedefurth herausfließt. Gekostet hat das Projekt rund 38.000 €.

## Gravitationswasserwirbelkraftwerk (GWWK)



*Aufbau eines Gravitationswasserwirbelkraftwerk Grafik*

Wasserwirbeltechnik, der geniale österreichische Diplomingenieur Franz Zotlöterer aus Obergrafendorf hat sie bis zur Produktreife entwickelt.

Sein **Gravitationswasserwirbelkraftwerk** ist ein völlig neuartiges Flusswasserkraftwerk für Fallhöhen bereits ab 0,7 m, bei dem durch rein strömungstechnische Maßnahmen Energie erzeugt und gleichzeitig die Wasserqualität verbessert wird. Eine einfache, selbst durchfluss regelnde Turbine mit einem Wirkungsgrad von über 80 % entzieht dem **Wasserwirbel** Rotationsenergie und treibt einen Generator an. Der Gesamtwirkungsgrad der robusten, einfachen und wartungsarmen Konstruktion liegt in der Größenordnung herkömmlicher Wasserkraftanlagen.

Im Juli 2009, als die ARGE Wasserwirbelkraftwerke Schweiz bzw. die Firma WWK Energie GmbH einen exklusiven Patentlizenzvertrag für die Schweiz abschließt, übernehmen damit sie die eigenständige Forschung und Weiterentwicklung sowie die Planung, den Bau und den Betrieb von kompletten Anlagen in der gesamten Schweiz. Technisch könnten Leistungssteigerungen bis zu 50 % realisiert werden – mit der Entwicklung eines neuen optimierten Rotors, einer verbesserten



Strömungsführung (z.B. mittels einer automatischen Abflussloch-Größensteuerung), sowie eines weiter automatisierten und mit der Wassermengen- bzw. Fallhöhensteuerung kombinieren Frequenzwandler und mit einer strömungstechnisch optimierten Wanne.



*GWWK-Anlage an der Suhre in Schöffland*

Schon im Juli erfolgt dann der Spatenstich für das erste Wasserwirbelkraftwerk der Schweiz im Kanton Aargau. Der Bau der neuen Anlage an der Suhre in Schöffland erfolgte dann in Rekordzeit, und Anfang November 2009 wird das 1,7 Tonnen schwere Rotor/Generator-System installiert. Anschließend beginnt der Probe-Betrieb.

Mit einer nutzbaren Wasserdurchflussmenge von 0,8 – 2,2 m<sup>3</sup>/s, einem Beckendurchmesser von 5,5 m und einer Fallhöhe von 1,4 m produziert die Anlage bis zu 15 kW elektrische Leistung, was einer Jahresproduktion von bis zu 90.000 kWh und ausreichend Strom für 20 - 25 Haushalte entspricht. Die Rotationsfrequenz der Turbine beträgt 0,35Hz (~ 21 U/min).

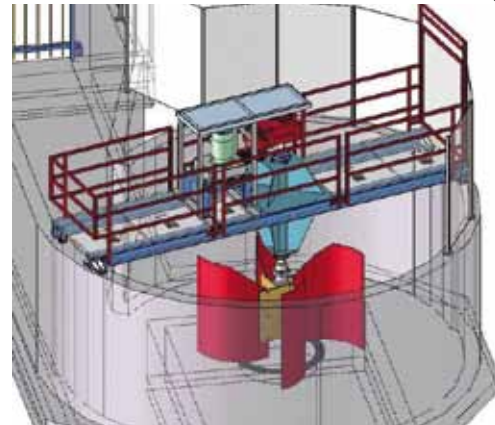
Die Kraft des Wassers manifestiert sich wunschgemäß und dem Vorbild der Natur entsprechend in einem **starken und beständigen Wirbel**. Die Leistung von 8 kW – 15 kW kann nach nur wenigen Einstellungsänderungen sogar während der Trockenheit und bei niedriger Wassermenge erreicht werden.



*Rotor der GWWK-Anlage*

Auch Fische konnten schon beobachtet werden, die im Wasserwirbelkraftwerk aufgrund seines Höchstmaßes an ökologischer Durchgängigkeit auf- und abwärts geschwommen sind. Außerdem aktiviert die Sauerstoffzufuhr des Wasserwirbels die Selbstreinigungskräfte des Flußwassers.

Vorerst sind 30 weitere Kraftwerke in der Schweiz geplant,



*Rotor des Gravitationswasserwirbelkraftwerks in der Grafik*

14 davon sind bereits beim Bund bzw. Swissgrid für die kostendeckende Einspeisevergütung (KEV) angemeldet, und über 10 Wasserwirbelkraftwerke sind bereits in Planung. Sie alle sollen bis 2015 fertiggestellt sein.

## Wasserfall



*Die Niagara-Fälle  
Luftbildaufnahme*

Eine energetische Ausnutzung natürlicher Wasserfälle, d.h. ohne den Bau von Staumauern, scheint nicht statt zu finden.

Ein Beispiel hierfür sind die Niagara-Fälle:

Nur 25 - 50 % des Wassers stürzt touristenanziehend in die Tiefe, während die Kraft der größeren Wassermenge mittels entsprechender Wehre und Staustufen gemeinsam von den USA und Kanada zur Stromerzeugung genutzt wird. In Stichworten:

- Fallhöhe 52 m (kanadischer Teil)
- Durchschnittliche Wassermenge 4.200 m<sup>3</sup>/s
- Maximale Energieleistung 4,4 GW
- Kanadischer Teil 2,4 GW
- Erstes Kraftwerk 1895/96 mit 75 MW



*Die Niagara-Fälle  
Staumauer des Kraftwerks*

## Staudämme

Die heutzutage meist angewandte Methode der Wasserkraftnutzung ist mittels eines Staudammes ein großes Gefälle zu erzielen, wobei die Turbinen und Generatoren innerhalb des Damms Platz finden. Staudämme gibt es fast in allen Ländern und, in sehr unterschiedlichen Dimensionen. Ein Großteil der weltweit vorhandenen Dämme wird jedoch nur zur Speicherung von Nutz- und Regenwasser für die Landwirtschaft und als Trinkwasserspeicher genutzt, und nur die größten Staudämme gelten der Stromversorgung – wobei hier mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von rund 85 % gerechnet wird.

Der erste Damm, der nachweislich aus hydroelektrischen Erwägungen gebaut wurde, wurde **1894** am Willamette River bei Oregon City, Oregon, errichtet.

Im Jahr **1997** werden weltweit rund 36.000 Staudämme gezählt, davon befinden sich alleine in China etwa 18.000.

Die Stauseen mit dem größten Fassungsvermögen weltweit und Deutschlands sind zum Beispiel:

Name	Land	Kapazität
Drei-Schluchten	China	39,3 Mrd. m <sup>3</sup>
Owen Falls	Uganda	204.800 Mio. m <sup>3</sup>
Kariba	S i m b a b w e / Sambia	180.600 Mio. m <sup>3</sup>
Bratsk	Rußland	169.000 Mio. m <sup>3</sup>
Assuan	Ägypten	165.000 Mio. m <sup>3</sup>
Akosombo	Ghana	153.000 Mio. m <sup>3</sup>
Daniel Johnson	Kanada	141.851 Mio. m <sup>3</sup>
Guri	Venezuela	135.000 Mio. m <sup>3</sup>
Bleilochtalsperre	Deutschland	215 Mio. m <sup>3</sup>

## Der Drei-Schluchten-Damm

Am größten Wasserkraftwerk der Welt bauen die Chinesen ab **1993**. Durch die Aufstauung des Jang-tse-kiang (oder Yangtze) wird ein 663 km langes Binnenmeer entstehen, dem bis Bauende 1,4 Millionen Menschen gewichen sein werden. Insgesamt 20 Landkreise mit 140 Städten, 1.352 Dörfern, 1.600 Fabriken und 32.000 ha Ackerland werden versinken, während der Wasserstand im Laufe der Jahre die geplante Höhe von 175 m erreicht.



*Drei-Schluchten-Staudamm*

Dafür wird der VR China nach Fertigstellung des **Drei-Schluchten-Dammes** mit seiner 185 m hohen und 2.309 m langen Staumauer sowie der Inbetriebnahme aller der insgesamt 26 Riesenturbinen im Jahr **2009** eine elektrische Leistung von 18.200 MW zur Verfügung stehen.

Die Turbinen stammen von dem Konzern Voith Siemens Hydro Power Generation. Sie haben einen Durchmesser von 10 m, ein Gewicht von 420 Tonnen und erreichen 75 Umdrehungen pro Minute. Nach einem achtzig Meter tiefen Fall schieben sich die mächtigen Wassersäulen mit zwanzig Stundenkilometern in die Turbinen hinein. An den rotierenden Schaufeln beschleunigt das Wasser dann auf etwa 120 Stundenkilometer.

Der Stausee soll **2013** den vorgesehenen Wasserspiegel von 175 m erreichen.



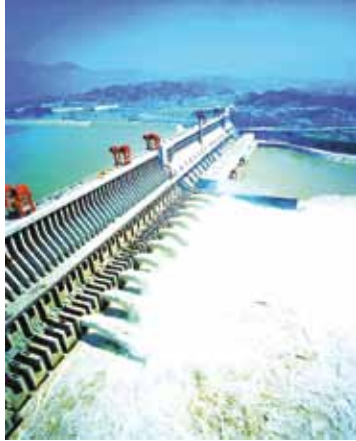
*Drei-Schluchten-Staudamm  
(Satellitenfoto)*

Neben der Staumauer und den Generatoren umfaßt das gigantische Projekt auch einen Schiffsaufzug für Schiffe bis 3.000 t und eine fünfstufige Schleuse für Schiffe bis 10.000 t, die vermutlich von deutschen Unternehmen gebaut werden wird.

Nach nur zwölf Jahren Bauzeit wird der Damm im Mai **2006** fertiggestellt. In zwölf Jahren Bauzeit wurden 28 Mio. m<sup>3</sup> Beton und 218.000 t Stahl verbaut.

Experten warnen vor geologischen Problemen, und Umweltschützer befürchten ein schnelles Verschlammen des Stausees durch die jährlich anfallende Menge an 680 Mio. t Schlamm und Geröll, die der Jangtse mit sich schwemmt – so viel wie Nil, Mississippi und Amazonas zusammen. Als Beweis führen sie den Fall des kleineren Gezhouba-Dammes an, der sich nur wenige Kilometer flußabwärts vom ‚Drei-Schluchten-Damm‘ befindet: Nach nur sieben Betriebsjahren war bereits ein Drittel des Staubeckens versandet, und die Stromproduktion mußte gedrosselt werden.

Im September **2007** erkennen sogar die chinesischen Experten die Umweltprobleme an. Gefahren wie Lawinen, Bodenerosion, Wasserverschmutzung, Land- und Wassermangel und andere auf ‚unvernünftige Entwicklung‘ zurückzuführende ökologische Schäden haben sich demzufolge tatsächlich verstärkt und die Wasserqualität der Nebenflüsse sei



*Staumauer des  
Drei Schluchten Dammes*

gesunken. Die durch die Ablagerungen verursachte Verschmutzung bedrohe in einem Landkreis die Trinkwasser-versorgung von 50.000 Einwohnern und verstärke in vielen örtlichen Flüssen den Algenbefall. Das gigantische Projekt könnte außerdem zum Aussterben des seltenen Jangtse-Flußdelphins führen.

2008 wird bekannt, dass noch einmal bis zu vier Millionen Anwohner des Drei-Schluchten-Staudamms in China zwangsumgesiedelt werden sollen.

**2009** hat der 3-Schluchten-Staudamm allein genug Elektrizität erzeugt, um 8,8 % des Energiebedarfs Chinas zu stillen.

Als Alternative zu derartigen Kolossalprojekten wurde und wird der Bau vieler kleiner dezentraler Wasserkraftwerke empfohlen. Als Modell hierfür gilt beispielsweise das höchstgelegene Kraftwerk der Welt im Nepalesischen **Tharmo** (3.800 m), das **1995** in Betrieb ging, 6,5 Mio. \$ gekostet hat und rund 500 Haushalte in acht Dörfern mit Strom versorgt.

Brasilien errichtet zwischen **1975** und **1982** am Rio Paraná, ein Grenzfluß zwischen Brasilien und Paraguay, den bis

dahin weltgrößten hydroelektrischen Anlagenkomplex ‚**Itaipu Binacional**‘, die 7.760 m lange Dammkrone ist teilweise 196 m hoch.



*Itaipu-Staudamm*

Im März **2008** berichten Forscher der Nationalen Universität Taiwan, dass der globale **Meeresspiegelanstieg** in den vergangenen 50 Jahren aufgrund von Stauseen um drei Zentimeter vermindert worden sei. In dieser Zeit sind in den Stauseen der Erde rund 10.800 Kubikkilometer Wasser gespeichert worden, was etwa halb so viel Wasser entspricht, wie die Ostsee enthält.

Um an dem Fluß Kongo einen weiteren ‚weltgrößten‘ Damm zu bauen, treffen im April **2008** in London Vertreter von sieben afrikanischen Regierungen und den weltweit größten Banken und Baufirmen zusammen. Der 150 m hohe **Grand Inga-Staudamm** in der Demokratischen Republik **Kongo** soll mit 40.000 MW mehr als doppelt so viel Strom wie der Drei-Schluchten Staudamm in China produzieren.

Die über 50 Turbinen des 80 Mrd. \$ Wasserkraft-Projekts könnten die auf dem afrikanischen Kontinent produzierte Menge an Elektrizität verdoppeln. Sollte der neue Damm gebaut werden, wird mit seiner Fertigstellung im Jahr **2022** gerechnet.

Das im Bau befindliche 3.500 MW Wasserkraftwerk Jinping I in Sichuan wird nach Bauende, voraussichtlich im Jahr **2012**, die weltweit größte Staumauer aufweisen.



## Pumpspeicherwerke

Diese Kraftwerke sind eine relativ neue Technik zugunsten des Netzausgleichs, und in Deutschland wurden die meisten großen Pumpspeicher Ende der **1930er** Jahre gebaut.



*Pumpspeicherkraftwerk  
Geesthacht*

Die Funktion der Pumpspeicherwerke ist, dass in Zeiten geringen Strombedarfs die überschüssige (aus anderen Primärenergiequellen produzierte) elektrische Energie dazu verwendet wird, Wasser in ein hochgelegenes Speicherbecken zu pumpen. Zu Zeiten der Spitzenbelastung des Öffentlichen Netzes wird dann mit dem wieder hinabstürzenden Wasser auf konventionelle Weise Strom erzeugt. Das System ist damit kein eigentliches Energie-Separationssystem; aber sein Nutzen ist wirtschaftlicher Natur und dient dazu, große Reserven in Minutenschnelle einsetzen zu können.

Ein bestimmter Typ von Pumpspeicherwerken mit zusätzlichem natürlichen Wasserzufluß wird als Hybridspeicher bezeichnet.

Das bislang größte Pumpspeicherwerk Europas wurde in den **1980ern** in Wales/Großbritannien gebaut. Es ist besonders für eine extrem schnelle Verfügbarkeit des Wassers konzipiert und kann innerhalb von 10 Sekunden dem Netz eine Leistung von 1.320 MW zur Verfügung stellen. Bei einer Höhendifferenz zwischen Unter- und Oberwasserspeicher von 500 m hat das ‚Dinorwic-Projekt‘ einen Durchlauf von 400 t/s.

Umweltspezifisch wirken sich Pumpspeicherkraftwerke durch die sehr großen erforderlichen Baumaßnahmen negativ aus, daneben treten auch nicht unbedeutende Arbeitsverluste auf. Der Wirkungsgrad (von aufgenommenen bis wieder abgegebenen Kilowattstunden gerechnet) liegt bei etwa 75 %.

Im März **2010** meldet die Presse, dass die Schluchseewerk AG im Südschwarzwald bis **2018** das größte Pumpspeicherkraftwerk Deutschlands errichten will. Das Unternehmen, das zu 50 % RWE und zu 37,5 % EnBW gehört, betreibt zwischen Schluchsee und Hochrhein bereits mehrere Pumpspeicherkraftwerke. Nördlich von Bad Säckingen sollen nun für 1 Mrd. € zwei weitere Staubecken sowie ein Kavernenkraftwerk gebaut werden. In Zeiten von Stromüberschuß kann das neue Werk bis zu 13 Stunden lang Strom aus dem Netz ziehen, und dabei bis zu 10 Mio. m<sup>3</sup> Wasser vom Unterbecken 600 m hoch ins 40 Hektar große Oberbecken pumpen.

Soll das auf 100 Jahre Lebensdauer angelegte Pumpspeicherkraftwerk wieder Strom ins Netz liefern, läuft das Wasser durch einen 8 km langen Stollen (und über die Turbinen) in den unteren, 60 Hektar großen See. Bei gefülltem Wasserspeicher reicht die erzeugbare Leistung aus, um 1,5 Millionen Haushalte 13 Stunden lang mit Strom zu versorgen.

Zur Eile motiviert ist die Schluchseewerk AG, da die Bundesregierung im Sommer **2009** als Anreiz beschlossen hat, dass Pumpspeicherkraftwerke die vor **2019** in Betrieb gehen für zehn Jahre vom Netznutzungsentgelt befreit

Für das neue 1.400 MW Projekt sind das 20 Mio. € für jedes dieser zehn Jahre und damit fast ein Drittel der geplanten Kraftwerksbaukosten von 700 Mio. €.

Die sehr interessante Version eines schon bestehenden Pumpspeicherkraftwerks, das auch eine passende Überleitung zu den Meereskraftwerken im nächsten Kapitel bildet, ist die **Yanbaru Seawater Pumped Storage Power Plant** - das weltweit erste Speicherwerk, das mit Meerwasser arbeitet.



*Meerwasser-  
Pumpspeicherkraftwerk*

Die Anlage im Norden der japanischen Insel Okinawa geht im März **1999** in Betrieb. Auftraggeber ist die Agency of Natural Resources and Energy des Handels- und Industrieministeriums MITI, das seit **1981** an dieser Technologie arbeitet. Errichtet wird die Anlage ab **1991** von der Electric Power Development Co. Ltd., die technische Ausstattung kommt von Toshiba. Für den Betrieb verantwortlich ist die Japan Commission on Large Dams (JCOLD).

Die Anlage nutzt einen effektiven Höhenunterschied von 136 m zwischen der Meeresoberfläche und dem Speichersee,

der etwa 600 m von der Küste entfernt auf der Hochebene liegt. Der künstliche See ist achteckig, 25 m tief und 252 m breit. Es hat eine effektive Speicherkapazität von 564.000 m<sup>3</sup>. Zur Erhaltung der Umwelt und Landschaft sind die Druckleitung und das Maschinenhaus unter der Erde verlegt. Letzteres befindet sich etwa 150 m unter der Erde liegt und ist in einer 17 m breiten, 32 m hohen und 41 m langen Kaverne installiert. Die Maximalleistung von 30 MW kann mit einem Durchsatz von 26 m<sup>3</sup>/s erreicht werden. Bei dem Projekt werden verschiedene neue Technologien umgesetzt, wie z.B. die Auskleidung des Speichersees mit Ethylen-Propylen-Diene-Monomer (EPDM) Matten oder der Einsatz von mit Schutzschichten versehenen GFK-Rohren.

**2010** kann eine weltweite zunehmende Beschäftigung mit Pumpspeicherkraftwerken festgestellt werden. Einer Statistik von **2009** zufolge ist in allen Ländern gemeinsam bereits eine Kapazität von mehr als 127.000 MW installiert. Im Laufe des Jahres **2010** kommen drei Anlagen hinzu:

- Ukraine: Dnister, 2.268 MW, (Baubeginn **1983**), die Inbetriebnahme der Einheiten 2 und 3 soll **2011** bzw. **2012** erfolgen.
- Portugal: Baixo Sabor, 171 MW, Baubeginn **2008**, erwartete Inbetriebnahme **2013**.
- Österreich: Feldsee, Erweiterung der existierenden 140 MW Anlage um weitere 75 MW, erwartete Inbetriebnahme **2011**.
- Österreich: Limberg 2, 480 MW, erwartete Inbetriebnahme **2011**.
- Österreich: Reisseck 2, 430 MW, erwartete Inbetriebnahme **2014**.
- Schweiz: Limmern Linthal, 1.000 MW, erwartete Inbetriebnahme **2015**.
- Schweiz: Nant de Drance, 600 MW, erwartete Inbetriebnahme **2015** – **2017**, möglicherweise Erweiterung auf 900 MW.
- China: Qingyuan, Provinz Guangdong, 1.280 MW, erwartete Inbetriebnahme **2014**.

In Portugal wird bis **2014** der Venda Nova Damm am Fluß Rabagao von 90 MW auf 435 MW erweitert, in Luxembourg wird die Vianden Anlage am Grenzfluß Our um 200 MW auf insgesamt 1.296 MW ausgebaut, und das deutsche Pumpspeicherkraftwerk Waldeck 1 bekommt eine zusätzliche 74 MW.

### **Gletscherkraftwerke**

Derartige Projektierungen betreffen in der Hauptsache Grönland und ähnliche Polargebiete. Als SchmelzwasserKraftwerke hätten die Anlagen sehr große Wassermengen bei Nutzfallhöhen zwischen 1.000 und 3.000 m zu ihrer Verfügung. Allein in Grönland sollen etwa 20 derartiger Anlagen technisch realisierbar sein, bei Dimensionierungen zwischen 90 und  $120 \cdot 10^9$  kWh/j.

Anfang **1990** berichtete die Presse von ersten Planungen einer Arbeitsgruppe des Geologischen Dienstes von Grönland für ein derartiges Kraftwerk, das 50 bis 100 GW produzieren soll. Der Leiter dieser Arbeitsgruppe, Anker Weidick, rechnet damit, dass sich in Grönland nur etwa 10 TW erzeugen lassen. Beginnen wollte die Projektgruppe in der Stadt Jakobshavn an der Diskobucht. Zwei Seen sollten mit Inlandeis befüllt werden, dann leicht gestaut und mit unterirdischen Stollen von der Sohle her angezapft.

Ein großer Nachteil bei Wasserkraftwerken, die mit Gletscherwasser gespeist werden ist der im Schmelzwasser mitgeführte Sand. Ein Beispiel ist die hoch in den Alpen gelegene Talsperre Grande Dixence, die mit über 280 m eine der höchsten Staumauern der Welt ist und 20 % der Schweizer Stromreserven speichert. Das Gletscherwasser wirkt wie Schmirgelpapier, wenn es unter hohem Druck auf die Schaufelräder der Turbinen trifft. Der extrem harte Edelstahl wird dabei pro Jahr um 2 cm abgeschliffen – und die Wartung ist sehr aufwendig, denn auf jedes einzelne Schaufelblatt muß Schicht für Schicht neuer Stahl geschweißt werden.

Die wichtigsten Probleme bei einer Verwirklichung derartiger Bauwerke bilden daher die klimatischen Extremanforderungen gegenüber Bauwerk, Material und Besatzung. Außerdem ist noch nicht bekannt, wie die Schmelzwasserbewegung im Gletscher erfolgt. Hinzu kommen Schwierigkeiten bei der Energieübertragung über die jeweils mindestens 2.500 km betragende Entfernung bis nach Europa oder Nordamerika, wo der Strom gebraucht wird. Letztlich sei die verkehrstechnisch äußerst schlechte Lage dieser Kraftwerke erwähnt, was sowohl den Bau, als auch Betrieb und Wartung sehr erschwert.

### **Meereskraftwerke**

Im Meer, dem großen Erdwärme-, Sonnen- und auch Gravitationsenergiespeicher, steht ein äußerst vielfältiges Energiepotential zur Verfügung, das immer noch seiner Erweckung harret. Gezeiten-, Strömungs- und Wellenenergie werden nachfolgend chronologisch und nach Ländern aufgeschlüsselt präsentiert.

Der aktuelle Stand spiegelt sich in der im Oktober **2006** in Bremerhaven veranstalteten ‚International Conference Ocean Energy – from Innovation to Industry‘, bei der gezeigt wird, dass nach einer Entwicklungszeit von gut 20 Jahren die Meeresenergie-Technik an der Schwelle zur Industrialisierung steht. Alleine in Europa sollen in den kommenden Jahren nahezu 300 Mio. € in die Entwicklung und den Bau von Meeresenergieanlagen investiert werden. Im April **2009** benennt die UN den **8. Juni** eines jeden Jahres offiziell zum **World Oceans Day**.

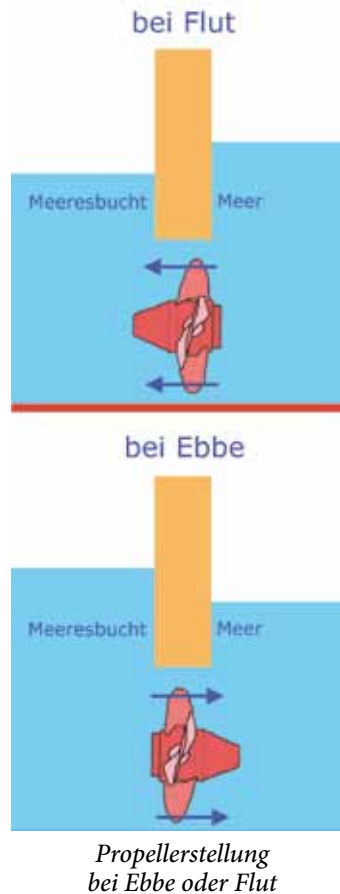
## Gezeitenenergie

In Verbindung mit der Idee ‚Energie aus dem Meer‘ wird an erster Stelle zumeist die Gezeitenkraft genannt. Der sogenannte ‚Große Atem der Meere‘ ist eine selbsterneuernde Energie mit einer Leistung von  $2,7 \cdot 10^{12}$  W, das davon nutzbare Potential wird allerdings auf nur etwa  $0,03 \cdot 10^{12}$  W geschätzt.

Die je zweimal täglich vorkommende Ebbe bzw. Flut ist vorwiegend auf die Gravitationswirkung des Mondes und der Sonne sowie auf die Erdrotation zurückzuführen. Im Prinzip ist die Flut ein Zusammenströmen und Aufstauen des Gewässers und kein Emporheben und Nachfließen, wie lange Zeit angenommen wurde.

Es gibt noch heute Überreste mittelalterlicher Mehlmühlen, die mit dem Tidenhub ihr Mahlwasser bekamen.

Nachweislich beschäftigte sich auch Leonardo da Vinci mit dieser Technik. Um **1130** wurde im Mündungsgebiet des Adour in Frankreich eine Gezeiten-Wassermühle gebaut, und ein Jahrhundert später arbeiteten sogar mehrere Gezeitenmühlen bei Venedig. Man nimmt an, dass die erste Gezeiten- oder auch Flutmühle bereits im **3. Jahrhundert** n.Chr. (!) im Hafen von Dover in England gebaut worden ist.



Die älteste Gezeitenmühle Englands soll über 900 Jahre lang in Betrieb gewesen sein.

Die Schwierigkeit bei diesem Energiewandlungsverfahren liegt hauptsächlich darin, dass mit der konventionellen Turbinentechnologie erst ein Tidenhub von wenigstens 5 m eine wirtschaftliche Anwendung ermöglicht, so dass nur sehr wenige Standorte überhaupt in Betracht gezogen werden können. Dazu gehören:

- an der Mündung des Severn-Flusses zwischen Britannien und Wales
- in Alaska, bei Anchorage
- an der Mündung der beiden argentinischen Flüsse San Jose und Deseado
- am Cambridge-Golf in Westaustralien
- in der Fundy-Bucht in Kanada

Nach einer Analyse der Dornier System GmbH gibt es weltweit überhaupt nur 37 Standorte für Gezeitenkraftwerke. Diese Standorte liegen außerdem meist in abgeschlossenen Gebieten mit äußerst geringem Energiebedarf, weitab von Anwenderzentren. Andere Schätzungen gehen von bis zu 100 Standorten aus (Stand **2009**).

Ansonsten hat die Gezeitenenergie den großen Vorteil einer sehr exakten Vorhersehbarkeit.

**Aus den genannten Frankreich und Großbritannien hier einige Beispiele der Nutzung und neue Ideen.**

Das Gezeitenpotential Frankreichs wird auf 6 GW geschätzt. Seit **1966** steht das 240 MW Kraftwerk **Usine de la Rance** im Golf von St. Malo, etwa 4 km südlich der Rance-Mündung an der Nordküste der Bretagne. Der Tidenhub beträgt dort bei normaler Flut ca. 8,40 m und bei Springflut (also wenn Sonne, Mond und Erde etwa auf gleicher Linie stehen) sogar bis zu 13,50 m. Der Staudamm ist 750 m lang und umfaßt ein 20 km<sup>2</sup> großes Staubecken. Die spezielle Konstruktion erlaubt auch einen Betrieb als Pumpspeicherwerk, da die zehn 24 MW Kaplan-turbinen reversibel sind.



*Gezeitenkraftwerk La Rance*

**1996** wird das 30-jährige Jubiläum gefeiert: Die Anlage war während dieser Zeit ohne jede größere Panne 160.000 Stunden lang in Betrieb und hat dabei 16 Milliarden kWh umweltfreundlichen Strom zu einem Preis von 2,8 Cent pro kWh erzeugt.

Mitte **2008** gibt die staatliche **Electricite de France** bekannt, dass man 3 bis 6 neue Gezeitenturbinen vor der Nordküste der Bretagne installieren will. Das netzgekoppelte Projekt wird zwischen 23 Mio. € und 27 Mio. € kosten und eine Gesamtkapazität von 4 MW bis 6 MW erreichen. Die Turbinen sollen im Jahr **2011** vor der Küste der Stadt Paimpol ins Wasser gebracht werden, wo die Strömungen zu den stärksten in Europa gehören.

Ein Gezeitenenergie-Projekt, das im März **2009** in der Tageszeitung Le Monde vorgestellt wird, wird unter dem Namen **Harvest** am universitären LEGI Laboratorium in Grenoble entwickelt (Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels).

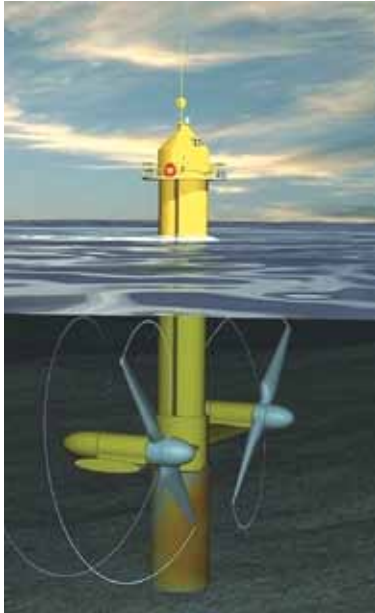
Die Unterwassertürme von Jean-Luc Achard bestehen aus mehrfach übereinandergestapelten Senkrechteckern, die sich allerdings von konventionellen Darrieus- oder Gorlov-Turbinen unterscheiden, da die Einzelnen, tragflächenartigen Blätter pfeilförmig und mittig befestigt sind. Die vertikalen Gezeitenturbinen bilden dabei eine Kette zwischen einem Schwimmer auf der Oberfläche und der Verankerung am Boden.



*Harvest Konzept  
(Grafik)*



Das damals erste **Offshore-Gezeiten-Kraftwerk** der Welt nimmt Ende August **2003** seinen Betrieb auf. Der 11 m lange Rotor der im Jahr **2000** in Bristol gegründeten Firma **Marine Current Turbines Ltd.** (MCT) erzeugt rund 300 kW Strom. Im Gegensatz zu dem Gezeiten-Kraftwerk von St. Malo in der Bretagne nutzt das britische **SeaGen** Kraftwerk nicht die Gezeitenströme in einer Flußmündung, sondern im offenen Meer. **2004** kommt eine weitere Turbine hinzu. Der Betreiber des Gezeiten-Kraftwerks schätzt die Gesamtkapazität solcher Anlagen in Großbritannien auf etwa 10 GW.



*SeaGen (Grafik)*

Seit dem ersten Testlauf des Prototyps und bis Mitte **2007** kann die Leistung des Kraftwerks von 300 kW auf das Vierfache erhöht werden, doch die inzwischen zuständige Tochter **Sea Generation Ltd.** (SeaGen) kämpft wiederholt mit Problemen bei der Installierung des neuen Prototyps. Die Errichtung der 1,2 MW Anlage, deren Entwicklung und Bau 12 Mio. Englische Pfund gekostet hat, sollte eigentlich im August **2008** erfolgen, doch zuerst muß der Einsatz verschoben werden, weil das gecharterte Kranboot zu einem anderen Einsatzort geschickt, und dann, weil es bei einem Unfall im Hafen auch noch beschädigt wird.

Nach der endgültigen Montage in der Werft Harland & Wolff in Belfast beginnt Marine Current im März **2008** mit großem Aufwand mit der Installation der 1.000 Tonnen-Struktur auf dem Meeresboden 400 m vor der Küste von Strangford Lough. Vom Schleppkahn *Rambiz* aus positioniert werden vier etwa 9 m tiefe Fundierungsbohrungen eingebracht, welche die Stabilität von Gerüst und Turbine sichern sollen. Vom Boden bis hinauf zur Turmspitze mißt die Anlage 40,7 m, davon stehen rund 24 m ständig unter Wasser.



*SeaGen Rotor*

Die SeaGen-Anlage wird für fünf Jahre lizenziert und soll bis zu 1.500 Haushalte mit Strom versorgen. Das britische Wirtschaftsministerium hat das Gezeitenkraftwerk mit bislang fast 7 Mio. € gefördert. Zur Unterstützung ihrer Entwicklungsambitionen in Pentland Firth, Schottland, in anderen Teilen des Vereinigten Königreichs, in Irland und weltweit ernennt MTC die Firma Cavendish Corporate Finance, um neue Investitionen für das Unternehmen zu sichern. Für die Realisierung des Projekts in Pentland Firth wird eine Finanzierung durch die Liegenschaftsverwaltung The Crown Estate beantragt.

Als Besitzer des britischen Meeresbodens bis zur Territorialgrenze 12 nautische Meilen seewärts sowie 55 % des Vorlands arbeitet Crown Estate eng mit ihren Partnern, der

schottischen Regierung, der Highlands & Islands Enterprise, dem Orkney Islands Council und dem Highland Council zusammen, um den Nutzen aus Investitionen im Bereich der erneuerbaren Offshore-Energieträger zu maximieren.

Mitte Juli **2008** wird erstmals Energie ins Netz geliefert, bislang allerdings nur bescheidene 150 kW. Die volle Leistungsfähigkeit von 1,2 MW wird dann Mitte Dezember erreicht. Nach dem Austausch der zwei Rotorblätter bei einer der beiden 16 m durchmessenden Axial-Turbinen geht das System im Januar **2009** offiziell in den Vollbetrieb und liefert täglich 18 - 20 Stunden lang seine Energie. Die Austausch-Operation zeigt auch die Vorteile des SeaGen Designs, bei dem die Rotoren leicht aus dem Wasser geholt werden können.

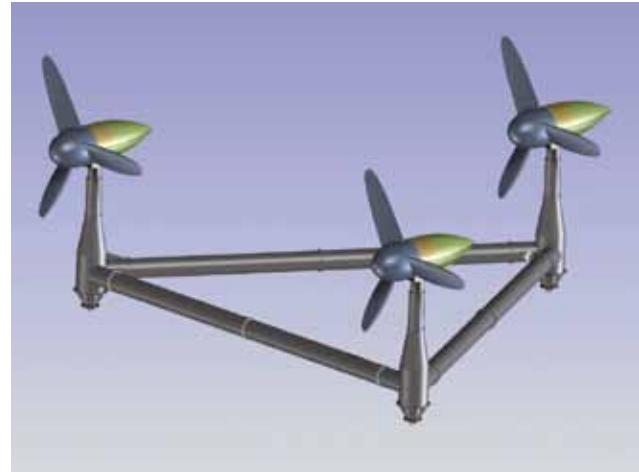


*Hochgefahrene SeaGen-Rotoren*

Ende **2011** oder Anfang **2012** will MCT gemeinsam mit der Firma **RWE npower renewables** vor der Küste von Anglesey in Nord-Wales ein Gezeitenkraftwerk mit einer Leistung von 10,5 MW realisieren, bei dem sieben SeaGen Turbinen zu Einsatz kommen sollen.

Mitte **2006** wird eine Kooperationsvereinbarung mit der Ingenieurfirma Peter Brotherhood Ltd. in Peterborough abgeschlossen. Das neue joint venture wird **Marine Energy Generation Ltd.** (MEG) benannt und soll zwei Produkte mit den Bezeichnungen **DeltaStream** und **HydroAir** entwickeln.

DeltaStream ist ein auf dem Meeresboden freistehender 1,2 MW Gezeiten-Generator, der ursprünglich von THGL für die rauen Bedingungen entwickelt wurde, wie sie an der Küste von Pembrokeshire bestehen – während



*DeltaStream (Grafik)*

HydroAir eine Luftturbine ist, die von einer oszillierenden Wassersäule (OWC-System) betrieben wird, wobei hier die Wellenbewegung genutzt wird, um Luft durch eine stromerzeugende Turbine zu pressen. Eine 400 kW HydroAir Anlage soll bis **2008** entstehen.

Der robuste dreieckige Rahmen des DeltaStream Systems wiegt rund 300 t, ist rund 30 m breit und trägt drei Turbinengondeln mit 15 m durchmessenden Rotoren. Anfang **2009** geht im Ramsey Sound vor Pembrokeshire, nahe St. Davis in Wales, ein 1,2 MW Prototyp mit drei Generatoren in den Probebetrieb, der **2010** seine volle Operationsbereitschaft erreichen und dann genug Strom für etwa 1.000 Haushalte erzeugen soll. Das Unternehmen heißt inzwischen **Tidal Energy Ltd.** – und ist Mitte **2010** noch immer in der Vorbereitungsphase für die Installation und den einjährigen Praxistest der Anlage. Im Juli gibt es

erst einmal weitere 1,4 Mio. Pfund Fördergelder, von denen knapp die Hälfte aus dem European Regional Development Fund stammen. Ein sogenannter Full-scale-Prototyp soll **2011** zur Verfügung stehen.

Die Entwicklung der sogenannten **Open-Center-Technologie** beginnt in den USA bereits im Jahr **1995**, doch erst zehn Jahre später, also **2005**, wird in Irland das Unternehmen **OpenHydro** gegründet. Der

Begriff leitet sich aus der Konstruktionsform des Rotors ab, dessen innerer Bereich offen ist und für die Meeresfauna damit eine geringere Gefahr bedeutet.

Im September **2008** erreicht die 1 MW Demonstrationsanlage das EMEC, und im Oktober wird das Unternehmen von der Electricité de France (EDF) ausgewählt, um die erste Gezeitenturbinen-Unterwasserfarm zu entwickeln, die an das französische Stromnetz angeschlossen werden soll. Das Projekt umfaßt die Installation von mindestens 4 und maximal 10 großen Turbinen, die ab **2011** in der Region Paimpol-Bréhat (Côtes d'Armor) in der Bretagne montiert werden sollen.

Im November **2008** werden noch größere Pläne bekanntgegeben. Die Gewässer um die Insel Alderney (Kanalinseln)



*Grafik einer anderen Aufstellung  
Tidal Stream*



*OpenHydro Turbine*

bilden mit geschätzten 3.000 MW eine der weltweit größten Gezeitenenergie-Ressourcen. Als erstes soll nun eine 285 MW Farm entstehen, mit bereits genehmigter Anbindung an das europäische Stromnetz. Eine vollständige Nutzung des Potentials würde bis zu 3.000 Turbinen und eine Investition von über 3 Mrd. € erfordern. In Zusammenarbeit mit der Nova Scotia Power geht die 10 Mio. \$ teure und 400 t schwere Anlage im November **2009** in der Bay of Fundy in Betrieb, um das schnell fließende Wasser der Minas Passage in der Nähe von Parrsboro, etwa 3 km vor der Black Rock Küste, zu nutzen. Im März **2010** sichern sich OpenHydro und ein weiterer



*OpenHydro beim Verladen*

Partner, der Energieversorger SSE Renewables, die exklusiven Rechte an einer 200 MW Gezeitenenergie-Farm in den Pentland Firth vor der Nordküste von Schottland. Rechtevergeber ist wiederum The Crown Estate – die sich den Gerüchten zufolge im persönlichen Besitz der Queen befindet.

Im Juni **2010** gibt OpenHydro bekannt, dass es seine 1 MW Unterwasserturbine in Orkney im Oktober wieder herausholen wird, nachdem auf einem Unterwasservideo zwei gebrochene Blätter zu sehen waren. Diese sollen aus einer Kombination aus Plastik und Glas bestehen. OpenHydro will die Turbine nun reparieren und **2011** erneut installieren.

Die 2005 gegründete **Neptune Renewable Energy Ltd.** (NREL) aus North Ferriby, East Yorkshire, arbeitet sowohl auf dem Gebiet der Gezeiten- als auch auf dem der Wellenenergie. Nach Vorversuchen mit Modellen in kleineren Maßstäben (1:40 und 1:10) sowie Simulationen stellt das Unternehmen im September 2007 mit ihrem **Neptune Proteus Tidal Power Pontoon** eine teilweise verkleidete



*OpenHydro-Prototyp*

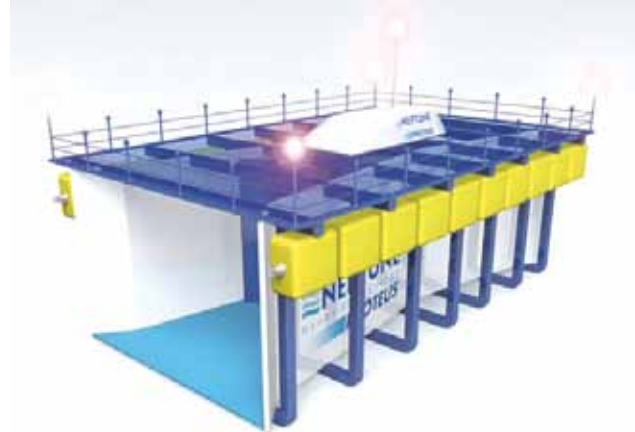
Savonius-Turbine mit senkrechter Achse vor, die 6 x 6 m groß ist und trotz ihrer geringen Herstellungskosten einen Wirkungsgrad von bis zu 80 % erreichen soll. Die numerische Modellierung und die Test werden in Kooperation mit der University of Hull durchgeführt. 2008 erfolgt die Aquse von Investitionsmitteln um einen Prototyp in voller Größe herzustellen.

Auch beim Proteus sind das Getriebe und der Generator oberhalb des Wassers auf dem Schwimmponton installiert, dessen Wandung einen strömungsverstärkenden ‚Diffusor‘ bilden. Im Mai 2009 beginnt im Wear Dock in Sunderland die Konstruktion eines.

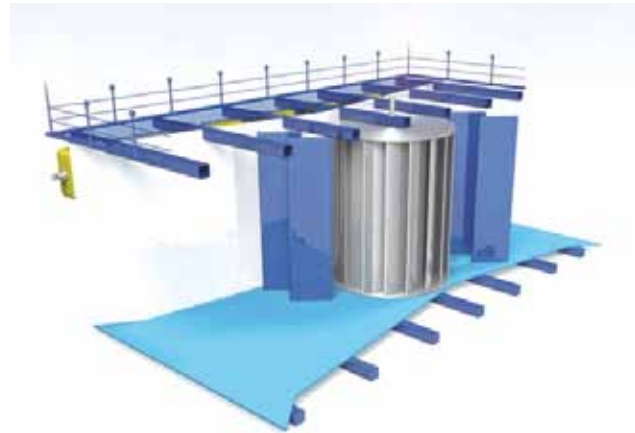
Ende 2009 gibt das Unternehmen bekannt, dass man 2010 mit Probefahrten beginnen wird, um die 2 Mio. £ teure und 150 t schwere Anlage zu testen. Hierfür wählt NREL die Humber-Mündung aus, die als eine der besten Lagen für Gezeitenkraftwerke auf den britischen Inseln gilt.

Der Bau der 20 m langen und 14 m breite Katamaran ähnlichen Demonstrationsanlage, die mit 2 x 250 kW

Generatoren ausgerüstet ist, wird im Februar 2010 beendet. Im Juli wird sie für einen dreimonatigen Praxistest zu Wasser gelassen, wobei ein Gesamtwirkungsgrad von 25 % ermittelt wird.



*Proteus (Grafik)*



*Proteus-Rotor (Grafik)*



Das Modell **Neptune Proteus NP1000** soll jährlich mindestens 1.000 MWh Strom erzeugen. Bei erfolgreichem Abschluß der Tests ist geplant, im Laufe der Jahre **2011/2012** eine Farm aus den bis dahin noch neu zu entwickelnden **NP1500** Modellen zu errichten. Die Kosten sollen im Fall einer Serienproduktion auf 0,5 Mio. £ sinken. Anfang **2010** meldet die Presse, dass **Voith Hydro Ocean**



*Proteus Demonstrationsanlage*

**Current Technologies** (VHOCT) bis Ende des Jahres einen Prototypen für ein Strömungskraftwerk präsentieren zu wollen, das an Kufen auf den Meeresboden hinabgelassen wird. Die Flügel des Prototyps ähneln dem Propeller eines Motorbootes und sind symmetrisch designt, womit sie bei kommandem und abfließendem Wasser nicht jeweils neu ausgerichtet werden müssen.

Mitte des Jahres verlautet, dass VHOCT im Jahr **2011** eine 1 MW Gezeitenströmungs-Turbine am European Marine Energy Centre vor der schottischen Küste installieren werden, die dann einen zweijährigen Probetrieb aufnehmen soll (s.u.). Die Herstellung und Installation der Gründungsstruktur zur Verankerung der Turbine übernimmt der Kooperationspartner Bauer Renewables Ltd., eine Tochter des Spezialtiefbau- und Maschinenbaukonzerns Bauer AG. Die Gesamtinvestition liegt bei rund 11,8 Mio. britischen Pfund, an der sich die



*Voith-Innogy Turbine (Grafik)*

britische Regierung mit 1,7 Mio. Pfund beteiligt.

Bei erfolgreichem Testbetrieb geht man davon aus, bis **2020** Gezeitenströmungskraftwerke im Umfang von bis zu 100 MW installierter Leistung vor allem vor den britischen Küsten ans Netz bringen zu können.

### **Strömungsenergie**

Die selbsterneuernde Strömungsenergie innerhalb der Meere, die hier von Gezeitenströmungen getrennt betrachtet wird, ist in die Summe der starken Hauptströmungen ( $50 \cdot 10^9$  W) und in die Summe der lokalen Strömungen (ebenfalls  $50 \cdot 10^9$  W) aufgeteilt. Allein dem Golfstrom wird eine Leistung zwischen 15 und  $25 \cdot 10^9$  W zugeschrieben. Zu berücksichtigen ist die Unterscheidung zwischen den Strömungen, die aufgrund von Erdrotation und thermischen Effekten stattfinden - und den Gezeiten, die extra behandelt werden. Die in beiden Fällen eingesetzten Geräte sind allerdings weitgehend identisch - sofern es sich um küstenferne Anlagen handelt.

Als besonders geeignete Standorte für Meeresströmungskraftwerke gelten:

- *die Koroshio-Strömungen bei Japan*
- *die Cook-Strait bei Neuseeland*
- *der Strom vor der Küste Ostafrikas*
- *die Meeresengen von Florida, Gibraltar und Messina*



Wirtschaftlich ausnutzen lassen sich Strömungen mit einer Geschwindigkeit ab 2 m/s. Das US-Departement of Energy hat bereits Mitte der 1980er Jahre an die AERO Environment Inc. in Pasadena einen Auftrag vergeben, der den Bau und Betrieb von 250 Turbinen mit einem Durchmesser von je 20 m zum Inhalt hat. Diese Turbinen sollen dem etwa sechs Knoten schnellen Golfstrom insgesamt 75 MW abzapfen, weiterführende Planungen sprechen von einer 1.000 MW Anlage mit 200 Großturbinen. Diese Pläne sind bislang jedoch nicht umgesetzt worden.

Die Grenzen dieser Strömungsenergienutzung beginnen mit der Schwierigkeit einer im voraus realistisch zu berechnenden späteren Energieleistung – da sogar der Golfstrom seine Unregelmäßigkeiten hat. Vergleicht man Meeresströmungskraftwerke mit Laufwasserkraftwerken auf dem Land, so sind erstere eigentlich unwirtschaftlich.

Neben den hohen Investitionskosten bilden die notwendige Verankerung oder die massive Fundamentierung der Kraftwerkskomponenten ebenso große Probleme wie die Wartung der Anlagen. Es kann bei einer zu großen Energieentnahme zu Störungen innerhalb der Strömung kommen, auch können Wechselwirkungen mit Gezeitenströmungen nicht ausgeschlossen werden. Das Resultat könnten wiederum Klimastörungen sein. Weiterhin befürchtet werden auch Störungen der Schifffahrt und des Fischfangs.

## **Wellenenergie**

Die Gesamtleistung der Wellen- oder auch Brandungsenergie wird auf etwa  $2,5 \cdot 10^{12}$  W geschätzt – bzw. auf rund 10 Mio. TWh. Das Potential für den Weltenergiemarkt soll 2.000 TWh betragen, was etwa 10 % der globalen Energieerzeugung nach dem Stand von 2005 entspricht.

Wellenenergie ist eine selbsterneuernde Energie, wobei im Detail zwischen Wind- und Seewellen unterschieden wird. Die durch anhaltenden Wind verursachte Meereswelle ist eine rhythmische Schwingung des Meerwassers. Die einzelnen Moleküle in einer Wasserwelle bewegen sich zwar

im Kreis, doch die Energie bewegt sich in einer Richtung. Durch periodische Änderungen der Wasserspiegelform entsteht die transversale Welle, die quer zur Laufrichtung fließt. Dabei pflanzen sich nicht die Wassermassen, sondern die Bewegungsvorgänge fort, im Gegensatz zur oben betrachteten Meeresströmung. Die Wellenhöhe ist die senkrechte Distanz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Punkt der kreisförmigen Schwingung, d.h. zwischen ‚Wellenberg‘ und ‚Wellental‘.

Ein Objekt, das in einem Wellenfeld eingetaucht ist, ist einer komplexen Mischung aus Bewegungen unterworfen - heben (hoch und runter), schwingen (vor und zurück) und rollen (hin und her). Die meisten der Anlagen extrahieren jedoch nur einen kleinen Anteil der Gesamtenergie einer Welle.

Unter den verschiedenen Typen der Meereswellen haben vom Wind erzeugte Wellen die höchsten Energiekonzentrationen. Einmal entstanden, können sie Tausende von Kilometern zurücklegen, ohne viel von ihrer Energie zu verlieren. In Küstennähe nimmt aufgrund der Wechselwirkungen mit dem Meeresboden die Energieintensität ab. Diese Energiestreuung kann durch Vorgänge wie Reflektion und Refraktion kompensiert werden und zu Energiekonzentrationen (hot spots) führen. Da die durchschnittliche Höhe der Ozeanwellen etwa 2,5 m beträgt, können nur Niederdruckturbinen Anwendung finden. Eine etwa 3 m hohe Welle enthält je laufendem Meter eine Leistung von mehr als 20 kW.

In den vergangenen gut 200 Jahren sind mehr als 1.000 Patente für diesen Bereich erteilt worden. Neuere und umfassende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur großtechnischen Umsetzung von Wellenkraftwerken werden bislang hauptsächlich in Japan, England, Frankreich, den USA und in Skandinavien geleistet – zumeist mit dem Ziel, Kraftwerke im Megawattbereich zu entwickeln. .

Die Nutzung der Wellenenergie läßt sich sechs technisch unterschiedlichen Methoden zuordnen, wobei die meisten aktuell verfolgten Technologien nach dem Prinzip der oszillierenden Wassersäulen (OWC) arbeiten, dessen

technische Umsetzung auf den Japaner Yoshido Masuda zurückgeht.

- Oszillierende Wassersäulen / Oscillating water columns
- Überspül-Techniken / Overtopping devices (OTS)
- Pumpenbestückte Schwimmkörper / Float with pumps
- Wellen-Mühle-Turbine-Systeme Mechanische Systeme  
Lineargeneratoren / Linear generator systems (LG)

Die 15 m hohe Blackpool High Tide Organ der Künstler Liam Curtin und John Gooding wird **2002** an der New Promenade in Blackpool aufgestellt. Die Skulptur besteht aus Beton, Stahl, Zink und Kupferblech, wobei die Wellenenergie bei Flut Luft durch acht Rohre preßt, die unter der Promenade entlang führen und mit 18 Orgelpfeifen in der Skulptur verbunden sind, die in einer harmonischen B-Dur Reihe gestimmt sind.

Es gibt viele Länder, die hieran forschen, aber die hohen Kosten der Wellenenergienutzung die durch die notwendige Menge kleiner Anlagen in Form sehr langer Transformationsketten entstehen, wirken sich auf die Machbarkeit stark aus. Die Energieleistung ist außerdem relativ gering und unperiodisch.

Neben ihrer Stabilität gegenüber Sturmwellen müssen die Systeme sensibel genug sein, um auch kleine Wellen auszunutzen zu können. Auch treten erhebliche horizontale Schwingkräfte auf, die entweder aufgefangen oder ebenfalls genutzt werden können, welche die Anlagen dann aber noch weiter komplizieren.



*Blackpool High Tide Organ*

## Temperaturgradient (OTEC)

Der Vorschlag, den Temperaturgradienten der Meere, also den Unterschied zwischen den oberen warmen und den unteren kälteren Wasserschichten auszunutzen, geht auf den französischen Wissenschaftler Prof. Jacques Arsene d'Arsonval im Jahre 1881 zurück... der möglicherweise von Jules Verne beeinflusst worden ist, der in seinem Buch '20.000 Meilen unter dem Meer' schon **1869** davon sprach, daß man den ozeanischen Temperaturunterschied zur Stromproduktion nutzen könne.

Wenn der Unterschied zwischen den oberen (0–50 m) und den unteren Schichten (ab 600–1000 m) des Wassers mehr als 20° C beträgt, kann ein Kreislauf in Gang gesetzt werden, der in der Lage ist, Energie, beispielsweise an einen Generator, abzugeben.

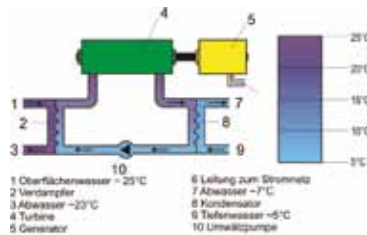
Beachtenswert ist, dass ein Meereswärmekraftwerk im Vergleich zu anderen alternativen Stromerzeugern diesen ständig produzieren kann und nicht von der Tageszeit oder anderen veränderlichen Faktoren abhängig ist. Reale Wirkungsgrade liegen in der Größenordnung von drei Prozent, wobei die Energiequelle – das warme Meerwasser – meist im Überschuss und kostenlos zur Verfügung steht und sich selbstständig durch die Sonneneinstrahlung erneuert. Bei einer Wassertemperatur von 6 und 26 °C ist theoretisch ein Wirkungsgrad von 6,7 % erreichbar. Die technische Umsetzung ist jedoch immer mit Wirkungsgradverlusten behaftet. Die praktische Leistung dieser Kraftwerke wird durch die Wassermenge bestimmt, die durch den Kreislauf genutzt wird. Dabei wird eine Leistung von 100 Megawatt (MW) für den geschlossenen und etwa 2,5 MW für den offenen Kreislauf als obere technisch sinnvolle Grenze angesehen. Bei einem 100 MW-Kraftwerk würden etwa 200 Kubikmeter Wasser pro Sekunde durch eine Rohrleitung mit der Nennweite von etwa 11 Meter zum Kraftwerk gefördert werden. Dazu kommen noch einmal 400 m<sup>3</sup> warmes Oberflächenwasser pro Sekunde. Das entspricht etwa 1/5 des Nilstromes in das Mittelmeer. Im offenen Kreislauf bildet die Größe der Turbine das begrenzende Element.

Der Aufwand und die gewaltige Größe der technischen Anlagen im Verhältnis zur Energieausbeute ist der Hauptgrund, der eine kommerzielle Anwendung oder eine größere Verbreitung dieses Kraftwerkstyps bisher verhinderte.

Es gibt verschiedene Varianten dieses Technologieansatzes.

### Geschlossener Kreislauf

Bei einem Meereswärmekraftwerk mit geschlossenem Kreislauf wird in einem Organic Rankine Cycle warmes Oberflächenwasser gepumpt, welches ein bei niedriger Temperatur siedendes Arbeitsmedium in einem Wärmeübertrager zum Verdampfen bringt. Das verdampfte Arbeitsmedium wird durch eine an einen Generator angeschlossene Turbine geleitet, in der ein Teil der Wärme in Bewegungsenergie umgewandelt wird. Anschließend wird das Arbeitsmedium mit dem aus der Tiefe angepumpten kalten Wasser in einem weiteren Wärmeübertrager wieder in einem Kondensator verflüssigt und kann von neuem in den Verdampfer eingespeist werden.



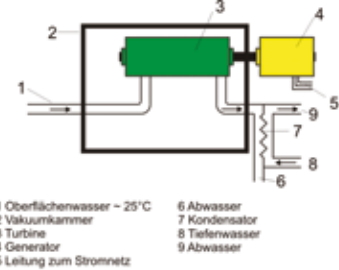
Schema eines geschlossenen OTEC-Kreislaufs

Das Arbeitsprinzip entspricht dem eines Dampfkraftwerks, nur wird als Arbeitsmedium kein Wasserdampf verwendet. Es sind verschiedene Stoffe als Arbeitsmedium für ein Meereswärmekraftwerk denkbar, dessen Nutzung allerdings jeweils sowohl Vorteile als auch Nachteile mit sich bringt.

- Ammoniak ist leicht verfügbar und preisgünstig in der Produktion, aber giftig.
- Propan ist auch geeignet, aber hat eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit und Verdampfungswärme als Ammoniak.

### Offener Kreislauf

Ein Meereswärmekraftwerk mit offenem Kreislauf nutzt das warme Oberflächenwasser als Arbeitsmedium, das unter Vakuum verdampft wird. Der erzeugte Dampf treibt eine Turbine zur Stromerzeugung an. Anschließend wird der Dampf, der seinen anfänglichen Druck in der Turbine verliert, mit Hilfe von kaltem Tiefenwasser wieder im Kondensator verflüssigt. Wird hierfür ein Wärmeübertrager verwendet und ein direkter Kontakt vermieden, so entsteht entsalztes Süßwasser, das als Trinkwasser genutzt werden kann. In einer Vakuumkammer wird durch eine Vakuumpumpe ständig die im Wasser gelöste Luft abgesaugt. Somit wird sichergestellt, dass das Wasser ohne weitere Wärmezufuhr siedet und verdampft.

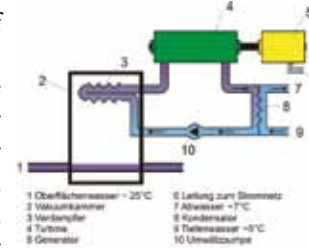


Schema eines offenen OTEC-Kreislaufs

### Hybrider Kreislauf

In einem hybriden Meereswärmekraftwerk werden beide vorgenannten Systeme kombiniert. Das warme Oberflächenwasser wird genutzt, um das Arbeitsmedium im geschlossenen Turbinenkreislauf zu verdampfen. Nachdem das Arbeitsmedium die Turbine passiert hat, wird es wiederum durch kaltes Tiefenwasser kondensiert und erneut in den Kreislauf eingebracht.

Das immer noch warme Oberflächenwasser wird nach der Wärmeabgabe an den Turbinenkreislauf in einer Vakuumkammer verdampft. Dieser Wasserdampf wird mit



Schema eines hybriden OTEC-Kreislaufs

Hilfe des Kühlwassers kondensiert, wodurch Süßwasser gewonnen werden kann.

Eine andere Anordnung sieht zuerst die Vakuum-Verdampfung des warmen Seewassers vor. Dieser warme Wasserdampf wird anschließend genutzt, um das Arbeitsmedium des Turbinenkreislaufes zu verdampfen. Bei diesem Vorgang wird der Wasserdampf wiederum zu Süßwasser kondensiert. Das kalte Tiefenwasser wird nur zur Kondensation des Arbeitsmediums der Turbine genutzt.

Es sind auch weitere Kombinationen möglich. Eine favorisierte Bauform hat sich bei den wenigen Versuchsanlagen noch nicht durchgesetzt.

### **Barjot-Eiskraftwerk**

Der Physiker Dr. Barjot entwickelte Anfang des 20. Jahrhunderts ein Konzept, der die Temperaturunterschiede zwischen der Luft an den Polen von höchstens  $-22^{\circ}\text{C}$  und der des Wassers unterhalb der Eisdecke, das je nach Ansaugtiefe einen bis über  $3^{\circ}\text{C}$  warm ist, zu nutzen. Als Betriebsmittel schlägt er Butan (Siedepunkt:  $-0,5^{\circ}\text{C}$ ) vor. Der Wärme-/Kältekreislauf bei dieser Technologie – auch unter dem Namen Polarkraftwerk bekannt, funktioniert invers zu bekannteren OTEC in tropischen Warmwasserregionen. Ein Wärmetauscher, der in die kalte Polarluft ragt, ist für die Kondensation des Arbeitsmediums verantwortlich, das von unter der Eisdecke herauf gepumptes Wasser für die Verdampfung. Da Butan praktisch nicht wasserlöslich ist, können Arbeitsmedium und Tiefenwasser im Verdampfer direkt vermischt werden. Berechnungen ergeben, dass bei einem theoretischen Wirkungsgrad von nur 4 % aus einem Kubikmeter Wasser mit einer Temperatur von  $+2^{\circ}\text{C}$  und einer Lufttemperatur von  $-22^{\circ}\text{C}$  dieselbe Energiemenge gewonnen werden kann, wie aus dem Fall dieses Kubikmeters aus einer Höhe von 1.200 m.

In den Jahren 1993 bis 1998 war in Keahole Point, Hawaii ein experimentelles Meereswärmekraftwerk mit offenem

Kreislauf erfolgreich in Betrieb. Die Generatorleistung betrug 210 kW, bei einer Oberflächenwassertemperatur von  $26^{\circ}\text{C}$  und einer Tiefenwassertemperatur von  $6^{\circ}\text{C}$ . Im Spätsommer bei sehr hohen Temperaturen konnten bis zu 250 kW vom Generator abgegeben werden. Dabei wurden etwa 200 kW von den Pumpen zur Förderung des Wassers verbraucht. Es wurden etwa 24.600 Kubikmeter kaltes Wasser durch ein 1 Meter durchmessendes Rohr aus rund 825 m Tiefe und 36.300 Kubikmeter warmes Oberflächenwasser an Land gepumpt. Ein kleiner Teil des erzeugten Dampfes wurde zur Gewinnung von entsalztem Wasser genutzt (etwa 20 l/min). Die Versuche ergaben, dass sich bei kommerziellen Kraftwerken ein Verhältnis von etwa 0,7 von Generatorleistung zu Netzeinspeiseleistung erreichen lassen würde.

Die Lockheed Martin Corp. aus Bethesda gibt im Februar 2008 bekannt, dass sie eine 10 MW OTEC-Demonstrationsanlage errichten will, die rund 3.000 Haushalte versorgen soll. Dabei werden erstmals neue Werkstoffe wie

Glasfasern und preisgünstige Komposit-Materialien zum Einsatz kommen. Geplant ist die Entwicklung einer funktionsfähigen, schwimmenden OTEC-Anlage bis 2013. Im August 2010 gibt die japanische Regierung allerdings bekannt, dass man 2012 eine OTEC-Anlage bauen will, die 2016 ihren kommerziellen Betrieb aufnehmen soll. Erste Tests hierfür sollen bereits 2011 beginnen. Für die kommenden fünf Jahre (bis 2015) wird hierfür ein Etat von 13 Mrd. Yen eingeplant.



*Keahole Point, Hawaii*

## Salinitätsgradient (Osmose-Kraftwerk)

Die Nutzung der Salinität des Meeres zur Energieerzeugung ist eine relativ neue Idee, aber erstmals beschrieben wird die osmotische Kraft 1748, als der französische Physiker Jean-Antoine Nollet eine mit Alkohol gefüllte Schweinsblase in eine Wasserwanne packt, worauf die Blase anschwillt und platzt.

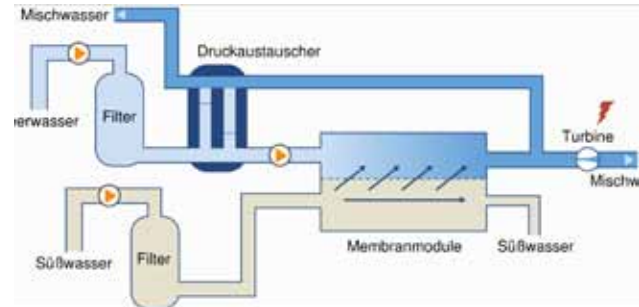
Bei der heutigen technischen Umsetzung wird der hohe osmotische Druck zwischen Süß- und Salzwasser, d. h. der Unterschied zwischen der hohen Salinität des Meerwassers und der niedrigen des ‚süßen‘ Flusswassers, als Energiedifferenz genutzt. Werden Süß- und Salzwasser nämlich durch eine **semipermeable Membrane** getrennt, so fließt Wasser von der Süß- zur Salzwasserseite – getrieben (oder gesogen?) von dem Konzentrationsunterschied des Salzes. Dieses Prinzip bildet gewissermaßen eine spiegelbildliche Technologie zur reversiblen Osmose (RO), die bereits erfolgreich zur Meerwasserentsalzung genutzt wird.

Von den weltweit zur Verfügung stehenden ca.  $30 \cdot 10^{12}$  W könnten etwa  $2,6 \cdot 10^{12}$  W genutzt werden. Als Wirkungsgrad der Osmose-Kraftwerke werden 25 % bis 30 % angegeben. Gegenwärtig stehen drei Methoden zur Verfügung, die alle auf halbdurchlässigen Membranen aufbauen:

Die Nutzung des osmotischen Drucks zwischen dem unterschiedlichen Oberflächenwasser- und Tiefenwassersalzgehalt **im Meer selbst**, wobei die ‚stärkere‘ Salzlösung aufsteigt. Das Aufsteigen und/oder der anschließende Fall soll der Stromerzeugung dienen.

Eine weitere Form ist die Nutzung des osmotischen Drucks **an den Meereshmündungen** der Flüsse. Das Süßwasser trifft hier mit einer osmotischen Druckdifferenz von etwa 24 Atmosphären auf das Meerwasser, was ausreichen soll, um eine 238 m hohe Salzwassersäule aufzubauen. Extremfälle wie der Salt Lake in den USA mit einer osmotischen Druckdifferenz von 380 Atmosphären oder das Tote Meer zwischen Palästina

und Jordanien mit sogar 500 Atmosphären (gegenüber dem Süßwasser des Jordans) würden sich natürlich besonders gut ausnutzen lassen. Mit diesen Druckdifferenzen ließen sich entsprechend hohe Salzwassersäulen aufbauen – wo auch hier anschließend wieder der freie Fall zur Stromerzeugung genutzt wird. Beim Toten Meer beträgt der theoretische Höhenunterschied etwa 5.000 m (!).



*Funktionsprinzip*

Ein Pluspunkt dieser Methode ist, daß viele große Städte direkt an Flussmündungen liegen – womit eine verlustreiche Übertragung der Energie unnötig wird. Für die Columbia-Flußmündung haben kalifornische Wissenschaftler errechnet, daß sich daraus eine Nutzleistung von etwa 4.600 MW ergeben würde, falls von der Strömungsmenge des Flusses ( $6.600 \text{ m}^3/\text{s}$ ) nur 50 % mit einem Wirkungsgrad von 30 % ausgenutzt werden könnten.

Eine ‚membranlose‘ Methode steht allerdings auch zur Verfügung, bei welcher der unterschiedliche Dampfdruck von Süß- und Salzwasser genutzt wird. Bei gleicher Temperatur verdampft mehr Wasser aus einem Behälter mit Süßwasser als aus einem mit Salzwasser. Durch den geringeren Dampfdruck über dem Salzwasser bewegt sich der Wasserdampf vom Süß- zum Salzwasserbehälter. Wird hier eine Turbine zwischengeschaltet, kann damit Energie erzeugt werden. Dabei wirkt die Oberfläche des Wassers selber quasi als Membran. Allerdings werden bei dieser



Umsetzung nur geringe Druckunterschiede erreicht, so daß hier sehr große Turbinen benötigt werden. Die außerdem notwendigen Wärmetauscher sind aber immer noch billiger als die Membranen.

Die technische Realisierung von **Osmose-** oder **Salzkraftwerken** hängt daher zumeist von den speziellen Membranen ab, welche die Salze effizient und möglichst vollständig zurückhalten - für Wasser aber gleichzeitig gut durchlässig sind. Wegen des Mangels an geeigneten Membranen kann das Prinzip in den 1970er Jahren noch nicht realisiert werden, als sich der israelische Wissenschaftler Sidney Loeb damit beschäftigt. Seit Mitte der 1990er Jahre gibt es jedoch verschiedene neue Ansätze, um aus Polymeren geeignete Membranen zu entwickeln und herzustellen.

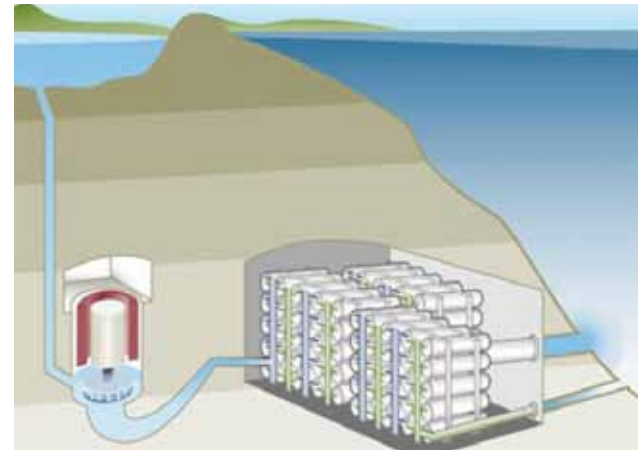
#### **Kommen wir nun zur Chronologie der Entwicklung und Umsetzung:**

**2001** startet der in Regierungsbesitz befindliche norwegische Energiekonzern **Statkraft Energi**, Oslo, der sich seit **1997** mit der PRO-Technologie beschäftigt (**Pressure Retarded Osmosis**), gemeinsam mit Wissenschaftlern des GKSS-Forschungszentrums in Geesthacht bei Hamburg, des portugiesischen Instituto de Ciencia e Tecnologia de Polimeros, des norwegischen Institute of Technology (SINTEF) sowie der Technischen Universität Helsinki ein von der EU gefördertes Gemeinschaftsprojekt zur Entwicklung eines Osmose-Kraftwerks. Man untersucht zuerst einmal mehr als 50 verschiedene Membrantypen, bis zwei davon übrig bleiben, die sich bereits seit Jahren in Osmoseanlagen zur Meerwasserentsalzung bewährt haben: Cellulose-Acetat, das auch zu Kunstseide verarbeitet wird, sowie die sogenannten Dünnschicht-Composites (TFC), die aus einem hauchdünnen Polyamidfilm und einem Trägermaterial zur Stabilisierung bestehen (Polyamide sind unter Handelsnamen wie Nylon oder Perlon bekannt).

Die kritische Größe bei der Umsetzung dieser Technologie ist die Leistung, die mit einem Quadratmeter

Membranfläche erzeugt werden kann. Während die Kunststoff-Membran aus Geesthacht am Anfang lediglich eine Leistung unterhalb 0,1 Watt pro Quadratmeter liefern kann, erreichen die Wissenschaftler drei Jahre später schon knapp 2 W/m<sup>2</sup>. Die Zielvorgabe lautet allerdings, die Leistung auf 5 W/m<sup>2</sup> zu steigern, denn erst dann arbeitet die Membrane auch wirtschaftlich.

Die Europäische Kommission und der Statkraft-Konzern (der in Norwegen derzeit 133 Wasserkraftwerke betreibt, zu denen nochmals 19 in Schweden und vier in Finnland dazukommen) beziffern das Potential in Europa mit 200 Terawattstunden pro Jahr, was etwa dem doppelten Verbrauch an Elektrizität eines Landes wie Norwegen entspricht. Allein der Rhein könnte an seiner Meeresmündung in den Niederlanden 3 GW Energie erzeugen.



*Osmose-Kraftwerk (Grafik)*

An den zahlreich vorhandenen norwegischen Flussmündungen könnten insgesamt bis zu zwölf Milliarden kW/h pro Jahr erzeugt werden – was etwa 10 % des jährlichen Bedarfs entspräche. Für den gesamten europäischen Raum kommt man auf eine mögliche Energieproduktion von 200 Milliarden kW/h pro Jahr.

Die größte Herausforderung besteht allerdings noch immer darin Membranen zu finden, die effizient, robust und doch kostengünstig sind. Die Wissenschaftler rechnen Mitte der Dekade mit mindestens weiteren fünf Jahren Forschungsaufwand für die Entwicklung von Membranen, die auch kommerziell eingesetzt werden können.

Im Oktober **2007** verbreitet sich eine Meldung rasant durch so gut wie alle Medien: Der norwegische Statkraft-Konzern wird in der Gemeinde Hurum, an einer Flussmündung im südlichen Ausläufer des Oslofjordes, den Prototypen eines Osmose-Kraftwerks mit einer Leistung von 2 – 4 kW errichten. Bis zu diesem Zeitpunkt hat das Unternehmen bereits zehn Jahre Forschung und Entwicklung in die Technologie investiert.

Baubeginn ist im Sommer **2008**, und im November **2009** nimmt die Prototyp-Anlage in der ehemaligen Södra-Zellulosefabrik in Tofte, 96 km südwestlich von Oslo, ihren Betrieb auf. Sie wird von der norwegischen Prinzessin Mette-Marit persönlich eröffnet.

Die eingesetzten Membranen des Instituts für Polymerforschung GKSS erbringen pro Quadratmeter eine elektrische Leistung von 3 W. Sie sind 0,1 Mikrometer dünn und bestehen aus mehreren Schichten auf einem stabilisierenden Trägergewebe. Die Testanlage wird zunächst mit 12 Bar arbeiten, was einem Wasserfall von 120 m Höhe entspricht.

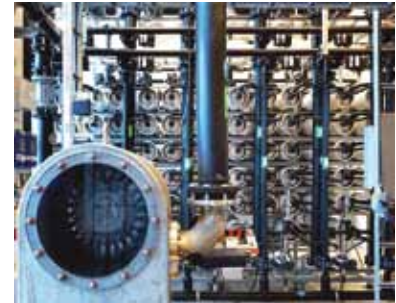


*Statkraft Anlagenbau*

Nach **2020** sieht Statkraft bereits Dutzende von Großanlagen in Betrieb, die zusammen 12 TWh, oder rund 10 % des Norwegischen Bedarfs decken.

Bereits im März **2007** baut das holländische Energieforschungs-Zentrum KEMA, das sich seit **2002** mit der Salinitätsenergie beschäftigt, zusammen mit der ebenfalls holländischen Firma **VolkerWessels** (VWS) an einem 250 kW Prototyp, der nach dem Prinzip der sogenannten **reversen Elektrodialyse** (Reverse Electrodialysis, RED) funktioniert.

Bei dem Projekt geht man von der Zielvorstellung aus, in Zukunft aus einzelnen 250 kW Modulen, von denen jedes die Größe eines Seecontainers hat, eine 200 MW Anlage zusammenzustellen. Man errechnet, dass ein Einsatz dieser Technologie an allen Flussmündungen des Landes eine Gesamtleistung von 3.300 MW erbringen würde.



*Statkraft Anlage*

Mitte **2009** wird eine weitere Technologie bekannt, die von dem Physiker Dorian Brogioli an der Universität Milano-Bicocca in Monza entwickelt wird. Seine Prototyp-Zelle basiert auf zwei Stückchen Aktivkohle, einem porösen Kohlenstoff, der im allgemeinen zur Filterung von Wasser und Luft eingesetzt wird. Yury Gogotsi, Direktor des A. J. Drexel Nanotechnology Institute an der Drexel University in Philadelphia bezeichnet die Technologie als **Reverse Capacitance Desalination**.

Der elektrische Doppelschicht-Kondensator (Electronic Double Layer, EDL) besteht aus zwei porösen Kohlenstoff-Elektroden, die in Salzwasser getaucht werden. Die Elektroden werden an eine Stromversorgung angeschlossen, so dass eine negativ und die andere positiv aufgeladen wird.

Da Salzwasser aus positiv geladenen Natrium-Ionen und negativ geladenen Chlorid-Ionen besteht, zieht die positive Elektrode die Chlorid-Ionen und die negative Elektrode die Natrium-Ionen an. Mit Hilfe der elektrostatischen Kraft, welche die entgegengesetzt geladenen Ionen in der Nähe ihrer jeweiligen Elektroden hält, kann der EDL-Kondensator eine Ladung speichern. Um diese abzunehmen, wird frisches Wasser in das Gerät gepumpt, wodurch die Natrium- und Chlorid-Ionen gegen die elektrostatische Kraft von den Elektroden wegdiffundieren. Das System wandelt im Grunde die mechanische Arbeit des Mischens von Salz- und Süßwasser in elektrostatische Energie um, die dann als nutzbare Energie gewonnen werden kann. Eine typische Zelle erfordert Brogioli zufolge Aktivkohle im Wert von etwa drei Dollar, und bei einem ausreichenden Wasserstrom soll damit der Bedarf eines kleinen Hauses gedeckt werden können.

Mitte **2010** veröffentlicht die Cleantech-Beratungsfirma Kachan & Co. aus San Francisco einen 17-seitigen Bericht (für 395 \$!), in dem konstatiert wird, daß das Potential der osmotischen Energie groß genug sei, um damit bis zum Jahr **2030** etwa 50% der europäischen Strombedarfs decken zu können.

### Hydrosphärengenerator

Die Sea Solar Power International in Baltimore, Maryland, ein Unternehmen der **Abell Foundation**, analysiert Anfang **2006** das US-Patent von Richard M. Dickson aus Portland, Oregon, dessen Vorschlag auf der Nutzung des Druckunterschieds zwischen Oberflächenwasser und Wasser in großen Tiefen beruht, was Leistungen bis zu 500 MW möglich machen soll. Sowohl die Howaldtswerke-Deutsche Werft AG (HDW) in Kiel, als auch die Florida Hydro Inc. in Palatka, Florida, hätten das System bereits bewertet, Details darüber sind bislang jedoch noch nicht veröffentlicht worden.

Die Animation auf Dicksons Homepage zeigt eine unterseeische Konstruktion von 15 m Durchmesser in 100 m Tiefe, in der sich zyklisch eine Art Kolben bewegt, wobei

sich – allerdings langsamer – auch die Meeresoberfläche zyklisch hebt und senkt.

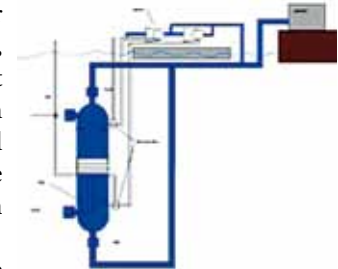
Die Idee dazu kommt Dickson im Jahr **2001**, als er in einem Buch über die Tauchfahrten von Dr. William Beebe aus den **1930er** Jahren liest, wie ein in rund 450 m Tiefe mit Wasser befülltes Gerät, das anschließend an die Oberfläche geholt wurde, den Überdruck in seinem Innern mit einer unglaublichen Gewalt entließ. Ein Patentantrag für das **Submersible Hydroelectric Propulsion System** (SHPS) von Ende **2006** wird zurückgewiesen.

Im Februar **2008** erhält Dickson für sein Hydrosphären-Konzept, das er bei Interviews gerne auch **Air Water Gravity Generator** (AWGG) oder **Ocean Pressure Electric Conversion** (OPEC) System bezeichnet, eine Ehrenurkunde des History Channel und des Modern Marvels Invent Now Challenge **2007**.

Die latente hydro-statische Energie (sprich: der Wasserdruck) soll auch der Grund für die Funktion der **Spiteri Wasserpumpe** des maltesischen Erfinders Joe Spiteri-Sargent sein, für die er **2007** den Energy Globe Award des Europäischen Parlaments bekommt – obwohl eine Patentierung des Systems in England zweimal abgelehnt wird. Eine Patentierung **2006** in Malta scheint dagegen akzeptiert worden zu sein.

Die Maschine arbeitet unterhalb einer Wasseroberfläche und setzt über einen rhythmischen Kippvorgang die hydrostatische Energie eines Gewässers unter Ausnutzung des Auftriebs und der Gravitation dergestalt um, daß Wasser hochgepumpt werden kann und letztlich ein künstlicher Wasserfall entsteht, dessen Energie über eine Turbine Strom erzeugt.

Spiteri erlangt die Inspiration zu seiner



SHPS Funktion

Maschine **1989** in Kanada, wo er seit langem lebt, und schuldet diese dem ehemaligen Ministerpräsidenten Dom Mintoff, der **1980** sagte: „Wenn Malta nur so etwas wie ein Wasserfall hätte, dann wäre unser Strom viel billiger.“ Ab **1991** beginnt Spiteri gemeinsam mit dem Wasserbauingenieur Marco Cremona mit der Entwicklung von Prototypen und der Durchführung praktischer Versuche in einem 4 m hohen Wassertank in Luqa.

In seine Firma **Sargent Enterprises Ltd.** (SEL) investieren 22 Familienmitglieder und Freunde, was die Entwicklung und den Prototypenbau überhaupt erst möglich macht. Auf dem Foto ist ein Modell der 1. Generation zu sehen. Mittelfristig denkt der Erfinder an Stationen mit mehreren Einzelpumpen, die bis zu 250 kW produzieren.

Ein möglicherweise ähnliches System hat der Zeitungsverleger Ruben Pesebre erfunden. Gemeinsam mit seinem Partner Nemesio „Boyet“ Antonio Jr. läßt er **2005** auf den Philippinen einen **Underwater Pressure Energy Converter** (UPEC) patentieren, über den ich bislang jedoch keine näheren Details in Erfahrung bringen konnte.



*Spiteri-Pumpe*

## **Hydrogenerator**

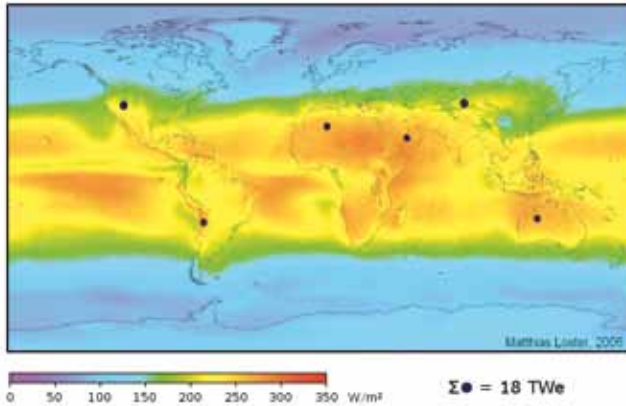
Brasilianische Forscher der Universität Campinas stellen auf dem Treffen der American Chemical Society in Boston im August **2010** das Konzept für ein System vor, bei dem Panels auf Hausdächern elektrischen Strom aus jener Energie der Atmosphäre erzeugen, die sich sonst in Blitzen entladen würde.

Bei hoher Luftfeuchte laden sich Aluminium-Partikel positiv, Silizium-Partikel hingegen negativ auf. Den Wissenschaftlern zufolge beweist dies, daß Wasser in der Atmosphäre elektrische Ladung sammelt, umformt und an andere Materialien übertragen kann. Die entstehende Ladung wird **Hygroelektrizität** genannt, wobei Hygro für Feuchtigkeit steht.

Die Elektrizität aus der Atmosphäre ist daher besonders für die Tropen mit ihren vielen Gewittern eine Perspektive. Die Brasilianer testen derzeit, welche Metalle sich für Panels am ehesten eignen.

# Sonnenenergie

Sobald von alternativen oder erneuerbaren Energien die Rede ist, wird als erstes an die Sonne gedacht. Was die Sonne energetisch so anziehend macht, ist, dass sie jeden Morgen verlässlich wieder ‚aufgeht‘ und ihre Strahlung neu zur Verfügung stellt.



## *Weltweit verfügbare Sonnenenergie.*

Die Farben in der Karte zeigen die örtliche Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche gemittelt über die Jahre 1991–1993 (24 Stunden am Tag, unter Berücksichtigung der von Wettersatelliten ermittelten Wolkenabdeckung). Zur Deckung des derzeitigen Weltbedarfs an Primärenergie allein durch Solarstrom wären die durch dunkle Scheiben gekennzeichneten Flächen ausreichend (bei einem Wirkungsgrad von 8 %).

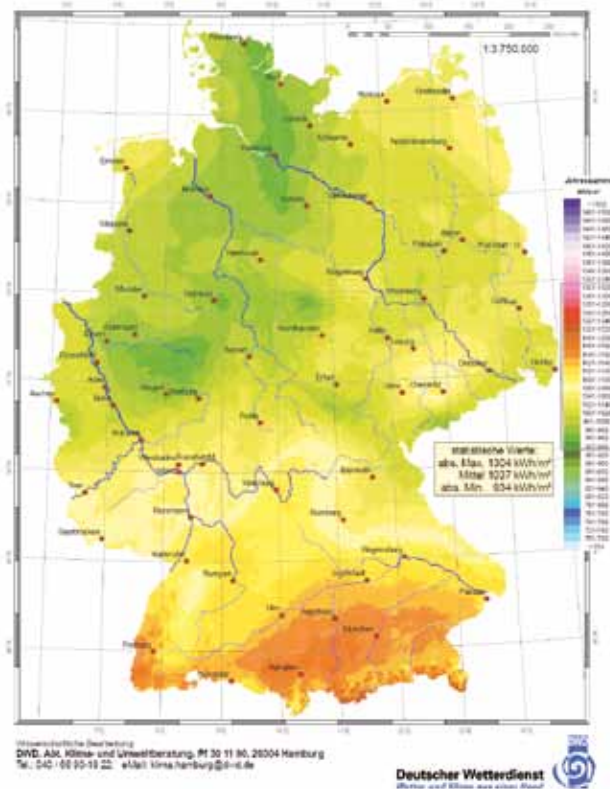
Als Sonnenenergie oder Solarenergie bezeichnet man die Energie der Sonnenstrahlung, die in Form von elektrischem Strom, Wärme oder chemischer Energie technisch genutzt werden kann.

Die Sonnenenergie ist, seitdem sie gemessen wird, annähernd konstant; es gibt auch keine Hinweise auf

deutliche Schwankungen in historischer Zeit. Die durchschnittliche Intensität der Sonneneinstrahlung beträgt an der Grenze der Erdatmosphäre etwa  $1,367 \text{ kW/m}^2$ ; dieser Wert wird auch als Solarkonstante bezeichnet. Von der Strahlungsleistung der Sonne auf Meereshöhe entfallen etwa 4 % auf den UV-Bereich ( $< 400 \text{ nm}$ ) und jeweils etwa 48 % auf den sichtbaren (400 bis  $750 \text{ nm}$ ) und den Infrarot-Bereich ( $> 750 \text{ nm}$ ). Ein Teil der eingestrahlteten Energie wird von der Atmosphäre – von festen (z. B. Eiskristallen, Staub) oder flüssigen Schwebeteilchen sowie von den gasförmigen Bestandteilen – reflektiert. Ein weiterer Teil wird von der Atmosphäre absorbiert und bereits dort in Wärme umgewandelt. Der dritte Teil geht durch die Atmosphäre hindurch bis zum Erdboden. Dort wird er entweder in Wärme umgewandelt, oder er betreibt zum Beispiel die Photosynthese, die Photothermik oder die Photovoltaik. Die prozentuale Verteilung der Einstrahlung auf Reflexion, Absorption und Transmission hängt vom jeweiligen Zustand der Atmosphäre ab. Dabei spielen die Luftfeuchtigkeit, die Bewölkung und die Länge des Weges, den die Strahlen durch die Atmosphäre nehmen müssen, eine Rolle. Die auf die Erdoberfläche auftreffende Strahlung beträgt weltweit im Tagesdurchschnitt (bezogen auf 24 Stunden) noch ungefähr  $165 \text{ W/m}^2$  (mit erheblichen Schwankungen je nach Breitengrad, Höhenlage und Witterung). Die gesamte auf die Erdoberfläche auftreffende Energiemenge ist mehr als fünftausend Mal größer als der Energiebedarf der Menschheit. Letztlich wird die gesamte Energie der Sonne in Form von Wärmestrahlung wieder an den Weltraum abgegeben.

Nicht vergessen werden darf, dass die gesamten fossilen, nichterneuernden Energieträger den wissenschaftlichen Erkenntnissen zufolge nichts anderes als gespeicherte Sonnenenergie darstellen.





*Sonnenstrahlung Karte - Deutschland*

Mit Hilfe der Solartechnik lässt sich die Sonnenenergie auf verschiedene Arten nutzen:

- Sonnenkollektoren gewinnen Wärme (Solarthermie bzw. Photothermik)
- Solarzellen erzeugen elektrischen Gleichstrom (Photovoltaik)
- Sonnenwärmekraftwerke erzeugen mit Hilfe von Wärme und Wasserdampf elektrischen Strom
- Pflanzen und pflanzliche Abfälle werden so verarbeitet, dass nutzbare Flüssigkeiten (z. B. Ethanol, Rapsöl) oder Gase (z. B. Biogas, gereinigt wird daraus Methan) entstehen

- Wind- und Wasserkraftwerke erzeugen elektrischen Strom
- Solarkocher oder Solaröfen erhitzen Speisen oder sterilisieren medizinisches Material

Die Sonnenenergie ist eine regenerative Energie, ihre Nutzung wird in vielen Ländern gefördert, in Deutschland z.B. durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).

Die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche ist die Haupteinflussgröße des Wettergeschehens und des regionalen wie globalen Klimas. Die Strahlungsstromdichte (engl. heat flux density, irradiation), also die Strahlungsenergie pro Flächen- und Zeiteinheit, hängt vom Winkel der Sonneneinstrahlung ab. Bei flachem Winkel treffen weniger Photonen pro Flächeneinheit auf dem Boden auf und erwärmen ihn weniger stark als bei senkrechtem Einfall. Dies kommt durch folgende Formel zum Ausdruck:

$$J = J_0 \cdot \sin(\beta)$$

Hierbei bezeichnet  $J$  die Strahlungsleistung,  $J_0$  die Strahlungsleistung bei senkrechtem Einfallswinkel und  $\beta$  den Einfallswinkel gegenüber dem Horizont.

Verstärkt wird der Effekt durch den verlängerten Weg, den das Licht bei flachen Winkeln durch die Atmosphäre zurücklegen muss.

### **Geschichte des Solarnutzung**

Die Omeken nutzen schon vor über 3.000 Jahren in Zentralamerika Parabolspiegel aus Magneteisen als Feuerzeuge. Und in den Ruinenstätten von Ninive in Mesopotamien wurden einfache Brenngläser gefunden, die etwa aus dem 7. Jahrhundert vor Christus stammen.

Im frühen Altertum ließ sich **Sokrates** (469 – 399 v.Chr.) über die passive Nutzung der Sonnenenergie beim Hausbau aus. **Aristoteles** (384 – 322 v.Chr.) schlug eine Methode zur solaren Verdampfung von Meerwasser zur Trinkwassergewinnung

vor. **Euklid** (ca. 365 – ca. 300 v.Chr.) wies in seiner Schrift über die Optik auf die Möglichkeit hin, die Sonnenstrahlung mit Brennsiegeln zu konzentrieren, um höchste Temperaturen zu erreichen. Im alten Griechenland wurde z.B. das heilige Feuer in Delphi mit einem Brennspiegel entfacht.

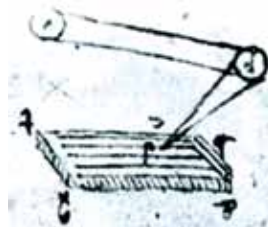
Von **Archimedes** selbst (287 – 212 v. Chr.) wird berichtet – sei es nun Legende oder Wahrheit –, dass er im zweiten Punischen Krieg die Takelage der die Stadt Syrakus angreifenden römischen Flotte mit gebündelten Sonnenstrahlen in Brand setzte.



*Solarenergie zur Verteidigung*

Die griechische Marine führt **1973** ein Experiment mit hochreflektierenden Bronzeschilden durch, wie sie vor über 2.000 Jahren von Archimedes gegen die Römische Flotte eingesetzt sein sollen, und bringen tatsächlich ein hölzernes Boot in einer Entfernung von 50 m zum Brennen. Bereits im ersten Jahrhundert n. Chr. sind im römischen Imperium wassergefüllte, dunkel gefärbte Tontöpfe in Gebrauch, die auf das Dach gestellt werden und in denen sich durch die Sonnenwärme das Wasser erwärmen soll.

Um **1515** beginnt **Leonardo da Vinci** (1452 – 1519), der sie schon länger mit der Suche nach einer sauberen Energiequelle beschäftigt, mit dem Bau eines

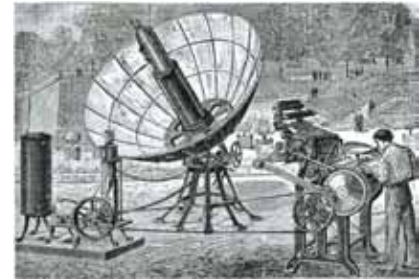


*Zeichnung von da Vinci*

riesigen Reflektors (einige Quellen sprechen von einer Breite von über 6 km!), mit dem Kleider getrocknet werden sollten. Unter seinen vielen Zeichnungen findet man auch eine, bei der ein entfernter Reflektor seine Strahlen auf eine Anordnung von Röhren richtet... möglicherweise eine frühe Form von Solarabsorber.

Das photoelektrische Prinzip, das die Grundlage aller Arten von Solarzellen bildet, wird **1839** von dem damals erst 19-jährigen französischen Physiker **Alexandre Edmond Becquerel** (1820 – 1891) entdeckt – dem Vater jenes **Antoine Henri Becquerel** (1852 – 1908), welcher den Physiknobelpreis **1903** erhalten wird – für seine Entdeckung der Radioaktivität im Jahre **1896**.

Um **1870** tun sich die beiden französischen Ingenieure **A. Mouchot** und **Abel J. Pifre** zusammen und bauen Solarkocher für die französischen Truppen in Süd-Afrika, sowie verschiedene Sonnenmaschinen. Der Kollektor einer dieser Maschinen ist ein Parabolspiegel mit 2,20 m Durchmesser und besitzt auf der Innenseite versilberte Kupferplatten. Der röhrenförmige Dampfkessel im Brennpunkt ist geschwärzt und treibt eine Wasserpumpe an.



*Solar-Druckmaschine (1878)*

Zu besonderer Berühmtheit gelangt **1878** die mit Sonnendampf gespeiste Druckerpresse von **A. Pifre**, mit der während der Pariser Weltausstellung stündlich 500 Exemplare des *Le Journal Soleil* gedruckt werden, in welchem über die Vorteile der Solarenergie im allgemeinen, und über die Forschungen Mouchots im besonderen berichtet wird. **A. Mouchot** selber, auch weiterhin ein glühender

Brennspiegel von 5 m Durchmesser vor, deren Dampf über einen Kondensator zum Betrieb eines Kühlschranks genutzt wird. Außerdem stellt er einen Solarkocher vor, in dem ein Pfund Rindfleisch in 25 Minuten gar wird. Die beiden Erfinder erhalten zwar Medaillen, aber nicht die erhoffte finanzielle Unterstützung. **A. Mochot** stirbt **1912** in Paris – arm, einsam und vergessen.

Ein New Yorker Erfinder namens **Charles E. Fritts** baut **1883** die erste Solarzelle, die er aus einem ‚wafer‘ aus dem halbleitenden Selen und einer hauchdünnen Überzug aus einer Schicht Gold herstellt. Der Wirkungsgrad liegt noch unter 1 %. Seine entsprechenden Aussagen werden mit größtem Skeptizismus aufgenommen. **C. Fritts** schickt jedoch einige seiner Solarplatten an **Werner von Siemens** (1816 – 1892), der davon begeistert ist und die Zellen in der Preußischen Akademie der Wissenschaften vorstellt. Er nennt dies eine „Entdeckung von größter wissenschaftlicher Bedeutung.“ Im gleichen Jahr baut Ericsson einen parabolischen Rinnenkollektor aus versilberten Glasplatten mit einer Gesamtfläche von 9,3 m<sup>2</sup> und einem geschwärzten Absorberrohr in der Brennlinie. Die Ausbeute beträgt allerdings nur 0,7 kW.

**1891** patentiert und vermarktet ein **Clarence M. Kemp** aus Baltimore den ersten kommerziellen solaren Wassererhitzer *The Climax*. Von diesem Kollektor werden mehrere Tausend Stück verkauft. Andere Quellen sprechen davon, daß er bereits 6 Jahre später sogar in 30 % aller Haushalte in Pasadena im Einsatz gewesen sein soll.

1905 folgt das Patent für einen solaren Wasserkocher von E. P. Brown und Carl Gunther. Und Albert Einstein publiziert seinen Artikel über den photoelektrischen Effekt.

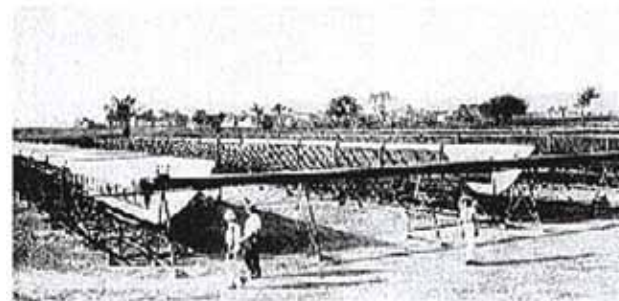
Das erste ‚richtige‘ Solarkraftwerk wird 1912/1913 von dem deutsch-amerikanischen Ingenieur Frank Shuman (1862 – 1917) aus Tacony errichtet – im ägyptischen Meadi, etwa 25 km südlich von Kairo. Er hatte bereits 1906 mit seinen Versuchen begonnen und schon mehrere Anlagen erfolgreich vorgeführt. 1911 interessieren sich

Investoren aus England für seine Technik, die daraufhin in Zusammenarbeit mit dem britischen Professor C. V. Boys, dem Erfinder der Quarzfaser, und dem ebenfalls britischen Beratungsingenieur A. S. E. Ackermann erstmals in industriellem Maßstab umgesetzt wird.



*Shuman-Reflektorsegment*

Die damals weltgrößte Kollektorfläche liefert rund 55 PS für den Betrieb von Wasserpumpen (spätere Quellen sprechen von sogar 100 PS). Auf einer Gesamtfläche von 3.500 m<sup>2</sup> sind Rinnenkollektoren, die eine Konzentration von 4,5 : 1 aufwiesen, in fünf Reihen à 62 m Länge und 4 m Breite aufgestellt. Sie haben eine Fläche von 1.277 m<sup>2</sup> und werden über ein Hebelsystem der Sonne nachgeführt, so daß sie ihre volle Leistung bis zu 9 Stunden am Tag erzielen. Der Wirkungsgrad soll dabei rund 40 % betragen. Der erste Heizkessel explodiert, aber mit dem zweiten kann das Kraftwerk kontinuierlich über 5 Stunden bis zu 45 kW liefern.



*Parabolrinnenanlage (Ägypten, 1913)*

Aufgrund der hohen Investitionskosten wird allerdings eine geplante weitere, wesentlich größere Anlage dann doch nicht realisiert. Ähnliche Anlagen wie die in Ägypten sollen damals auch schon in Peru und in Kalifornien in Betrieb gewesen sein.

In amerikanischen Wissenschaftsmagazinen erscheinen zunehmend Berichte über die Nutzung der Sonnenenergie, wie z.B. in der Popular Science vom Februar 1940, in welcher eine ‚Sonnenfalle‘ dargestellt wird – das



*Solarhaus (1940)*

Dach des 1939 gebauten Ökohaus-Vorläufers Solar I auf dem MIT-Campus in Cambridge –, In Form eines vierfach verglasten thermischen Solarkollektors.



*Hot Dog Sand (ca. 1940)*

Im Mai 1941 meldet der amerikanische Ingenieur Russell Shoemaker Ohm das Patent für eine Halbleiter-Solarzelle an, die bereits weitgehend den heutigen Solarzellen entspricht.

Ebenfalls am MIT starten 1940 Dr. Maria Telkes (s.u.) und George O. G. Lof mit ihren Versuche an Solarkochern. In Kalifornien sorgt derweil ein Hot-Dog-Stand für Aufsehen, dessen Spiegel eine automatische thermostatische Sonnennachführung besitzen.

Er hatte zwei Jahre zuvor den sogenannten p-n-Übergang entdeckt (ein Materialübergang in Halbleiterkristallen zwischen Bereichen mit unterschiedlicher Dotierung). Erteilt wird ihm das Patent im Juni 1946 (Nr. 2.402.662). Es ist allerdings nicht bekannt, ob er eine Version seiner modernen Solarzelle damals auch tatsächlich gebaut hat.

Durch die schon 1949 erfolgten ersten Versuche hatte man die immensen Möglichkeiten der solaren Hochtemperatur-Technologie erkannt. Der deutsch-französische Wissenschaftler Felix Trombe, erhält daraufhin den Auftrag, zuerst den Bau eines 50 kW Ofens in Montlouis in den östlichen Pyrenäen zu übernehmen – und anschließend den Bau des mit seiner Leistung von 1 MW bislang wohl immer noch größten Solarofens der Welt bei Odeillo Font-Romeu. 1968 beginnt der Bau in 1.500 m Höhe – die dortigen klimatischen Verhältnisse erlauben eine Betriebsdauer von 3.000 Arbeitsstunden pro Jahr.



*Solarofen Odeillo*

Der Odeillo-Solarofen, dessen riesiger parabolischer Spiegel die gesamte Fassade eines elfstöckigen Gebäudes bedeckt, geht 1970 in den Probetrieb und erreicht im Brennpunkt Temperaturen bis zu 3.800°C.





*Vanguard I*

Am 17. März 1958 startet mit der Vanguard I ein Satellit der Navy, der erstmals mit den neuen Photozellen ausgerüstet ist. Dieses System von 0,1 W Leistung und 100 cm<sup>2</sup> Fläche betreibt einen 5 mW Reserve-Sender und funktioniert 8 Jahre lang. Die Kosten belaufen sich auf umgerechnet 2.000 \$ pro Watt. Daß der Satellit überhaupt mit Photozellen ausgerüstet wird ist Dr. Hans Ziegler zu verdanken, der Ende der 1950er Jahre als der führende Satellitenexperte galt und einen regelrechten ‚Kreuzzug‘ gegen den Einsatz von nur befristet funktionierenden Batterien und für Solarzellen führte. Inzwischen ist Vanguard I längst verstummt. Trotzdem zieht die Space-Pampelmuse weiter ihre Bahn um die Erde: Mehr als 200.000 Erdumkreisungen hat der Satellit in seiner über 50-jährigen Geschichte bereits hinter sich gebracht. Und es dürften noch etliche dazu kommen: Nach derzeitiger Einschätzung wird die Flugbahn von Vanguard I noch etwa 200 Jahre stabil bleiben.

Mit der Einführung der Solarzelle in den USA beginnt ein neues Kapitel der Solarenergie. Die direkte Umwandlung von Sonnenstrahlen in Elektrizität eröffnet nicht nur in der Raumfahrt viele neue Möglichkeiten.

1963 hat die japanische Sharp Corporation Erfolg bei der Produktion praktischer Siliziumzellen-Module. In Japan wird eine 242 W PV-Anlage installiert, sie ist zu diesem Zeitpunkt die weltweit größte Solarzellenanlage.

1977 ist der Solarofen von Odeillo die erste solartechnische Anlage, deren Strom in das öffentliche Netz gespeist

wird (nominell 56 kW). In den USA werden die ersten modernen thermischen Solaranlagen installiert und ein Peter E. Glasser schlägt vor, 100 Quadratkilometer große Solarzellen-Satelliten in den geostationären Orbit zu bringen, deren Energie dann in Form von Radiowellen zur Erde gesendet werden sollen. Ein einziger derartiger Satellit könnte 10 GW Strom liefern.

1977 findet in Hamburg die erste wirklich große Tagung und Ausstellung zur Nutzung von Sonnenenergie statt. Im Rahmen des 1. Deutschen Sonnenforum bieten 150 Fachvorträge und die parallele Fachausstellung Solartechnik 77 ein sehr breites Bild der solartechnischen Anwendungsmöglichkeiten, angefangen mit einfachen Sonnenfeuerzeugen aus verspiegeltem Plastik – bis hin zu multilateralen Gesamtkonzepten wie die Errichtung riesiger Wüstenkraftwerke in Nordafrika (die es leider auch 2010 noch immer nicht gibt), deren Sekundärenergie in Form von Wasserstoff gespeichert, durch Pipelines transportiert, und anschließend beim Endverbraucher in Europa mittels Brennstoffelementen wieder zu elektrischer Energie retransformiert wird.

Die bereits 1977 vom Weißen Hauses bestellte thermische Solaranlage wird 1979 endlich auf dem Westflügel installiert, zur großen Freude von Präsidenten Jimmy Carter und seinem Energieberater David Freeman. Die 34 Kollektoren decken 75 % des Warmwasserbedarfs im Weißen Haus. Später läßt ‚Cowboy‘ Ronald Reagan alles wieder abreißen...

1992 behauptet China, daß dort bereits 100.000 Solarkocher in Aktion sind, die von der Henan Academy of Sciences entwickelt worden sind. Ebenfalls

**1994** findet auf Hawaii die *Erste Weltkonferenz der Photovoltaik* – und in Costa Rica die *Weltkonferenz über Solarkocher* statt. Gleichzeitig streicht Indien die Subvention von Solarkochern, um den Verbrauch von Kerosin und Flüssiggas anzukurbeln.





*Olympische Solar-Flamme*

**1996** wird das Olympische Feuer für Atlanta auf dem Olymp erstmals mit einem kleinen Solar-Parabolspiegel entfacht. In Atlanta selbst wird das Wasser der Wettbewerbsbecken mit Solarenergie erwärmt. (Laut anderen Quellen wurde das Feuer der olympischen Fackel stets mit Sonnenstrahlen angezündet und brannte nicht mit Öl, sondern mit Erdgas. Zwischen **1948** und **1972** wurde für die Flamme allerdings Magnesium benutzt.)

Eine Solarstromanlage, die gleichermaßen optisch und technisch beeindruckt, ist das **1999** errichtete 22 m hohe Solarkunstwerk **Sonnensegel** der psychiatrischen Klinik im schweizerischen Münsingen. Der Entwurf stammt von dem Berner Architekten Peter Schürch, die Ausführung übernimmt die Taroni Metallbau AG in Zollikofen. Die monokristallinen



*Solarsegel Münsingen*

Solarzellen der Firma Astropower mit einem Wirkungsgrad von rund 15 % werden von der Atlantis Solar Systeme AG in Bern auf die verschiedenen Segmente aus gehärtetem Einscheiben-Sicherheitsglas laminiert.

Damit Unterhalt, Wartung, Versicherungen und Rückstellungen über mindestens 20 Jahre sichergestellt werden, wird der Strom aus den 100 m<sup>2</sup> Solarzellen an die Ökostrombörse der Gemeinde Münsingen verkauft. Die Kommune bezahlt pro eingespeister Kilowattstunde einen Franken. **1999** wird das Sonnensegel mit dem prix eta ausgezeichnet, dem Innovationspreis der Schweizer Stromwirtschaft.



*Solar Wall (Wales)*

Im Januar **2004** beendet die Energy Equipment Testing Service (EETS) die Installation der ‚Solar Wall‘ am Welsh Development Agency technology center in St. Asaph, North Wales. Diese Wand besteht aus 2.400 Stück CISDünnschicht-Solarmodulen von Shell Solar und hat eine Gesamtleistung von 85 kW. Ein Vorteil dieser von SolarMount entwickelten Bauweise ist die gute Rückbelüftung der Panele, welche ihre Betriebstemperatur senkt und damit ihre Effizienz steigert.

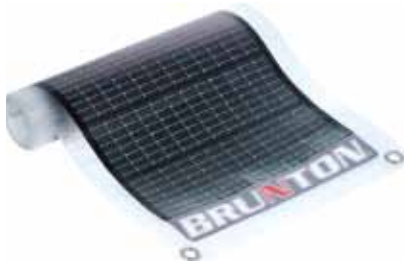
Weltmarktführer (2006) Sharp wirbt für Produktion von Solarzellen, indem er am **14.09.2006** vor dem Kulturforum auf dem Matthäi-Kirchplatz in der Nähe des neuen Regierungsviertels einen Solarobelisk enthüllt, eine 5 m hohe, aus Edelstahl und Glas bestehende solarbetriebene Multimedia-Skulptur. Entwickelt wurde der **Solar-Obelisk** durch die Berliner Solar Lifestyle GmbH in Zusammenarbeit mit dem Architekten Ingo Schneider.



*SHARP Solar-Obelisk*

Der mit vier semitransparenten Sharp-Dünnschicht Solarmodulen (je 37 W) bestückte Solar-Obelisk ist innen beleuchtet, hat einen Granitboden und ist von einer Sitzbank umgeben. Auf der Rückseite zeigt ein Display die aktuelle Einstrahlungsenergie an und informiert über den Standort und die Folgen des Klimawandels.

Ende **2007** kommt eine neue zusammenrollbare Solarzellen-Matte auf den Markt. Die **Brunton SolarRoll 14** ist in der Lage ihrem Outputmaximum von 14 W sogar



*Brunton SolarRoll 14*

Laptops zu betreiben – wozu sie allerdings auf ihre Gesamtlänge von 1,5 m der Sonne ausgesetzt werden muß. Das Unternehmen aus Riverton, **Wyoming**, bietet drei verschiedene Größen an.



*Solarbaum*

Ende des Jahres werden auch die von Ross Lovegrove designten ‚Solarbäume‘ bekannt, die bereits im Oktober eine Woche lang auf der Ringstraße in Wien installiert waren.

Während des Tages speichern diese Strukturen genügend Energie, um ihre Umgebung damit nachts beleuchten zu können, wofür unterhalb der jeweils 36 Solarzellen pro ‚Blatt‘ starke LEDs installiert sind. Hergestellt werden sie von der Firma Artemide, die Solarzellen selbst stammen von Sharp.

In Europa ist das Interesse an derartigen Alternativen zwischenzeitlich gestiegen, nachdem man errechnet hatte, daß **2006** die Straßenbeleuchtung rund 10 % des gesamten europäischen Energieverbrauchs erfordert.

Das Far Niente Weingut im kalifornischen Oakville löste im Jahr **2008** sein Platzproblem, ( man hatte weder ein großes Dach, noch wollte man den guten Boden nutzen, auf dem die Weinstöcke angebaut werden), indem die Photovoltaikanlage schwimmen lernte.



*Schwimmende PV-Anlage  
(Far Niente)*

Nun schwimmen 994 Solarpaneele auf 130 Pontons auf dem großen Wasserbecken des Unternehmens. Gemeinsam mit weiteren 306 Solarpaneele auf einem angrenzenden Landstrich produziert die Anlage 477 kW Spitze, was den Bedarf des Weingutes mehr als deckt.

Gekostet hat das ganze 4,5 Mio. \$ – und einen positiven Nebeneffekt bildet die Tatsache, daß durch die Beschattung des Wassers seine Verdunstungsrate erheblich gesunken ist.



*SRS Dachziegel*

Im März **2008** präsentiert die US-Firma SRS Building Energy aus Philadelphia eine neue Form photovoltaischer Dachziegel. Intelligent zur Anwendung gebrachte, flexible Dünnschichttechnologie verspricht dabei sowohl verbesserte Wirkungsgrade als auch eine besondere Langlebigkeit der Solarzellen. Diese für gebäudeintegrierte Anwendungen gefertigten PV-Module könnten künftig zu einem zentralen Bestandteil in Architektur und Bauwesen werden. Die zum Einsatz kommenden Triple-Junction-Dünnschicht-Siliziumsolarzellen würden die blauen, grünen und roten Spektralanteile des Sonnenlichts in unterschiedlichen Schichten absorbieren und so einen 20-prozentigen Mehrertrag pro erworbenem Watt ermöglichen. Bei den neuartigen Solarziegeln ist mit einem Wirkungsgrad von rund acht Prozent zu rechnen, es wird eine baldige Steigerung auf bis zu 14 Prozent erwartet. Da „Dachdecker eben keine Elektriker sind – und umgekehrt“ hat sich dieser Solarziegel bislang in Deutschland noch nicht durchgesetzt. Es scheint, als schlummere diese Marktlücke seit Jahren unentdeckt vor sich hin.



## Solarschiffe



*Korona*

Im Jahr **1989** fährt ein Solarboot über den Bodensee – die 7,2 m lange **Korona** von Christian Schaffrin, die bis zu 6 Personen befördern kann und deren knapp 10 m<sup>2</sup> Solarzellen einen 3 PS Motor versorgen, der das Boot bis zu einer Geschwindigkeit von 12 km/h antreiben kann. Die Batterien erlauben eine Reichweite bis 70 km, bei Sonnenschein ist die Reichweite prinzipiell unbegrenzt.



*Solifleur*

Die ersten kommerziellen Solarschiffe werden **1995** von MW-Line im schweizerischen Yverdon gebaut. Die 8,5 m langen **Solifleur** und die **Chlorophylle** sind jeweils für 12 Personen angelegt, haben einen 824 W Solargenerator sowie einen 4 kW Motor, und werden von *Pro Natura* für Touren über den See von Neuchatel

genutzt. Ihre Batteriereichweite beträgt 3,5 h bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 10 km/h. Später bekommen die Schiffe die Bezeichnung **Aquabus 850**, und MW-Line baut weitere drei Stück vom Modell **Aquabus 1050** (s.u.) für den Genfer See, die jeweils 25 Passagiere befördern können. Sie sind seit **1999** dort im Einsatz, ein viertes Boot in Milano. Das Unternehmen elektrifiziert allerdings auch andere Schiffe, wie beispielsweise die 20 m lange **Bécassine**.

Am **20. März 1996** startet der Japaner Kenichi Horie mit seinem Solarboot **Malt's Mermaid** im ecuadorianischen Hafen Salinas – und erreicht nach 183 Tagen Ende August wohlbehalten Tokio.

Die Solarzellenpaneele liefern 1,5 kW an die Nickel-Wasserstoff-Batterien, die wiederum das Boot antreiben und Kühlschrank, Videokamera und Funkgerät versorgen. Das Boot selbst besteht teilweise aus 27.000 leeren Bierdosen – ein klarer



*Kenichi Horie auf seiner Malt's Mermaid*

Hinweis auf den Hauptsponsor, einen Bierhändler. Horie hatte schon **1964** unter dem Titel *Kodoku – Sailing alone across the Pacific* den Erfahrungsbericht seiner ersten Überquerung **1962** veröffentlicht, **1999** fährt er dann mit der aus recycelten Bierfässern bestehende **Malt's Mermaid II** von San Fransisco aus nach Japan – und **2002** mit der **Malt's Mermaid III** wieder retour.

1998 stellt der traditionelle österreichische Bootsbauer SUEK GmbH einen solaren Katamaran für bis zu 58 Personen vor, der für touristische Fahrten auf der Donau eingesetzt wird. Die **Sonnenschein** wird später an die Saarbrückener Personenschiff GmbH verkauft. Sie ist 15 m lang, 3,9 m breit, wiegt 10 t und besitzt zwei Motoren von jeweils 6 kW, die von einem Solardach mit einer Leistung von 5 kW versorgt werden.



*Sonnenschein*

Eine der größten Werften für Solarschiffe ist die Kopf Solarschiff GmbH in Sulz am Neckar. Das Unternehmen war bereits 1975 in die Solartechnik eingestiegen. 1995 beginnt man in Kooperation mit der Universität Stuttgart und dem Designer Christoph Behling mit der Entwicklung eines Solarkatamarans, und im Jahr 2000 sind schon fünf Modelle im Angebot.

Eines ist die 22 m langen **RA 66**, die schon 50 Personen nebst 20 Fahrrädern Platz bietet. Sie ist auf dem Maschsee in Hannover im Einsatz.



*RA 66*

Ein besonders schönes Schiff der Firma KOPF ist die **Alstersonne** in Hamburg, die für Rundfahrten und Feste genutzt wird. Ihr mit Solarzellen bestücktes gewölbtes Dach, das den gesamten Innenraum umschließt, sieht aus wie eine Konzeptstudie für den Jahre später gebauten Lehrter Bahnhof in Berlin. Die **RA 82 Alstersonne** gilt im



*RA 82 Alstersonne*

Jahr 2000 als das weltweit größte Solarschiff mit fast 26,5 m Länge, 5,27 m Breite, 34 t Gewicht und einer Kapazität von 100 Passagieren. Das Schiff erreicht allein durch die Sonneneinstrahlung eine Geschwindigkeit von 5 km/h. Soll es schneller fahren (bis 15 km/h), werden die beiden jeweils 12 kW starken Elektromotoren aus 80 Bleiakkus gespeist. Die Reichweite ohne Sonne beträgt 120 km, mit Sonne und bei einer Geschwindigkeit von 5 km/h ist sie unbegrenzt.



*RA 66 Innenraum*





*Solar Sailor*

Platz für 100 Passagiere und nutzt auch die Windenergie. Sehr speziell sind die beidseitig wie Flügel ausklappbaren Solarpaneele.

Im Juli **2001** wird der solar-elektrisch angetriebene und von der Ingenieurgemeinschaft SolarCat gebaute Großraumkatamaran **MobiCat** vom Stapel gelassen, der anschließend auf den Gewässern der Drei-Seen-Region anzutreffen ist. Das Schiff besitzt ein großzügiges Raumkonzept mit einem lichtdurchfluteten Innenteil und einem offenen Deck.

Das 33 m lange und 12 m breite Schiff hat eine Solarzellenfläche von 180 m<sup>2</sup>, sowie zwei mal 4 t Batterien und eine Motorenleistung von zwei mal 81 kW, was eine **m a x i m a l e** Geschwindigkeit von 15 km/h erlaubt. Es bietet Platz für 150 Personen und hat rund 2 Mio. Schweizer **F r a n k e n** gekostet.



*MobiCat*

Der Australier Robert Dane und sein Team setzen ihren **Solar Sailor** seit dem Jahr **2000** im Hafen von Sydney ein. Das 21 m lange Schiff hat

Ein beachtliches Design, über das die britische Presse am **13. März 2005** berichtet, hat die **Orcelle**, das erste moderne Transportschiff, das vollständig mit erneuerbaren Energien betrieben wird. Die drei großen Segel des etwa 250 m langen Schiffes, das 15 Knoten erreicht, sind gleichzeitig mit Solarzellen belegt, und es gibt eine Anlage um die Wellenenergie zu nutzen. Wasserstoff wird hergestellt, gespeichert und in Brennstoffzellen zur Stromerzeugung genutzt. Die **Orcelle** wird von dem skandinavischen Unternehmen Wallenius Wilhelmson in ihrem englischen Büro in Southampton entwickelt.

Leider soll das Schiff zum **T r a n s p o r t** von Autos aus britischer **H e r s t e l l u n g** eingesetzt werden, was im Grunde nur statthaft wäre, wenn es sich dabei um Elektrofahrzeuge handeln würde...



**Orcelle (Grafik)**

Auftraggeber des Projekts ist die International Shipping Company, die jährlich etwa 160.000 Wagen, darunter Jaguars, Land Rovers und BMWs, nach Australien, Neuseeland und in andere Länder verschifft. Was wahrlich kafkaesk ist wenn man bedenkt, wie viele Abgase diese Autos dann später produzieren werden...

Im Mai **2006** stellt Solar Sailor (s.o.) – inzwischen Name des Unternehmens in Castlecrag, Australien – das Konzept eines Hybrid-Frachtschiffes namens **Aquatanker** vor, bei dem ebenfalls umklappbare Solarsegel zum Einsatz kommen sollen. Die damit erwarteten Energieeinsparungen betragen 40 – 60 %.



**Aquatanker (Grafik)**

Es dauert jedoch noch bis zum Oktober **2008**, bis Solar Sailor meldet, daß die Technologie nun bei einem Frachter des größten chinesischen Schiffahrtunternehmens COSCO eingesetzt werden soll. Die computergesteuerten 30 m hohen Segel sollen genügend Wind einfangen um 20 – 40 % Brennstoff zu sparen, während ihre PV-Beschichtung etwa 5 % des schiffsinternen Stromverbrauchs decken soll. Die Investition soll sich innerhalb von vier Jahren amortisieren.

Bereits im Sommer **2006** kommt die **RA 46** – das neueste Solarschiff von Kopf – auf dem Serpentine Lake im königlichen Hyde Park zum Einsatz. Eigner ist die Blue Bird Boats



**RA 46**

Ltd., die im Hyde Park Boote vermietet und nun auch ein Solarschiff für Rund- und Charterfahrten einsetzt.

Der 14,30 m lange Katamaran kann bis zu 40 Passagiere befördern. Der Solargenerator liefert bis zu 2 kW an

elektrischer Leistung, was dem Schiff durch den Einsatz von zwei hochmodernen Drehstromantrieben mit insgesamt 20 kW Antriebsleistung eine Geschwindigkeit bis zu 15 km/h erlaubt.

Im März **2006** stellt Raphaël Domjan und das PlanetSolar-Team aus Neuchâtel sein Projekt vor, auf dem Seeweg in 80 Tagen um die Welt zu reisen – ausschließlich mit erneuerbarer Energie. Das als Verein organisierte Team will mit einem Solar-Trimaran eine Weltreise durch den Atlantischen, den Indischen und den Pazifischen Ozean unternehmen.

Im Oktober **2008** findet in Frankfurt eine Pressekonferenz statt, auf der das völlig veränderte, neue Design des Bootes sowie die neuesten Entwicklungen vorgestellt werden.

Das Schiff soll **Türanor PlanetSolar** heißen, der Name Türanor wurde aus der Elbensprache des J. R. R. Tolkien abgeleitet und bedeutet Kraft der Sonne oder Sieg der Sonne.

Bei der Katamaran-Konstruktion handelt es sich um einen sogenannten Wave-Piercer – die beiden Rumpfe überfahren nicht die Wellen, sondern durchschneiden sie.

Der Schiffskörper hat eine Länge von 31 Metern, eine Breite von 15 Metern und verdrängt etwa 85



**PlanetSolar (Grafik)**

Tonnen. Mit Ausnahme einer kleinen Brücke besteht fast das gesamte Deck aus Solarmodulen. Dazu kommen noch ausfahrbare Solarpaneele, die über Seilzüge steuerbord und backbord sowie am Heck hydraulisch ausgefahren werden; dadurch vergrößern sich Länge und Breite auf 35 bzw. 23 Meter. Insgesamt wird so eine Gesamtkollektorfläche

von 537 m<sup>2</sup> erreicht, bestehend aus 825 Solarmodulen mit 38.000 Photovoltaikzellen. Die Gesamtleistung der Photovoltaikanlage beträgt 93,5 kW. Der Katamaran



*PlanetSolar vor Mittelmeerküste*

wird von vier Elektromotoren angetrieben, die auf zwei Antriebswellen wirken. Die Energie für die Motoren kommt ausschließlich von den Solarmodulen. Nachts werden die Motoren von Lithium-Ionen-Akkumulatoren gespeist, die in den Schwimmern untergebracht sind. Die Akkus wiegen 11,7 Tonnen, speichern 1130 kWh und sind die größten ihrer Art. Andere Zusatzantriebe gibt es nicht. Die beiden CFK-Propeller sind doppelt so groß wie übliche Propeller und laufen mit geringer Drehzahl. Sie sind als Oberflächenantrieb montiert. Das Ruder wird nur für die Marschfahrt benötigt. Das Boot ist durch die verstellbaren Propeller und durch die Veränderung des Drehmoments der einzelnen Propeller auch bei geringster Fahrt lenkbar. Die zwei Motoren leisten insgesamt 240 Kilowatt, womit eine Marschgeschwindigkeit von 7 Knoten (13 km/h) erreicht



*PlanetSolar Blick an Deck*

wird. Zum Manövrieren im Hafen kommen zusätzlich zwei Querstromruder zum Einsatz.

Kiellegung war Anfang 2009 bei KNIERIM Individual Yachts in Kiel. Am 31. März 2010 wurde der Katamaran auf den Namen Türanor PlanetSolar getauft und in die Kieler Förde zu Wasser gelassen. Die Baukosten betragen etwa 12,5 Millionen Euro.

Am 27. Sep. 2010 verließ die MS Türanor PlanetSolar den Hafen von Monaco. 61 Tage nach der Abfahrt in Monaco hat die Türanor PlanetSolar M i a m i erreicht und mit 26 Tagen und 34 Minuten die schnellste Atlantiküberquerung eines Solarbootes durchgeführt und am 27. November 2010 im Hafen von Miami im US-Bundesstaat Florida angelegt. Als erstes Solarboot der Welt durchquert die Türanor PlanetSolar Mitte Januar 2011 den Panamakanal.



*PlanetSolar in voller Fahrt*

Am 20. Februar 2011 meldete die Türanor PlanetSolar einen weiteren Weltrekord. Mit 9.904 nautischen Meilen bzw. 18.342 km Entfernung vom Startpunkt Monaco hat das zu diesem Zeitpunkt größte Solarboot der Welt bereits die weiteste Strecke bewältigt, die je ein Fahrzeug mit Solarenergie zurück gelegt hat. Anfang April 2011 musste die Türanor PlanetSolar bei Bora Bora wegen eines Schadens am

Propellersystem die Weltumrundung für Reparaturarbeiten unterbrechen. Nach einem knapp zweiwöchigen Aufenthalt wurde die Weltumrundung in Richtung Tonga fortgesetzt. Ende Mai 2011 machte das größte Solarboot der Welt in Brisbane fest. Nach weiteren Zwischenhalten in Manila und HongKong erreicht sie Anfang Oktober Singapur. Die Weihnachtsfeiertage verbringt sie in Doha. Im März wird der Suez-Kanal bewältigt und im Mai soll im Hafen von Monaco die Weltreise geschlossen werden

Im Oktober 2007 meldet die Presse, daß das Konzept-Segelschiff **Volitan** des Designerduos Dr. Hakan Gursu & Sozum Dogan aus Ankara gleich zwei erste Preise bei dem International Design Award 2007 gewonnen hat. Ein Jahr später kommt der Green Dot Awards 2008 hinzu.



**Volitan** (Grafik)

Der Name des futuristischen Leichtbau-Boots, das Sonne und Wind gleichermaßen nutzen kann, stammt von einem fliegenden Fisch. Sollte das Schiff tatsächlich gebaut werden, würde es das ‚grünste‘ Schiff auf dem Meer sein.

Eine weitere Premiere bildet das erste Solar-Rennboot, die mit 80 kW angetriebene **Czeers Mk1** von David Czapp und Nils Beers (daher der Name) aus Delft. Das ökologisch unbedenkliche Rennboot aus Karbonfasern,

das erstmals im April 2008 präsentiert wird, ist komplett mit einer 14 m<sup>2</sup> großen Schicht Solarzellen überzogen und erreicht mit seinem Elektromotor eine Höchstgeschwindigkeit von etwa 55 km/h (ca.



*Czeers Mk1*

30 Knoten). Als Grundlage der Entwicklung diente ein Boot, mit dem die Entwickler erfolgreich am Friesischen Solarboot-Wettbewerb 2006 teilgenommen hatten. Ein Preis wird nicht mitgeteilt.

Im Juni 2008 gibt die Firma Island Pilot LLC bekannt, daß sie auf der Fort Lauderdale International Boat Show Ende Oktober das ‚weltweit erste‘ Null-Emissions-Boot vorstellen wird. Das gut 12 m lange Modell **Island Pilot DSe Hybrid 12m** ist ein Diesel/Elektro-Hybrid, dessen 20 kWh Batterien durch ein 6,8 kW Solarpaneel sowie zwei 1,5 kW Windrotoren nachgeladen werden. Mit 6 kW macht das Boot 6 Knoten, während durch das Hinzuschalten des 75 PS Diesels bis zu 13 Knoten erreicht werden können. Die Propeller werden von zwei 36 PS Elektromotoren angetrieben. Die mögliche Fahrzeit mit Sonne,

Wind und Batterie beträgt 4 Stunden. Als Preis für das auch innen luxuriös ausgestattete Doppelrumpf-Boot werden 600.000 \$ genannt.



*Island Pilot DSe Hybrid*



Im August wird in Berlin auch der nagelneue Solarkatamaran **C 60** der SolarWaterWorld AG für bis zu 60 Personen in Betrieb genommen – im Rahmen der erfolgreichen Kooperation von SolarPolis Berlin und der SolarWaterWorld. Getauft wird das Solarschiff auf den Namen **SOLON**, da der Berliner Modulhersteller SOLON SE Namenspathe des Schiffes und Lieferant des Solargenerators aus 24 Solarmodulen mit zusammen 5,16 kW Spitzenleistung ist.



*SOLON*

Der Rohbau und die Rümpfe des ca. 17 m langen und 6,60 m breiten Charterschiffes (Bautyp C60 Aquabus) werden in der Schweiz bei der MW Line Werft in Yverdon am Neuchateller See gebaut, wobei das Design der strömungsoptimierten Rümpfe von meinem Freund Thomas Meyer stammt, seines Zeichens Vorstandsvorsitzender der SolarWaterWorld AG. Der Innenausbau des Schiffes wird von der Architektin und Designerin Lika Valentini gestaltet und von der Bootsmanufaktur GmbH Berlin durchgeführt. Während der Fahrt kann die SOLON bis maximal 20 km/h beschleunigen – beim normalen Verkehr (in Berlin sind nur 12 km/h erlaubt) verbraucht das Boot mit ca. 1.600 W nicht mehr Energie als ein Toaster. Die Fahrdauer bei Sonne

ist unbegrenzt, ohne Sonne sind immerhin noch 10 h drin. Kaum weniger luxuriös ist der **Aeroyacht 121** Katamaran der New Yorker Aeroyacht International Ltd., der im Juli **2009** in den Fachblogs erscheint. Das Design stammt von Gregor Tarjan – Gründer and Leiter der Aeroyacht Ltd. – in Zusammenarbeit mit dem Team von Morrelli & Melvin. Eine der vielen Besonderheiten ist, daß das Segelschiff über ein mit einem Kran absetzbares zweisitziges, mit klappbaren Flügeln versehenes Wasserflugzeug des Typs **ICON A5**



*Aeroyacht 121*

verfügt.

Die 33,5 m langen Bootsrümpfe aus Kevlar und Carbon sind nicht nur extrem formstabil und leicht sondern auch noch kugelsicher, während das mit Solarpanelen gedeckte Dach des Aufbaus für eine weitgehende Autonomie des 13,7 m breiten und 48,2 t schweren Schiffes sorgt. Die Masthöhe beträgt 42,4 m, die Segelfläche 518 m<sup>2</sup> und der Spinnaker hat 700 m<sup>2</sup>. Natürlich gibt es auch einen Twin-Diesel an Bord... und einen Jacuzzi-Pool.

Der neue Maßstäbe setzende und etwa 70 km/h schnelle Katamaran wird nun in der Wally-Werft in Ascona gebaut, für die Konstruktion werden zwei Jahre veranschlagt. **2011** wird die Aeroyacht 121 für 16,8 Mio. € angeboten (andere



Ende Juli **2009** wird bekannt, daß die Solar Sailor Holdings Ltd. aus Sydney, die seit dem Jahr **2000** im Hafen von Sydney das 100-Personen Solarschiff **Solar Sailor** betreibt, nun sogar drei neue Solarfähren sowie ein solares Passagierschiff für Hong Kong entwickelt. Die Schiffe werden vom Hong Kong Jockey Club gekauft – im Rahmen eines mit 45 Mio. \$ ausgestatteten Projekts bei dem es darum geht, den Stadtstaat nachhaltiger zu machen. Immerhin werden die Fähren mittels ihrer starren Solarsegel im Laufe einer erwarteten 15-jährigen Lebensdauer mehr als 6 Mio. \$ Treibstoffkosten einsparen und die Kohlendioxid-Emissionen um 50 % reduzieren.



*Solar Albatross*

Der Energiebedarf, um Golfer zum Kau Sai Chau Public Golf Course zu bringen, wird zu 75 % aus der Sonne gedeckt, den Rest übernimmt ein Flüssiggas-Motor. Der Parallelhybrid-Antrieb besteht aus zwei 250 PS Cumins 6CTA 8.3M Motoren, zwei 25 kW Elektromotoren und einem 22,5 kW Generator des US-Herstellers Onan. Als Fahrtgeschwindigkeit werden 16 Knoten angegeben – nur Solar-/Windelektrisch sind immerhin noch 6 Knoten drin.

Das Design der 24 m langen und 6 m breiten Schiffe für jeweils 100 Passagiere stammt von dem australischen Büro Grahame Parker Design, gebaut werden sie auf der Leung Wan Kee Shipyard Ltd. in Hong Kong. Im Juni **2010** wird die erste Fähre im Hafen von Hong Kong in Betrieb genommen, die später den Namen **Solar Albatross** erhält.

Ebenfalls **2010** nimmt Solar Sailor gemeinsam mit der Firma Suntech während der Weltausstellung in Shanghai auch ein **SunTech Guosheng** VIP Touristenboot in Betrieb, das mit dem bislang weltweit größten Solarsegel ausgestattet ist. Das 31,5 m lange Solarboot ist auch das bislang größte Schiff, das Solar Sailor hergestellt hat.



*SunTech Guosheng*

Nach einem erfolgreichen Stapellauf im Bonner Hafen Mitte Dezember 2009 und Schiffstaufe am 26. Jan. auf den Namen Solarwave, finden die Testfahrten statt und nach der Installation aller Solarpanele und anderer Einrichtungen startet das Solarboot am 7.4. im Mondorfer Hafen bei Bonn zur ersten energieautarken Weltumrundung.

Über Frankfurt, Schweinfurt, Passau geht es über Linz weiter nach Wien, doch dann treten an den (Import-)Propellern Probleme auf, die einen weiteren ‚Landgang‘ erforderlich machen. Die neuen Propeller der Firma Kirschbaum sind von Hand nachbearbeitete Qualitätsprodukte. Außerdem wird unter jedem Rumpf ein Kiel angebaut, der dem Propeller und dem Ruder Schutz vor Treibholz und Grundberührung geben soll. Über Rumänien geht es

weiter, bis das Solarboot Anfang August das Donau-Delta erreicht. Am 18.9. kommt sie im Marmara-Meer an. Ende des Monats geht es dann weiter in die Ägäis.

Währenddessen startet im Oktober die schnelle PlanetSolar ihre solare Weltumrundung (s.u.), welche die Solarwave überholen wird – der Ansporn, die ersten zu sein, ist damit hinfällig. Es gibt aber einen wesentlichen Unterschied: PlanetSolar will die Umrundung in kürzest möglicher Zeit zurücklegen, während es das Ziel von Solarwave ist, möglichst viele Menschen direkt und unmittelbar zu erreichen und von der Machbarkeit solarer Energieversorgung zu überzeugen. Das Team beschließt daher, das nächste Jahr im Mittelmeer zu verbringen und weiter wie bisher Promotionsfahrten mit Gästen zu unternehmen.

Am 21.10 wird die Solarwave in Tholos auf der griechischen Insel Chios aus dem Wasser gehoben und befindet sich im Winterlager. Auf der Homepage des Projektes ist die Fahrt detailliert dokumentiert, und auch die Daten zur Performance dieses tollen Solarkatamarans sind ein MUSS für jedes Solarbootprojekt.

Im Frühjahr 2011 führte ihre Route quer über die Ägäis nach Athen, wo sie viele Presseterminale absolvierte. Durch den Kanal von Korinth erreichte sie das Jonische Meer. Während der Sommersaison 2011 sonnensegelte sie mit Gästen fahrplanmäßig zwischen den Jonischen Inseln, um die Funktionalität der Technik unter rauen Charterbedingungen unter Beweis zu stellen.



*Solarwave*

Insgesamt hat die Solarwave bis Oktober 2011 über 5000 Seemeilen zurückgelegt, die letzten 4.000 davon absolut autark, ausschließlich mit der Energie, die aus den an Bord befindlichen Solarpaneelen gewonnen wurde. Die Saison 2011 beendete die Solarwave in Preveza im Jonischen Meer, dort liegt sie derzeit auf Trockendock in der Marina Cleopatra im Winterlager.

Die **Black Magic** wiederum ist ein 125 m langer Solarhybrider Frachter, der seine Energie von Sonne, Wind und Wellen bezieht. Charakteristisch für viele Sauter-Entwürfe sind drehbare Starrsegel (die sich bei einigen Schiffstypen auch umklappen lassen), die gleichzeitig partiell als Solarzellenfläche dienen. Bei dem Frachter soll die 200 kW PV-Fläche 2.000 m<sup>2</sup> betragen. Der Strom wird wie üblich in Lithium-Ionen-Akkus zwischengespeichert. Andere Schiffsentwürfe tragen so malerische Namen wie **Emax Excalibur**, **Formula Zero**, **Ocean Empire**, **Transcendence** und **Super Nova**.



*Black Magic (Grafik)*

Sehr ansprechend finde ich auch den Entwurf des finnischen Industrie- und Grafikdesigners Janne Leppänen.



*ARKKI (Grafik)*

Motiviert von der Gefahr steigender Meeresspiegel stellt er im April **2010** sein Hausboot **ARKKI** (Arche) vor. Das Konzept umfaßt einen Rumpf aus Zement, der mit Kunststoff-Fasern verstärkt wird, wodurch das Boot stabil und steif genug ist, um auch die Wintersaison gut zu überstehen. Andere Teile des Bootes sind aus Naturfaser-Verbundwerkstoffen gefertigt.

Die ARKKI verfügt über einen großen offenen Raum von der Fläche eines Indoor-Basketballfeldes, wobei die Oberflächen des gewölbten Bootshauses mit Mehrschicht-Solarzellen abgedeckt sind, welche die im Boot benötigte Energie produzieren.

Am 3. Dezember **2010** wird im Hamburger Hafen die weltweit erste in Serie produzierte Solaryacht der Berliner SolarWaterWorld AG getauft, die pünktlich per Containerschiff aus Taiwan angeliefert worden war. Die 14 m lange Yacht der Baureihe **SunCat 46**, die nun **UHURA**

heißt, vereint zukunftsweisende, umweltfreundliche Technik, Luxus und elegantes Design. In Erinnerung an die Figur Lieutenant Uhura aus der Fernsehserie Raumschiff Enterprise Ende der **1960er** Jahre – eine farbige Frau in leitender Position! – soll auch die neue Luxus-Solaryacht den Geist des Fortschritts symbolisieren.

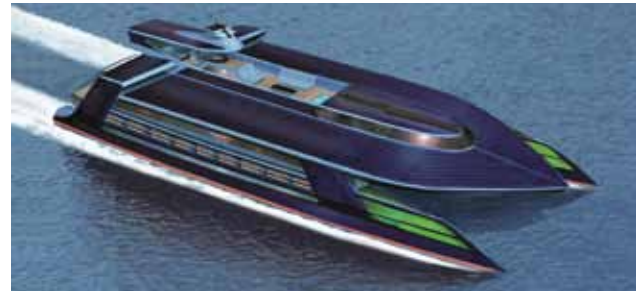
Die Yacht, die außer **S o n n e n e n e r g i e** keinen Treibstoff braucht, wird in Zusammenarbeit mit dem renommierten Yachtbauer Horizon in Taiwan gefertigt, Pläne, Technik und



*SunCat 46*

Know-how stammen aus Berlin. Ab Saisonbeginn **2011** wird die **UHURA** im Peenetal als exklusives Angebot des gleichnamigen Hotels Am Peenetal auf den Gewässern in Mecklenburg-Vorpommern zu chartern sein.

Das Jahr **2011** beginnt mit der Präsentation einer weiteren Super-Yacht des britischen Designers Richard Sauter, der uns oben bereits begegnet ist. Die 44 m lange Yacht heißt **Ocean Empire LSV** (life support vessel), ist mit einem 350 kW Daimler Turbo Compound DD16 BueTec Motor ausgestattet und wird dazu mit Hilfe von Solar-, Wind- und Wellenenergie betrieben.



*Ocean Empire LSV (Grafik)*

Die Yacht besitzt zwei hydroponische Farmen von zusammen 30 m<sup>2</sup> sowie Einrichtungen zur Angelfischerei. Die wichtigste Energiequelle ist daher die Sonne, die den hydroponischen Anlagen Licht spendet und mittels 400 m<sup>2</sup> SunPower-Solarzellen 70 kW Strom produziert. Der Wind wird mit einem automatisierten, 80 m<sup>2</sup> großen Skysail-Drachen aufgefangen (ca. 200 kW) und kann das Schiff auf eine Geschwindigkeit von bis zu 18 Knoten beschleunigen. Außerdem wird mit dieser Energie das 16 t schwere GM ESS2 Batteriesystem des Boots aufgeladen. Um die Energie der Wellen einzufangen wird ein besonderes Dämpfungssystem namens Motion-Damping-Technology (MDR) genutzt (ca. 50 kW).



*Ocean Empire LSV mit SkySail (Grafik)*

Auf der Ocean Empire LSV ist Platz für zehn Gäste und acht Crew-Mitglieder, der Preis beginnt ab 17 Mio. \$ und die Bauzeit bis zur Lieferung dauert etwa 18 Monate.

Die japanische Firma Eco Marine Power Co. Ltd. (EMP) veröffentlicht ein neues Konzept, bei dem neben der Kraft der Sonne auch die des Windes genutzt werden soll. Die (wortwörtlichen) Solarsegel sind starr und werden an beiden Längsseiten des Schiffes angebracht und fangen aufgrund ihrer Größe nicht nur die Sonnenstrahlung sondern auch den Wind ein, der so mit für den Vortrieb des Schiffes sorgt. Eine Automatik richtet das System je nach Wind und Wetter immer optimal aus und sorgt so für

eine ebenfalls optimale Energieausbeute. Die Technik ist so konzipiert, daß auch bestehende Fracht- und Tankschiffe nachrüstbar sind.



*Aquarius (Grafik)*

Das **Aquarius Wind and Solar Power System** soll Anfang **2012** als Prototyp zur Verfügung stehen und dann getestet werden. Ein Jahr später will man mit der kommerziellen Produktion beginnen. Außerdem arbeitet das Unternehmen an den Designs verschiedener Solarfähren für 50 bzw. 150 Personen, die unter den Namen Eco Solar Ferry **Medaka** und Solar HMP Ferry **Tonbo** laufen.



Ein recht hübscher Solar-Katamaran, der im März 2011 erstmals zu Wasser gelassen wird, ist der **Eco Slim** der spanischen Schiffswerft Drassanes Dalmau aus Arenys de Mar bei Barcelona. Das Design des 24 m langen und 10,5 m breiten Bootes stammt von einem Team der Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-Barcelona Tech), das Antriebssystem wird von einer Gruppe des Institute of Energy Technology (INTE) um Jordi Llorca entwickelt.



*Eco Slim (Grafik)*

Das Schiff, das zu diesem Zeitpunkt als größter ‚grüner‘ Katamaran Europas gilt, kann bis zu 150 Passagiere an Bord nehmen. Durch neue Bauweisen aus der Karosserieherstellung und eine widerstandsarme Formgebung ist es gelungen, ein besonders leichtes Schiff zu entwickeln, das auch mit weniger starken Motoren gute Fahrt machen kann.

Die eingesetzten zwei Elektromotoren sind an eine Reihe von 90 Bleibatterien



*Eco Slim*

angeschlossen, die ihren Strom wiederum aus einer großen Dach-Solaranlage aus 40 Paneelen mit monokristallinen Solarzellen, zwei Windkraftanlagen und einem Diesel-Generator beziehen. Dadurch ist das Boot in der Lage, bei einer Geschwindigkeit von 6 – 7 Knoten etwa vier Stunden lang zu navigieren. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 12 Knoten. Alternativ können die Batterien in anderthalb Stunden wieder aufgeladen werden. Um autonom arbeiten

zu können, werden sowohl die elektronische Steuerung als auch die Navigationsgeräte von einer eigenen Blei/Säure-Batterie und einer 2 kW Wasserstoff-Brennstoffzelle betrieben.

Drassanes Dalmau konstruiert die Hülle des **Eco Slim** Katamarans mit Hilfe der Marineingenieure von Isonaval, finanzielle Förderung kommt vom Centre for Industrial Technological Development (CDTI) des spanischen Ministeriums für Wissenschaft und Innovation.



*Helios Cousteau*

Im Juli 2011 wird in der spanischen nordöstlichen Provinz Zamora ein elektrisch angetriebener Katamaran in Betrieb genommen, mit dem Touristenfahrten und Studienreisen auf dem Sanabria See durchgeführt werden. Die 19 m lange und 6 m breite **Helios Cousteau** wird komplett von Solarenergie und Wind betrieben und bietet Platz für 80 Personen. Sie verfügt über 20 semi-transparente Sonnenkollektoren und vier kleine Windlader, die den gesamten Energiebedarf decken.

Da der Katamaran außerdem Teil des großen europäischen Netzwerks zur Observation der aquatischen Artenvielfalt ist, hat das Boot auch Unterwasser-Kameras die den Besuchern helfen die reiche Unterwasserwelt zu sehen.



## World Solar Challenge

Die **World Solar Challenge** gilt als das härteste Rennen für Solarfahrzeuge der Welt. Die Rennstrecke führt auf öffentlichen Straßen über rund 3.000 Kilometer quer durch Australien von Darwin im Norden nach Adelaide an der Südküste. Seit 1987 messen sich am Stuart Highway Teams aus der ganzen Welt. Die meisten kommen von Universitäten oder aus der Automobilindustrie, einige auch von Schulen.



*Karte der Reiseroute*

Wichtigstes Ziel des Wettbewerbes ist die Förderung und publikumswirksame Präsentation der Forschung und Entwicklung im Bereich von Solarfahrzeugen. Gestartet wird in verschiedenen Kategorien, wobei die Fahrzeuge Auflagen betreffend Solarpanelgröße, Minimalmasse, Batteriekapazität, Straßentauglichkeit, etc. erfüllen müssen. Das 2006 überarbeitete Rennreglement lenkt die Entwicklungen in Richtung alltagstauglicher Lösungen für den Straßenverkehr.

Geschwindigkeitsbeschränkungen im Norden von nicht mehr als 130 km/h und 110 km/h im Süden. Der aktuelle Rekord für diese Strecke wurde bei der WSC 2005 vom Nuon Solar Team der Universität Delft aufgestellt. Das Team benötigte für die Strecke 29 Stunden und 11 Minuten,

bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 102,75 km/h. Die Solarfahrzeuge sind jeweils von 8:00 bis 17:00 Uhr auf dem Stuart Highway unterwegs, über die Nacht wird das Rennen neutralisiert. Da es je nach Umgebung etwas unpraktisch ist, Punkt 17 Uhr anzuhalten, haben die Teams jeweils ab 17 Uhr zehn Minuten lang Zeit, um einen Rastplatz für die Nacht zu finden. Unmittelbar nach dem Anhalten wird das Solarpanel bis zum Eindunkeln möglichst rechtwinklig zu den eintreffenden Sonnenstrahlen ausgerichtet, damit die Fahrzeugbatterie geladen werden kann. Die Kapazität der Fahrzeugbatterie ist auf 5 kWh begrenzt und während des Rennens ist Aufladen nur über das Fahrzeugpanel erlaubt. Ein wichtiger Faktor für den Erfolg ist die Taktik zur Bestimmung der optimalen Fahrgeschwindigkeit. In die Berechnung der Sollgeschwindigkeit fließen Wetterprognosen, Neigungsprofile, Batterieladestand, etc. ein. Meist wird am Morgen und am Abend, wenn die Sonneneinstrahlung geringer ist, zusätzlich Energie aus der Batterie benötigt. Am Mittag dagegen kann bei guten Wetterbedingungen ein Teil des vom Panel gelieferten Stroms zum Aufladen der Batterie eingesetzt werden.



*Ashiya University Sky Ace V (4.Platz)*

Jedes Solarfahrzeug wird von einem Funktionär des World Solar Challenge Teams begleitet, der die Einhaltung der Regeln überwacht. Unter anderem lässt dieser das Fahrzeug am Morgen exakt so viele Minuten nach 8 Uhr starten, wie am Vorabend nach 17 Uhr noch weitergefahren wurde. In fast allen Ortschaften unterwegs wird das Rennen für 30 Minuten unterbrochen, was neben Medien- auch logistischen Zwecken dient. Während die Journalisten filmen, fotografieren und Fragen stellen, können die Teams den Fahrer wechseln, kleinere Arbeiten am Fahrzeug vornehmen und frische Nahrungsmittel besorgen. Damit nicht die leichtesten Fahrer bevorzugt werden, erhalten alle Fahrer so viel Blei mit ins Cockpit, dass sie ein Standardgewicht von 80 Kilogramm erreichen.

Der Wettbewerb fand im Oktober 2011 unter verschärften Bedingungen statt. So beeinträchtigen Buschfeuer und riesige Roadtrain-Lastwagen vielerorts das Vorankommen der Solarautos. Noch größere Probleme hat das philippinische Team, bei dessen Auto die Batterien in Brand gerieten. Zum Glück ging der Zwischenfall glimpflich aus, niemand wurde verletzt, das Team konnte das Rennen fortsetzen.

Aus Deutschland hatte sich die Hochschule Bochum mit dem Sonnenrenner SolarWorldG GT an dem Wettbewerb beteiligt. Das Besondere an dem Fahrzeug: Es wurde nicht



*SolarWorldG Gt*

speziell für das Rennen durch Australien konzipiert, sondern eher auf eine urbane Nutzung im Alltag hin gestaltet. So verfügt es über vier Räder und zwei Türen – die große Ausnahme im

Feld der Solar-World-Challenge-Teilnehmer. Es war die erste Etappe einer Weltumrundung und noch 30.000 km, vier Kontinente und zwei Äquatorüberquerungen liegen vor dem Team, bis seine Reise voraussichtlich Anfang

Dezember 2012 wieder in Australien enden wird. Das Rennen fuhr er erfolgreich mit und wurde zudem mit dem Design Award für das schönste und innovativste Solarauto ausgezeichnet. Damit ging der Award zum dritten Mal in Folge an SolarWorld und das Team in Bochum.



*Tokai Challenger (Sieger)*

Insgesamt 37 Teams starteten am 16. Oktober in Darwin, im Norden von Australien. Die 3 schnellsten erreichten am 20. Oktober, nach 2998 km das Ziel in Adelaide.

Das Fahrzeug der Tokai Universität kam um 13:07 Ortszeit als erstes ins Ziel, gefolgt von dem Solarauto Nuon von aus den Niederlanden und dem Qantum der Universität of Michigan aus den USA.



*Nuon Solar Team Nuna6 (NL)  
(2.Platz)*

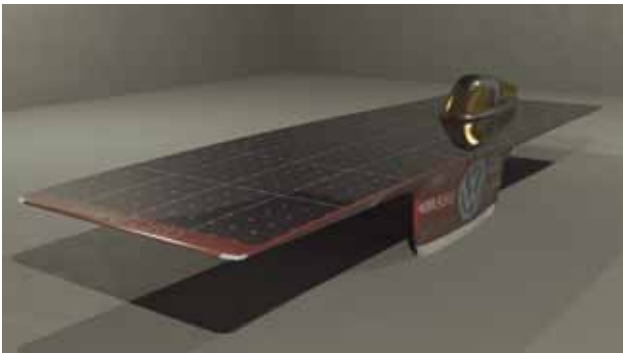
Nur 4 weitere Fahrzeuge schafften die gesamte Strecke. Damit hat der Tokai Challenger 2 quasi den Titel verteidigt, denn das Vorgängermodell hat bereits die letzte World Solar Challenge 2009

gewonnen. Das Elektroauto ist mit Panasonic HIT\*1 Solarzellen und modernsten Lithium-Ionen-Batterien ausgestattet.



*University of Michigan Qantum (3.Platz)*

Auch VW beteiligte sich, Xenith heißt das Solarfahrzeug, das ein Team aus etwa 30 Studenten im Volkswagen Automotive Innovation Lab der Stanford University entwickelt und gebaut hat. Dafür haben die Studenten rund um den Teamleiter Nathan Hall-Snyder tief in die Ingenieurs-Trickkiste gegriffen. So soll der eigens für den Antrieb konstruierte Elektromotor eine Effizienz von 98 Prozent besitzen.



*Stanford Solar Car Team Xenith (11.Platz)*

## Solarflugzeuge

Wie schon bei den Schiffen geht es in diesem Kapitel ausschließlich um **Flugzeuge mit Solarzellen** mit oder ohne Akkumulatoren vor.



*Gossamer Penguin*

Die **1971** von dem Ultraleicht-Flugzeugpionier Paul MacCready im kalifornischen Monrovia gegründete AeroVironment Inc. ist auch an der Entwicklung der nachfolgend beschriebenen Flugzeuge ‚**Solar Challenger**‘, ‚**Pathfinder**‘ und ‚**Pathfinder-Plus**‘ sowie dem ‚**Helios**‘-Prototypen beteiligt. Paul MacCready ist Gewinner der beiden Henry-Kremer-Muskelkraftflug-Preise **1977** und **1979**, als mit dem ‚**Gossamer Albatross II**‘ die Überquerung des Ärmelkanals gelingt (s. Muskelkraft).

**1980** startet mit dem ‚**Gossamer Penguin**‘ weltweit zum ersten Mal ein bemanntes Solarflugzeug. Es ist ein Umbau des zuvor nur mit Muskelkraft betriebenen ‚**Gossamer Albatross II**‘, der nun mit dem Solargenerator der ‚**Sunrise II**‘ von Astro Flight ausgerüstet wird, da dessen Designer Robert J. Boucher an dem Projekt als Berater beteiligt ist. Da der kleine Elektromotor nur 600 W Spitzenleistung

liefert, ist das Flugzeug auf den Bodeneffekt angewiesen und kann nur ca. 4 m hoch fliegen. Außerdem ist die Manövrierfähigkeit eingeschränkt, da der Solargenerator stets genau auf die Sonne ausgerichtet sein muß. Der erste batteriebetriebene Testflug erfolgt am **07.04.1980** auf dem Shafter Airport nahe Bakersfield, Kalifornien, und der erste solarbetriebene am 18.05. – Pilot ist jeweils Marshall, der 13-jährige Sohn von MacCready.

Die Erfahrungen der AeroVironment mit dem ‚Gossamer Penguin‘ fließen in die Entwicklung des ‚Solar Challenger‘ ein, der von DuPont gesponsert wird. Die Firma liefert auch für andere Solarflugzeuge fortschrittliche Materialien.

Der Erstflug des ‚Solar Challenger‘, der als erstes *richtiges Solarflugzeug* bezeichnet wird, erfolgt Ende **1980**. Er erreicht Flughöhen von mehreren tausend Metern, hat die Fähigkeit,



*Solar Challenger*

auch längere Flugstrecken zu bewältigen, und ist voll manövrierbar. Zur optimalen Leistungsanpassung wird ein Verstellpropeller eingesetzt, und die Steuerung erfolgt durch eine Gewichtsverlagerung des Piloten. Mit diesem Solarflugzeug gelingt dem Piloten Stephen R. Ptacek am **07.07.1981** die Überquerung des Ärmelkanals, wobei er in einer Zeit von 5 h : 23 min eine Strecke von 163 Meilen zurücklegt und dabei eine Flughöhe von über 3.000 m erreicht. Der Flug geht vom Corneille-en-Verin Flugplatz nördlich von Paris bis zur Manston Royal Air Force Base im Süden Londons.

Der ‚Solar Challenger‘, hat eine Spannweite von 14,8 m und eine Länge von 9,22 m. Die Startmasse beträgt aufgrund der von DuPont gelieferten superleichten Materialien nur 152,8 kg, die Zuladung bzw. der Pilot darf maximal 67,5 kg



*Solar Challenger*

wiegen. DuPont unterstützt den Bau außerdem mit 60.000 \$. Mit den von der NASA ‚geliehenen‘ 16.128 Solarzellen und einer Solar- bzw. Motorleistung von jeweils 2,7 kW erreicht das Solarflugzeug eine Fluggeschwindigkeit von bis zu 55 km/h.



*Pathfinder*

**1993** wird der Nurflügler ‚HALSOL‘ wieder entmottet und für ein kurzlebigen Projekt der Ballistic Missile Defense Organization genutzt, wobei auch einige Solarpaneele zur Unterstützung der Batterien installiert werden. Nach seiner Umbenennung in ‚Pathfinder‘ wird das Flugzeug **1994** Teil des ERAST Programms der NASA (Environmental Research Aircraft and Sensor Technology), bei dem ein sich selbststeuerndes und extrem hoch fliegendes Flugzeug entwickelt wird. **1995** wird es mit weiteren Solarzellen ausgerüstet, so daß seine 6 Motoren jetzt mit einer Leistung von 7,5 kW versorgt werden, und kommt für weitere Versuchsflüge zu Dryden zurück, wo es am 11. September eine Höhe von 50.500 Fuß erreicht – ein neuer Rekord für solarbetriebene Flugzeuge. Später erleidet es aufgrund einer Unvorsichtigkeit im Hangar einen schweren Schaden.



Im April **1997** wird die ‚**Pathfinder**‘ der U.S. Navy’s Pacific Missile Range Facility (PMRF) in Kauai auf Hawaii übergeben, da dort die klimatischen Verhältnisse als optimal betrachtet werden. Am **07.07.1997** wird mit einer Höhe von 71.530 Fuß einer neuer Rekord für Solar- als auch für Propellerflugzeuge aufgestellt.

**1998** werden die Flügel des ‚**Pathfinder**‘ von 29,5 m auf 36,3 m verlängert, außerdem werden verbesserte Motoren (insgesamt 8) sowie neue Solarzellen von SunPower installiert, die einen Wirkungsgrad von 19 % haben (zuvor 14 %). Das Flugzeug wird in ‚**Pathfinder Plus**‘



*Pathfinder plus*

umbenannt, erreicht eine Leistung von 12,5 kW und stellt im August mit einer Höhe von 80.201 Fuß einen weiteren Rekord auf.

Der ‚**Pathfinder plus**‘ des Dryden Flight Research Center der NASA ist nun ein unbemannter achtmotoriger Nurflügler, der Höhen bis zu 25.000 m erreicht, da die langsam laufenden großen Propeller für extreme Flughöhen optimiert sind. In zwei Gondeln ist Platz für Spezialekameras, Messinstrumente usw., da als Einsatzgebiete Umweltüberwachung, Höhenforschung und Relaisfunk (als preiswerte Alternative zu Satelliten) infrage kommen. Der Flieger ist 3,60 m lang, hat eine Spannweite von 36,30 m bei einer Flügeltiefe von 2,40 m. Seine Startmasse beträgt 315 kg, die maximale Zuladung 67,5 kg. Die 12,5 kW Solarleistung speisen acht 1,5 kW Motoren und erlauben eine Fluggeschwindigkeit bis zu 32 km/h. Im Sommer **2002** wird das Flugzeug bei zahlreichen Demonstrationsflügen eingesetzt, bei dem die unterschiedlichsten Fernerkundungs- und Messgeräte zum Einsatz kommen.



*Centurion*

Die Weiterentwicklung ist der Nurflügler ‚**Centurion**‘, der mit seinen 61,80 m Spannweite, 3,60 m Höhe, 14 Stück 1,5 kW Motoren und 31 kW Solarzellenleistung den Zwischenschritt zum Bau des Großflugzeugs ‚**Helios**‘ bildet, das sogar sechs Monate lang ununterbrochen in der Luft bleiben kann. Der ‚**Centurion**‘ fliegt am **10.11.1998** zum ersten mal, erreicht eine Geschwindigkeit von bis zu 33 km/h, und bei einem späteren Flug befördert er eine Test-Nutzlast von über 270 kg – mehr als halb so viel, wie er selber wiegt (529 kg). Im Laufe der 31-minütigen Flugzeit erreicht der Solarflieger eine Höhe von 120 m.

Der ‚**Centurion**‘ wird nach diversen Umbauten dann direkt in ‚**Helios-Prototyp**‘ umbenannt.

Jungfernflug des ‚**Helios**‘ ist am **8. September 1999**, anschließend beginnt Dryden mit Flugtests in niedrigen Höhen. Zwischen März und September **2000** werden auf dem auf 75,3 m Länge gewachsenen Flügel mehr als 62.000 Solarzellen aufgebracht, die in 1.770 Paneelen zusammengefaßt sind. Die Hochleistungssolarzellen mit einem Wirkungsgrad von 22 % stammen zum größten Teil von der amerikanischen Firma SunPower und kosten knapp 9 Mio. \$. Die Ingenieure hoffen, damit die NASA-Vorgabe von 100.000 Fuß erreichen zu können, wo die



Luftdichte der Dichte der Marsatmosphäre entspricht. Der flexible Flügel besteht aus Kohlefasern und Kevlar. Bis zu 14 Motoren mit jeweils 2 PS treiben das Flugzeug an.



*Helios*

Auf Anweisung der NASA beginnt AeroVironment schon **1998** mit der Entwicklung eines PEM-Brennstoffzellen-Systems für den ‚**Helios**‘, das dem Solarflugzeug eine ununterbrochene Flugdauer von sechs Monaten erlaubt. Zwischen **2001** und **2003** werden zwei Brennstoffzellen-Typen entwickelt – ein regenerativer und ein nicht-regenerativer.

Beim regenerativen Typ findet die Wasserspaltung an Bord statt und erfolgt tagsüber mittels Katalysator und Solarstrom, wobei die entstehenden Gase H<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> ins speziell entwickelten, besonders leichten Drucktanks gespeichert werden. Nachts versorgen die Gase die Brennstoffzelle, um den notwendigen Betriebs- und Versorgungsstrom zu gewährleisten. Damit gibt es im Prinzip keine zeitliche Beschränkung für die Flugdauer.

Beim nicht-regenerativen Typ mit permeabler Protonenaustausch-Membran kommt der Wasserstoff aus Tanks, während der Sauerstoff der Atmosphäre entzogen wird. Eine spätere Version funktioniert mit verflüssigtem Wasserstoff und erlaubt Nachtflugzeiten über zwei Wochen.



*Zephyr Erstflug*

Am **23. März 2006** informiert die Presse über den ersten Versuchsflug des ‚**Zephyr**‘, ein weiteres solarbetriebenes UAV für Langzeiteinsätze in größten Höhen, das eine Spannweite von 12 m und ein Gewicht von 27 kg hat. Der Flieger wurde von QinetiQ entwickelt, einem großen europäischen Technologieunternehmen, das sich primär mit Militärtechnik befasst. Auf dem Versuchsfeld der White Sands Missile Range, New Mexico, gehen zwei der Solarflugzeuge in die Luft – für 4,5 bzw. 6 Stunden – wobei eine Flughöhe von 27.000 Fuß (8,2 km) erreicht wird. Ausgelegt ist die ‚**Zephyr**‘ sogar für eine Flughöhe von 132.000 Fuß (etwa 40 km).

Das in Kohlefaser-Bauweise hergestellte UAV hat inzwischen eine Spannweite von knapp 23 m und wiegt (ohne Nutzlast) rund 45 kg. Das von Hand zu startende Flugzeug ist mit Lithium-Schwefel-Batterien der Firma SION Power Corp. ausgestattet.

Die Energie von 1 kW kommt von leichtgewichtigen Dünnschicht-Solarzellen der Firma United Solar Ovonic. Auch QinetiQ geht davon aus, daß solarbetriebene ‚Stratosphären-Plattformen‘ sehr schnell in die kommerzielle Nutzung übergehen werden, insbesondere wegen ihrer exzellenten Möglichkeiten im Bereich der Observation von Katastrophen- oder Krisengebieten.

Im November 2009 in Yuma, Arizona, weitere Versuchsflüge durch, die diesmal vom britischen Verteidigungsministerium und der Abteilung Defense Research and Engineering der US Navy finanziert werden. Ziel ist die Evaluierung potentieller Nutzlasten sowie ein durchgehender Betrieb über mehr als fünf Tage.

Der Rekordflug mit 336 Stunden und 21 Minuten im Juli 2010 fand ebenfalls in Yuma statt.



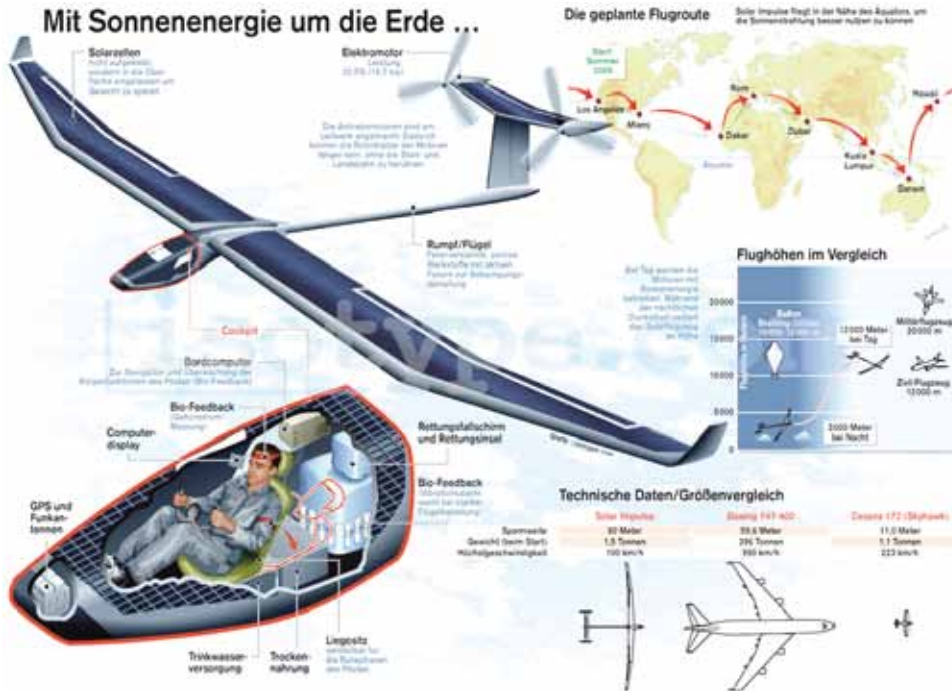
*Zephyr bei Nacht*

Im Rahmen einer Ausstellung im Berliner Kaufhaus KaDeWe Anfang August 2006 präsentiert der 48-jährige Schweizer Psychiater Bertrand Piccard gemeinsam mit dem Sponsor Omega in Person von Nicolas Hayek jr. sein Vorhaben, im Mai 2011 mit einem Solarflugzeug in rund 20 Tagen die Welt zu umrunden. Die Route führt von den Arabischen Emiraten über Indien, China, den Pazifischen Ozean und Hawaii in die USA, und von dort quer über den Atlantik nach Europa und zum Ausgangsort zurück. Da aus Gewichtsgründen nur jeweils ein Pilot an Bord sein kann, sind vier Zwischenlandungen vorgesehen, bei denen ein Pilotenwechsel stattfindet. Die einzelnen Flugabschnitte

werden drei bis vier Tage dauern.

Die **Solar Impulse** wiegt zwei Tonnen, hat eine Spannweite von 80 m, und eine Flügelfläche von 220 m<sup>2</sup>, die mit 12.000 Solarzellen bestückt werden soll. Mit den dort erzielten 40 kW Leistungsspitze erreicht das Flugzeug eine relativ niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit von 70 km/h, kann dabei jedoch gleichzeitig die Akkus aufladen, um auch nachts fliegen zu können.

Der Uhrenkonzern Omega fördert das Projekt, das einen geplanten Etat in Höhe von etwa 52 Mio. € hat, mit 15 Mio. € und technologischem Know-how. Weitere Partner sind die Sputnik Engineering



*Solar Impulse (Grafik)*

AG (SolarMax), die internationale Chemie- und Pharmagruppe SOLVAY, das Finanzierungsunternehmen ALTRAN-Gruppe und die Beratungsfirma Semper. Die erste Machbarkeitsstudie war schon **2003** an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) erstellt worden.

**2009** wird das Solarflugzeug ‚Solar Impulse‘, erstmals der



*Solar Impulse*

Öffentlichkeit vorgestellt - in einer leicht abgespeckten Testversion. Die Kennung des trotzdem noch gigantischen Fliegers lautet ‚HB-SIA‘ - er ist 21,85 m lang, 6,4 m hoch und besitzt eine Spannweite von 63,4 m, was einer Flügelfläche von 200 m<sup>2</sup> entspricht. Auf den Flügeln und dem Höhenleitwerk sind 11.628 Solarzellen der SunPower Corp. installiert, welche die 4 Stück 6 kW Elektromotoren versorgen und das Flugzeug bis zu einer Geschwindigkeit von 70 km/h beschleunigen sollen.

Die vier Lithium-Batterien zur nächtlichen Stromversorgung der Motoren, die von der Firma Air Energy aus Aachen stammen, wiegen jeweils 100 kg, während das Gesamtgewicht des Flugzeugs 1.600 kg beträgt. Die bienenwabeförmigen Einzelelemente des Fliegers bestehen aus karbonfaserverstärktem Kunststoff.

Anfang Dezember **2009** ein erster kurzer Testflug auf dem Militärflugplatz Dübendorf in der Nähe von Zürich, bei dem das Solarflugzeug etwa 1 m hoch rund 350 m weit schwebt.

Anfang **2010** führt das Institut für Aeroelastik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) am kleineren Prototypen ‚HB-SIA‘ in Zürich die abschließenden Standschwingungsversuche (Ground Vibration Tests GVT) durch, und bereits im April **2010** besteht das Solarflugzeug erfolgreich seinen 87 min. dauernden Jungfernflug vom Flughafen Payerne aus, bei dem es eine Höhe von 1.200 m erreicht. Als Pilot fungiert der Deutsche Markus Scherdel. Besonders erfreut ist das Team darüber, daß das Flugzeug bereits nach 200 m mit gerade einmal 38 km/h Bodengeschwindigkeit abgehoben hat.

Der erste Flug über Tag und Nacht (mit 26 Stunden Flugzeit) und damit auch der erste Nachtflug fand vom 7. auf den 8. Juli 2010 statt. Die Solar Impulse mit dem Piloten André Borschberg stieg dabei am Tag auf über 9000 Meter und lud dabei die Akkus.

Nach Sonnenuntergang sank sie in der Nacht zunächst ohne Motoren wieder auf 1500 Meter ab, um dann mit



*Solar Impulse*

dem Strom aus den Akkus bis zum Sonnenaufgang die Höhe zu halten (Akkuladung bei Sonnenaufgang über 40 %). Der Prototyp stellte somit neue Rekorde unter den Solarflugzeugen auf.

Im September startete der Prototyp erstmals einen Schweizer „Städteflug“ abseits eines Militärflugplatzes. Er landete auf den internationalen Flughäfen Genf, Zürich und flog über Bern und Luzern.

Der erste Europäische Flug führte im Mai 2011 von Payerne in der Schweiz über Frankreich, Deutschland, Luxemburg

nach Belgien, um in Brüssel zu landen. Dort finden einige politischen Gespräche statt, die Europäische Kommission ist Schirmherrin des Projekts. Im Juni ist die HB-SIA Spezialgast bei der Pariser Luftfahrtschau.

Für 2012/2013 sind mehrtägige Flugeinsätze geplant

Ab 2014 soll der Versuch einer Weltumrundung mit fünf Zwischenetappen gewagt werden. Das Ziel des Projekts ist, die Menschen für die Notwendigkeit des Energiesparens und der Nutzung und Förderung von Erneuerbaren Energien zu sensibilisieren. Zu diesem Zweck wird angestrebt, um die Welt zu fliegen, um entsprechende Aufmerksamkeit zu erzeugen. Der Flug wird in der Nähe des Äquators, jedoch



*Solar Impulse*

vorwiegend über der nördlichen Hemisphäre erfolgen. Fünf Zwischenlandungen sind vorgesehen. Sie dienen dazu, den Piloten zu wechseln und der Öffentlichkeit sowie den Vertretern aus Politik und Wissenschaft das Abenteuer vorzustellen. Jeder Flugabschnitt wird drei bis vier Tage dauern, die für einen einzelnen Piloten maximal erträgliche Flugdauer. Falls das Gewicht der Batterien durch verbesserte Effizienz weiter reduziert werden kann, könnte das Flugzeug zwei Piloten für Langzeitflüge aufnehmen. Auf diese Weise würde eine Non-Stop-Weltumrundung in den Bereich des Möglichen rücken.

Im April **2008** gibt die US-Firma Aurora Flight Sciences aus Manassas, Virginia, bekannt, daß sie im Rahmen des ‚Vulture‘-Programms der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) den Vertrag zur Entwicklung eines Solar-Fliegers abgeschlossen habe, der in einer Höhe von 20 km – 30 km bis zu fünf Jahre ununterbrochen in der Luft verbleiben kann.



*Vulture-Konzept (Grafik)*

Vulture steht dabei für Very-high altitude, Ultra-endurance, Loitering Theatre Unmanned Reconnaissance Element. Das System soll es dem Militär außerdem ermöglichen, Nutzlasten mit einem Gewicht bis zu 450 kg ununterbrochen mit bis zu 5 kW Leistung zu versorgen.

Das Solar/Wasserstoff-Hybridflugzeugs ‚Hy-Bird‘, wird erstmals im Mai **2008** öffentlich vorgestellt. Für den geplanten Flug rund um die Welt mit einer Reisegeschwindigkeit von 150 km/h werden 15 kW benötigt, die von einer 19 kW Brennstoffzelle geliefert werden sollen. Die zum Starten und für den Steigflug des 1,1 t wiegenden Flugzeugs benötigten Leistungsspitzen von 45 kW werden von einem Lithium-Polymer-Akku gestellt, der während des Flugs durch ein 2 kW Solarzellenpaneel auf den 20 m weiten Flügeln und dem horizontalen Teil des Leitwerks nachgeladen wird.



*Hy-Bird (Grafik)*





*Hy-Bird (Grafik)*

Das Leichtbau-Flugzeug aus Karbonfasern wird von dem französischen Unternehmen LISA Airplanes in der Nähe des Chambéry/Aix Flughafens entwickelt. Gute Werbung erhält das Projekt durch seine Präsentation in der Ende **2007** veröffentlichten und von Leonardo di Caprio mitproduzierten Öko- Dokumentation ‚The 11. Hour‘.

Im Juli **2008** beteiligt sich die Firma Trina Solar Limited an dem Projekt und sagt die Lieferung der benötigten Solarzellen zu. LISA Airplanes hat bereits verkleinerte Modelle hergestellt und plant, die Weltumrundung Ende **2009** zu beginnen, die in Etappen zu jeweils 1.500 km erfolgen soll.

Im Laufe der Jahre 2007 und 2008 wird das Konzept auf verschiedenen Messen und Ausstellungen präsentiert, woraus sich im September 2008 eine Kooperation mit der Schiffbauernfirma Danish Yacht aus Skagen ergibt.

Im Februar 2009 sichert der neue Projektpartner Trina Solar die Lieferung von 1.100 Stück monokristallinen Solarzellen für die Montage auf den Tragflächen und dem Höhenleitwerk des ‚Hy-Bird‘ zu.

Im April **2009** startet auch das bislang einzige bemannte solarbetriebenen Flugzeug der Welt, der ‚Sunseeker II‘, zu einer fliegenden Europa-Tour über acht Länder: Italien, Frankreich, Spanien, Deutschland, Schweiz, Österreich,

Ungarn und Slowenien. Das Solarflugzeug ist der Nachfolger des ‚Sunseeker I‘ (s.o.), der mit Hilfe von Günter Rochelt entwickelt wurde und bereits **1990** in 21 Flugetappen die gesamte USA überflogen hat.

In den vergangenen Jahren hat Eric Raymond das Team von SolarFlight nun die Form und fast alle Funktion verbessert, einschließlich Flügel-Modifikationen, einer Steigerung der Solarzellenfläche sowie neue Batterien, um die Leistung zu verbessern. Dabei wird auch neue Technik für die Integration der jüngsten Generation von Solarzellen in das eigentliche Tragwerk entwickelt, anstatt sie einfach auf die Oberfläche zu kleben.



*Sunseeker*

Das Flugzeug verfügt über einen einzigartigen wippenden Propeller, der Vibrationen drastisch reduziert. In den Flügeln sind 48 Zellen mit Lithium-Polymer-Batterien integriert, die von den Solarzellen in 90 Minuten voll aufgeladen werden können. Die Steuerelektronik für die Batterien und Solarzellen sind von Alan Cocconi konzipiert (s.u. Tzero Elektrofahrzeuge), während der Akku von Air Energy aus Aachen stammt.

Unter direkter Sonneneinstrahlung ist der ‚Sunseeker II‘ in der Lage, allein mit Solarenergie eine Fluggeschwindigkeit von 18 m/s zu erreichen, oder von 36 m/s (130 km/h), wenn auch die Batterien genutzt werden. Die weiteren aktuellen Spezifikationen lauten: Leergewicht 45 kg, inkl. Batterien

120 kg, Länge 7 m, Spannweite 15 m, Flügelfläche 12,8 m<sup>2</sup>, Sinkrate 0,5 m/sec, 1.152 Solarzellen auf 12 m<sup>2</sup> Fläche, Wirkungsgrad 15 %, Li-Polymer Akku 16 Ah, Elektromotor 8 kW (andere Quellen: 5,5 kW), automatischer Klapp-Propeller am Ende des Rohrrumpfes 2,6 m Durchmesser, max. Drehzahl 900 U/min.



Der Start zur Europatour erfolgt auf der AERO Friedrichshafen **2009**, wo Raymond auch einen Innovationspreis

*Sunseeker I*

erhält. Nach Überflug der Alpen erreicht das Flugzeug im Juni über der Stadt Torino eine Rekordhöhe von 20.387 Fuß (6.214 m), außerdem gibt es eine Goldmedaille der World Air Games. Nach der Überquerung von Frankreich und Spanien endet die Tour Anfang Juli in der Küstenstadt [Almeria](#).



*Sunseeker II*

Im August **2009** beginnt die Entwicklung des ‚**Sunseeker III/Solar Stemme**‘, einem zweiplätzigem Reise-Motorsegler mit Solar-Antrieb, dessen Erstflug für **2010** geplant ist. Der Motorsegler mit 23 m Spannweite wird mit einem 20 kW E-Motor, Klapp-Propeller, Lithium-Polymer-Batterien und Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 22,8 % der Firma SunPower ausgerüstet. Weiterhin beteiligt sind die Schweizer Firma Mecaplast sowie Roman Susnik und dessen Firma Apis, die den Elektromotor liefern. Der Rumpf wird mit Unterstützung der Stemme

GmbH bei der Gleiterfabrik Allstar PZL in Polen gebaut, in den Formen des High-Tech-Reisemotorseglers ‚**S10**‘. Die Gesamtherstellung erfolgt in Slowenien, wo sich Raymond inzwischen niedergelassen hat.

Der ‚**Sunseeker III**‘ ist so konzipiert, daß er als Reise-Motorsegler mit reichlich Gepäckraum und Zuladung eingesetzt und auch bei Regen im Freien geparkt werden kann. Die Liegesitze des Cockpits erlauben wechselseitiges Steuern, während einer der Partner schläft, um auch lange Flüge durchführen zu können. Die Serienherstellung soll ab **2011** beginnen, außerdem will man mit dem neuen Flugzeug an dem Berblinger Wettbewerb **2011** in Ulm teilnehmen.



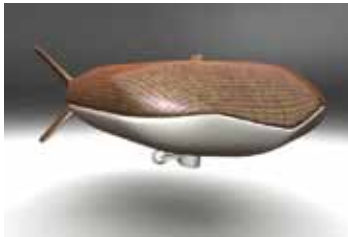
## Solar-Luftschiffe

### *Lockheed P 791*

Anfang **2006** startet das insgeheim von Lockheed-Martin gebaute experimentelle Hybrid-Luftschiff **P-791** zu ersten Testflügen auf der Palmdale Air Force Plant 42. Hybrid wird es deshalb genannt, weil es ein aerostatisches/aerodynamisches Luftschiff ist, bei dem ein Teil des Gewichts und der Nutzlast durch aerostatischen, der Rest

dunklen Kreise unterhalb des dreigliedrigen Flugkörpers sind übrigens Landekissen. Genauere Details über das Design des Luftfahrzeuges gibt das Unternehmen nicht bekannt, es scheint jedoch sehr dem Design des **SkyCat**-Luftschiffs zu ähneln, das erfolglos von der ehemaligen britischen Firma **Advanced Technologies Group Ltd.** (ATG) in Cardington entwickelt worden ist.

Interessant ist auch ein Presseartikel vom Dezember **2010**, demzufolge die StratXX unmittelbar vor der Auslieferung einer größeren Anzahl Hightech-Zeppeline in den Iran steht, wo sie als Plattformen für schwebende Mobilfunk-Antennen eingesetzt werden sollen. Im November hatte das Unternehmen mehrfach seine 15,5 m langen und 5,5 m dicken Zeppeline in den Schweizer Nachthimmel steigen lassen – zumeist zwischen 22.00 Uhr und Mitternacht. Für die Paris Air Show **2011** plant Stratxx einen großen Rollout seiner Produkte. Von der Solarenergie scheint man erst einmal weggekommen zu sein.



*Stratellite Design  
(Grafik)*

Die in Pembroke Pines, Florida, beheimatete **Sanswire Networks LLC**, eine Tochter der GlobeTel Communications Corp., stellt **2004** das Konzept eines solarbetriebenen Stratosphären-Luftschiffs vor – und hat auch gleich einen

passenden Namen dafür, den sie sich natürlich schützen läßt: Der **Stratellite** ist ein 75 m langes und starres Leichter-als-Luft Vehikel, das für den unbemannten Betrieb in Höhen bis zu 20.000 m und als Alternative zu Satelliten konstruiert werden soll. Der Antrieb soll mittels Elektromotoren erfolgen, die durch Photozellen der Firma Iowa Thin Film mit Strom versorgt werden.

Im April **2008** schlägt allerdings Darrell Campbell eine Weltumrundung mit einem solaren Luftschiff vor. Er ist der Designer des Starrschalen-Turtle Airship – und seine seit Anfang der **1980er** bestehende und folgerichtig **Turtle Airships** benannte Firma hat drei Standorte: im spanischen Valencia, im russischen Sankt Petersburg und in Santa Fe, USA. Die Internetpräsenz des Unternehmens ist allerdings äußerst bescheiden. Sehr eindeutig ist dagegen, daß Campbell ein vehementer Gegner der Blimps ist, also der unstarren Kleinluftschiffe, die zumeist für Werbezwecke gebaut werden. Und daß er auch den Einsatz seiner fliegenden Schildkröten für militärische Zwecke befürwortet.

Ansonsten gibt es seitens Turtle Airships nur wenige technische Details zu erfahren: Das 38 m lange, 29 m breite und 9 m hohe Solar-Luftschiff soll 3 - 5 Personen mit

einer Geschwindigkeit von bis zu 160 km/h transportieren können. Der Antrieb ist hybrid, zum einen sollen 45 kW aus CIG-Dünnschichtzellen kommen, mit denen die obere Hälfte Außenhaut gepflastert ist, zum anderen gibt es Brennstoffzellen sowie einen Biodiesel-Motor, der als Reservesystem einen Generator betreiben kann. Die innere Rahmenstruktur des Luftschiffs besteht aus Kohlefaser, während die gesamte Außenfläche aus zahlreichen wabenförmigen, starren Sandwichplatten aus Flugzeug-Aluminium besteht, die ebenfalls mit Kohlefasern verstärkt sind.



*Turtle Airship Design  
(Modell)*

## Photochemische Nutzung

Auf Folien gedruckte organische Solarzellen bieten gegenüber der auf Silizium basierenden Technologie eine Reihe von Vorteilen: niedrige Herstellungskosten, geringes Gewicht und große Flexibilität der Module machen sie für den Einsatz in völlig neuen Bereichen des Solarenergiemarktes interessant. Ihrer kommerziellen Nutzung stand bisher vor allem der zu geringe Wirkungsgrad entgegen.

**2004** gelingt Siemens-Forschern ein entscheidender Durchbruch im Bereich der organischen Photovoltaik: Der Wirkungsgrad von großflächig auf dünne, biegsame Folien gedruckten organischen Solarzellen kann erstmals von 3 % auf über 5 % gesteigert werden.

Die Unternehmen BASF, Bosch, Merck und Schott gründen Ende Juni **2007** die vom Bundesforschungsministerium mit 60 Mio. € unterstützte Forschungsinitiative ‚Organische Photovoltaik‘ (OPV). Die Industriepartner werden in den kommenden Jahren 300 Mio. € in die Marktreife der auf Kunststoffen basierenden organischen Kollektoren investieren, die – so dünn wie eine Klarsichthülle – gebogen, gerollt oder geknickt werden können.

Als Zielvision soll dann Mitte des nächsten Jahrzehnts der Maintower in der Bankmetropole Frankfurt zu einem Solarstromkraftwerk umgewandelt werden, in dem die 2550 Fenster mit Folien beschichtet werden. Bis dahin muss der Wirkungsgrad von derzeit 5 % auf mindestens 10 % angehoben werden und eine Haltbarkeit von mehr als 20 Jahren gesichert sein.

## Organometallische Solarzellen

An der Stanford University arbeitet man **2006** an der Entwicklung einer organometallischen Solarzelle, welche die günstigen Herstellungskosten organischer Solarzellen mit der Effizienz von Metallen kombiniert. Durch die Anwendung von Nanotechnologien soll eine konkurrenzfähige Zelle hergestellt werden.

## Silizium-Zellen (monokristallines Silizium)

Bei der Silizium-Zelle handelt es sich quasi um die heutige ‚Standard-Zelle‘. Wie bereits erwähnt erkannten drei US-Wissenschaftler **1954**, daß sich Silizium (engl. Silicon), aus dem 27,72 % der Erdkruste bestehen, als geeignetes Absorptionsmaterial für die Solarzellenherstellung anbietet. Das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) teilt Anfang **2004** mit, dass man eine 37 µm dünne kristalline Silizium-Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 20,2 % entwickelt hat. Entscheidend für das erfolgreiche Resultat ist ein am ISE entwickeltes und patentiertes Verfahren für die Rückseitenkontaktierung der Solarzelle. Diese so genannte LFC-Technik (= Laser Fired Contacts) bietet eine ideale Möglichkeit, hohes Wirkungsgradpotential mit niedrigen Herstellungskosten zu verbinden. Die sonst notwendigen teuren und langsamen Photolithographie-Schritte auf der Rückseite entfallen. In den herkömmlichen Laborprozessen müssen mit hohem Aufwand kleine Löcher in der Isolierschicht geöffnet werden, um danach die Rückseitenelektrode aus Aluminium aufzubringen. Bei der LFC-Prozessierung wird die Aluminiumschicht dagegen direkt auf die Passivierungsschicht aufgedampft, worauf mit einem Laser auf das Metall gefeuert wird, um so die lokalen Kontakte herzustellen. Dieser Prozess ist kostengünstig, materialschonend, äußerst schnell – er dauert nur eine Sekunde pro Solarzelle – und funktioniert unabhängig von Scheibendicke und -dotierung.

Diese Methode ist daher genau richtig für eine industrielle Massenfertigung. Einen Nischenmarkt für superdünne Hochleistungszellen gibt es bereits in der Luft- und Raumfahrt. Für den terrestrischen Massenmarkt



*Sphelar-Zelle*



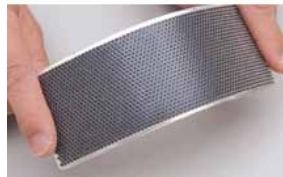
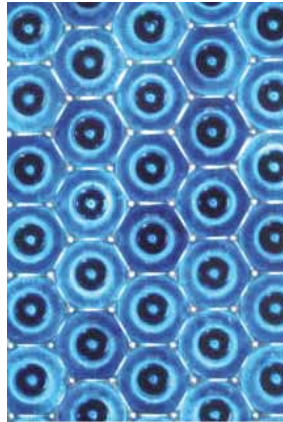
sei laut ISE allerdings noch Forschung und Entwicklung in deutlichem Umfang erforderlich, um die ultradünnen Scheiben kostengünstig herzustellen. Die Herstellung von Solarzellen auf ultradünnen Wafern wird im Rahmen eines Projekts des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU gefördert.

Seit **2002** arbeitet das japanische Unternehmen Clean Venture 21 (CV21) aus Kyoto an einer Technologie, eine neue Solarzelle aus Tausenden von winzigen Siliziumkugeln mit einem Durchmesser von 1 µm herzustellen, die von hexagonalen Aluminium-Reflektoren umgeben sind, die als Mini-Konzentratoren fungieren.

Die Kugeln selbst bestehen aus einem positiv dotierten Siliziumball, auf dessen Oberfläche eine Schicht aus negativ dotiertem CdS (s.d.) aufgebracht ist. Hinzu kommt eine weitere antireflexive Beschichtung. An ihrer Unterseite sind die Bällchen durch ein Loch in der Mitte des Reflektors mit den Elektroden der flexiblen Trägerfolie verbunden.

Mit dieser Technik sollen sich die Herstellungskosten bei gleicher Ausgangsleistung um 50 % reduzieren lassen.

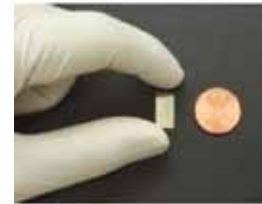
Bekannt wird diese Arbeit erst im Oktober **2007**, als die Firma die Produktion ihrer ersten 10 kW Module aufnimmt.



CV21 Solarzelle

Anfang Januar **2008** meldet die Internet-Presse, daß unabhängige Untersuchungen nachgewiesen haben, dass die Silizium-Nanopartikel, mit denen die **NanoPower Windows** von Octillion hergestellt werden, ebenso dazu genutzt werden können, die Leistung konventioneller Solarzellen im sichtbaren Bereich um bis zu 10 %, und im ultravioletten Bereich sogar um bis zu 70 % zu verbessern.

Mit 22 % brechen die **HIT solar cells** den bisherigen firmeneigenen Rekord von 21,8 %. HIT steht dabei für ‚Heterojunctin with Intrinsic Thin layer‘ – die Solarzellen besteht aus einem einzelnen dünnen Wafer aus kristallinem Silizium, der von Schichten aus ultradünem amorphem Silizium umgeben ist. Als praktische Größe für eine derartige Zelle gelten 100 cm<sup>2</sup> oder mehr. Gleichzeitig wird die Oberfläche durch winzige Unebenheiten optimiert, so dass weniger Licht reflektiert wird.



Sliver solar cell

### Sliver Solar Cells

Die Sliver solar cells werden am Centre for Sustainable Energy Systems (CSES) der Australian National University mit finanzieller Unterstützung des Energie-Dienstleisters Origin Energy entwickelt. Im Vergleich zu konventionellen monokristallinen Zellen benötigen sie nur 10 % der Menge an hochreinem Silizium, wodurch sich die Produktionskosten um bis zu 60 % senken lassen.

Dabei werden konventionelle Solarzellen von 1 mm Dicke in mehrere, nur 120 Mikrometer dünne Scheiben zersägt. Ende **2006** erzielen die ‚Zellscheiben‘, die damit schon zu den Dünnschichtzellen gezählt werden können, einen Wirkungsgrad von 20 %. Origin Energy errichtet daraufhin Produktionslinien in Adelaide und im südaustralischen Regency Park und will Mitte **2007** mit den neuen Modulen auf den Markt kommen.



*Sliver solar cell*

### **Solarzellen-Spray**

Im August 2010 meldet das norwegischen Unternehmen EnSol eine Dünnschicht-Technologie für Solarzellen entwickelt zu haben, die einfach per Sprühverfahren beispielsweise auf Fenster aufgebracht werden kann.

Dabei stellt das Unternehmen mit seiner Nanopartikel-basierten Lösung eine beachtliche Wandlungseffizienz von 20% oder mehr in Aussicht. Die angestrebte Effizienz von 20% mit Dünnschicht-Solarzellen ist nicht abwegig. Mit Hilfe von Nanopartikeln soll es möglich sein, einen Film als Spray auf Oberflächen aufzutragen.

„Der Film unterliegt nicht fundamentalen thermodynamischen Einschränkungen, die für Halbleiter-Materialien gelten. Im Prinzip sollten sehr hohe Effizienzen nur eine Frage der Weiterentwicklung sein“, meint Chris Binns, Professor für Nanotechnologie an der University of Leicester. Er arbeitet mit EnSol an der Kommerzialisierung der Technologie zusammen, die 2016 marktreif sein soll.

Dünnschicht-Solarzellen an sich sind nicht neu. „Meines Wissens nach ist dies die einzige Technologie, die auf den speziellen optischen Eigenschaften metallischer Nanopartikel beruht“, betont Binns. Diese Partikel mit Durchmessern von etwa 10 nm werden in Leicester hergestellt, um Prototypen der

EnSol-Technologie zu ermöglichen. Die Photovoltaik-Schicht könnte leicht mit gängiger Vakuum-Beschichtungstechnologie aufgebracht werden, unterstrich der Nanotechnologe. Doch EnSol zielt darauf ab, dass die neue Solarzellen-Technologie sogar als Spray und damit besonders leicht aufgetragen werden kann. „Der Film mit den Nanopartikeln könnte schon jetzt als Spray gefertigt werden. Die Herausforderung werden die Elektroden sein“, sagt Binns. Eine Beschichtung von Fensterscheiben würde jedenfalls nur zu einer leichten Tönung führen, da der Film sehr dünn ist. Zudem ist die Technologie auch für Dachziegel oder Gebäudefronten geeignet.

### **Titandisilicid-Zellen**

Am Max-Planck-Institut für Bioanorganische Chemie in Mühlheim wird Ende 2007 eine neue Solarzelle aus dem Halbleitermaterial **Titandisilicid** entwickelt, die unter Lichteinwirkung Wasser katalytisch spalten und die Reaktionsprodukte Wasserstoff und Sauerstoff außerdem auch noch speichern kann.

Anders als die bisherigen als Photokatalysatoren geeigneten Halbleitermaterialien, die schwer herzustellen und entsprechend teuer waren, eine geringe Lichtabsorption besaßen und sich teilweise während der Reaktion zersetzen, sind Silicite kostengünstig, reagieren stabil und absorbieren Licht in einem weiten Bereich des Sonnenspektrums.

Besonders interessant wird die **Titandisilicid-Zelle** durch die gleichzeitige umkehrbare Wasserstoff- und Sauerstoffspeicherung, wobei sie die Gase nur getrennt wieder freilässt. Während die Freisetzung des gespeicherten Wasserstoffs nämlich schon bei niedrigen Temperaturen erfolgt, benötigt die Freisetzung des Sauerstoffs Temperaturen über 100°C sowie Dunkelheit. Dieser wesentliche Unterschied macht die Handhabung des Zellmaterials ebenso wie die Pufferung der Reaktionsgase sicher und einfach zu handhaben.

## Transparente Zellen

Von transparenten Zellen wird erstmals **1987** berichtet, als die japanische Sanyo Electric Corporation eine amorphe, lichtdurchlässige Zelle vorstellt.

Erst **1998** wird darüber wieder geredet, als das Bundesforschungsministerium die Ergebnisse der Delphi-Studie, der größten Expertenbefragung zur Zukunft von Wissenschaft und Technik in Deutschland, bekannt gibt. Unter anderem wird dort prognostiziert, dass ab **2015** Fenster aus transparenten polymeren Solarzellen bestehen werden.

Die Dresdner Firma Solarwatt entwickelt **2003** Solarmodule, die auch in moderne Glasfassaden und Dächer integriert werden können. Die neuen, transparenten Module sind so konstruiert, dass sie genug einfallendes Tageslicht hindurch lassen, ohne zu Leistungseinbußen zu führen. Das Konstruktionsprinzip ist einfach – anstatt einer lichtabweisenden Folie wird eine Glasscheibe an die Rückseite des Moduls montiert.



*Transparente Zellen*

## Wolfram-Zellen

Eine weitere Entwicklung auf dem Sektor der Solarzellen sind die von dem IBM Watson Research Center in Yorktown Heights (USA) vorgestellten Wolfram-Filme mit schwarzer Oberfläche, die bis zu 90 % der Sonnenlicht-Photonen einfangen sollen, wobei dank des schlechten Emissionsverhaltens des Wolframs (engl.: Tungsten) selbst bei Temperaturen um die 500°C noch keinerlei Abstrahlung eintritt.

Die besondere Oberflächenstruktur des Films (Dendriten mit einem Neigungswinkel von 15°) bewirkt eine wiederholte Reflexion und dadurch eine Absorption und Speicherung. Genaue Zahlen für den Wirkungsgrad sind allerdings nicht genannt worden.

## Zink-Mangan-Tellur-Zellen

Mit einer neuen Metallegierung aus Zink, Mangan, Tellur und einer Prise Sauerstoff soll ein Zellenwirkungsgrad von über 50 % erreicht werden, geben Forscher des Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) Ende **2003** bekannt. Kin Man Yu und seine Kollegen stellen ein Material her, das zwei freie und weit voneinander entfernte Energiebänder hat. Damit können Photonen aus drei Energiebereichen des Lichtspektrums in Strom verwandelt werden, nämlich solche, die Elektronen in das erste, in das zweite oder vom ersten in das zweite Energieband befördern. Die Forscher haben berechnet, dass eine aus ihrem Material bestehende Solarzelle einen Wirkungsgrad von 45 % hätte. Variationen des Sauerstoffanteils könnten den Wirkungsgrad sogar auf über 50 % steigern.

**2006** wird bekannt gegeben, dass man mittels der atomaren Dotierung mit Sauerstoff durch einen Ionenstrahl tatsächlich einen Wirkungsgrad von 45 % erreicht hat. Das LBNL vergibt die Lizenz zur Kommerzialisierung den Mehrband-Solarzellen an die Startup-Firma RoseStreet Labs aus Phoenix, Arizona. Wann die Marktreife erreicht wird, kann allerdings noch nicht prognostiziert werden. Inzwischen redet man von Wirkungsgraden über 48 %.

## Photoelektrische Nutzung

Es fällt inzwischen zunehmend schwer die einzelnen Technologien klar voneinander zu trennen, da überall mit neuen Kreuzungen, Kombinationen und Konglomeraten der verschiedenen Materialien und Techniken experimentiert wird, aber hier ein Versuch die unterschiedlichen Arten zu erklären.

### Amorphe Zellen (polykristallines Silizium)

Eine grundlegend neue Entwicklung zeichnet sich 1977 bei den Forschungen des amerikanischen Erfinders Stanford R. Ovshinsky ab, welcher den anfänglich bevorzugten kristallinen Systemen amorphe – d.h. atomar ungeordnete Systeme – entgegensetzt. Der Absorptionseffekt ist hier – im Gegensatz zu den Silizium-Einkristallen z.B. – etwa zehnmal höher.

Amorphe Zellen haben meist eine



*Polykristalline Solarzelle*

weinrote Farbe, polykristalline schillern bläulich – und beide zeichnen sich neben den niedrigen Herstellungskosten auch durch einen geringen Materialverbrauch und durch ihre Robustheit aus. Außerdem ist das poly- oder multi-kristalline Silizium ungiftig.

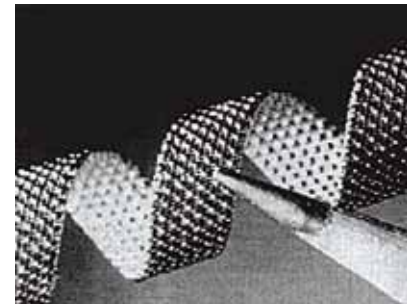
Es gibt allerdings einen Unterschied in der Herstellung **polykristalliner** oder **amorpher Zellen**: Polykristalline Schichten aus Halbleiter-Verbindungen erhält man durch Aufdampfen (Niedertemperatur-Dampfabscheidung), Amorphe Schichten bekommt man dagegen durch plasmachemische Verfahren, wie sie in der Optoelektronik

angewandt werden. Zur Standardmethode wurde hier die Zersetzung des Gases Silan ( $\text{SiH}_4$ ) mit Hilfe einer Plasmaentladung. Eine rasch zwischen zwei Kondensatorplatten schwingende Wechselspannung spaltet das Silanmolekül. Das freigesetzte Silizium schlägt sich Atomlage für Atomlage an einer der Elektroden nieder. In einer halben Stunde wächst es zu einer wenige Tausendstel Millimeter dicken Schicht heran, die etwa 10 % Wasserstoff enthält. Weitere Methoden sind die Materialabscheidung mittels Laserstrahlen und das sogenannte Heizdrahtverfahren. Wie bei einer Glühbirne erhitzt ein glühender Draht das Ausgangsmaterial auf rund  $2.000^\circ\text{C}$ , wobei es sich thermisch zu reaktiven Teilchen zersetzt.

Im Labor erreichen Zellen aus Einkristallen (s.u.) Wirkungsgrade von 22 %, aus polykristallinem Silizium 17 %, und aus amorphem Silizium mit eingestreuten Wasserstoffatomen 10 %.

Die **Dünnschichtzellen-Technologie**, die sich in diesem Bereich entwickelt hat, ist auch die Basis einer Vielzahl anderer Zellentypen mit unterschiedlichsten Stoffkombinationen, die ich nachfolgend noch im Einzelnen erwähnen werde.

Die Wacker-Chemitronic-Tochter Heliotronic bringt um **1983** erstmals das Ausgangsprodukt SILSO (Silizium Sondermaterial) auf den Markt.



*Spherical Solar Cell*





*PV-Dach auf Kyocera-Firmensitz*

Die polykristallinen Solarzellen des zwischenzeitlichen Weltmarktführers Kyocera aus Japan erreichen **1999** unter Laborbedingungen einen Wirkungsgrad von 17,1 %.

Die ab **2005** unter dem Markennamen ‚flexcell‘ angebotenen flexiblen Solarzellenfolien verbrauchen 100 mal weniger Silizium als Solarzellen aus mono- und polykristallinem Silizium. Sie sind

vom Wafermarkt unabhängig und können sehr kostengünstig hergestellt werden.

Weitere Vorteile ergeben sich aus der Flexibilität des Produkts und der damit verbundenen neuen Möglichkeiten

zur direkten Integration in Dach-elemente (Wellprofile, Flachdachpolymer-membranen, etc).

Das amerikanische Unternehmen Solar Integrated ist ein weiterer Solarpionier, der es später zur Marktführerschaft bei **flexiblen Solarzellenstoffe** gebracht hat. Die Firma



*Solarmatten  
(Solar Integrated)*



*PowerShade*

ist Spezialist für Flachdachintegrierte PV-Anlagen und hat dafür speziell laminierte amorphe Dünnschichtzellen entwickelt, die sich auf Dächern wie Matten ausrollen und verlegen lassen.

Die flexiblen Solarzellen von PowerFilm sind in dem ‚Solar Messenger Bag‘ von Fusion – sowie in der ‚Brunton SolarRoll‘, wobei letztere inzwischen sogar schon im New York Museum of Modern Art (MoMA) ausgestellt wird. Gleichzeitig arbeitet das Unternehmen aber auch mit der US-Army zusammen, als Beispiel sei hier das einem Beduinenzelt ähnelnde **PowerShade** gezeigt.

### **Cadmium-Zellen**

Als geschäftlich aussichtsreich gilt die Cadmiumsulfid (CdS) Dünnschichtzelle der US-Firma Solar Energy System, die sich in Massenproduktion sehr billig herstellen lassen soll. Allerdings ist Cadmium eine hochgiftige Substanz, was z.B. für den Weltmarktführer Siemens Solar ein Ausschlusskriterium war.

Forscher des amerikanischen National Renewable Energy Laboratory erreichten 2001 einen Wirkungsgrad bei Dünnschicht-Solarzellen aus Cadmiumtellurid von 16,4 %.



First Solar

Die 1999 gegründete Firma First Solar, Hersteller von Cadmiumtellurid (CdTe) Solarzellen, ist Ende 2007 fast der einzige Produzent auf dem Markt. Als derzeitiger Wirkungsgrad werden 10,5 % genannt.

Im Juli 2008 erzielt das ISE (Fraunhofer Institut für Solartechnik) mit 6,7 % elektrischem Wirkungsgrad einen neuen Weltrekord für Fluoreszenzkollektoren.

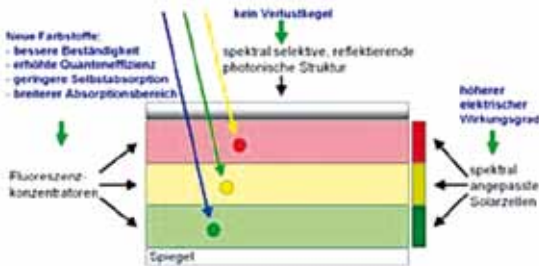
### Gallium-Zellen

Unter den Gallium-Zellen sind jene aus Galliumarsenid (GaAs) die häufigsten. Dabei ist zu beachten, daß Gallium relativ selten und daher teuer ist, und daß Arsenik eine hochgiftige Substanz ist. Galliumarsenid-Zellen haben einen theoretischen Wirkungsgrad bis 28 % und besitzen eine hohe Strahlenresistenz.

Ende 2002 finden Forscher des Lawrence Berkeley National Laboratory – in Zusammenarbeit mit der Cornell-Universität und der japanischen Ritsumeikan-Universität – ein Material für Solarzellen, das die Strahlung aus dem gesamten Tageslicht-Spektrum – von Infrarot bis Ultraviolett – in elektrische Energie umwandeln kann. Basis dieser künftigen Zellen ist eine Legierung aus Indium-Gallium-Nitrid (InGaN), welche eine Energieausbeute von 50 % ermöglichen soll. Das für Solarzellen ideale Material ist hitze- und strahlungsbeständig und läßt sich relativ günstig herstellen.

### Floureszenzlicht-Zellen

Floureszenzlicht-Zellen sind eine Entwicklung des Freiburger Instituts für Festkörpermechanik der Fraunhofer Gesellschaft, mittels derer auch diffuser und/oder indirekter Lichteinfall konzentriert ausgenutzt werden kann. Das Licht wird von den Floureszenzfarbstoff-Molekülen im Innern der gefärbten Plexiglasscheiben absorbiert, wobei ein großer Teil der Lichtenergie gleich wieder abgestrahlt wird - während der Rest innerhalb der Platte selbst aber auf die schmalen Schnittkanten hin abgelenkt und so lange hin und her reflektiert wird, bis er – stark konzentriert – an den Schnittkanten austreten kann.

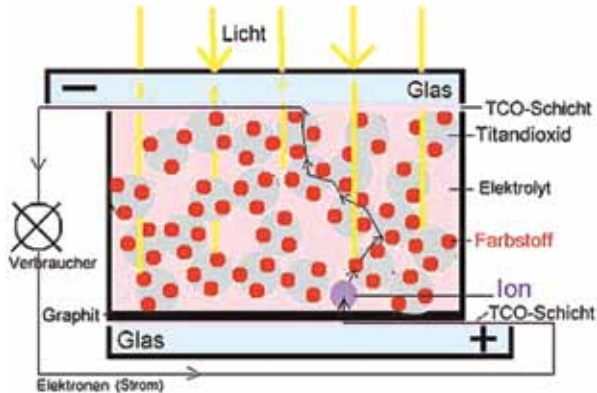


Floureszenzlicht-Zelle

Prof. Adolf Goetzberger erwähnt, daß etwa 75 % des auftreffenden Lichtes zu den Schmalseiten strömt, wo es von konventionellen Solarzellen aufgefangen und in elektrische Energie umgewandelt wird.

### Grätzel-Zellen (nanokristalline Farbstoffzellen)

Bei der Grätzel-Zelle, handelt es sich um eine Anwendungsform, die aus der Bionik stammt und somit auch elektrochemische Farbstoff-Solarzelle genannt wird. Seinen Namen erhielt die Grätzel-Zelle in Anlehnung an ihren Entdecker, den Schweizer Michael Grätzel. Dieser entwickelte das Element am Anfang der 90er Jahre und ließ das Ergebnis bereits 1992 patentieren. Das Funktionsprinzip der elektrochemischen Farbstoff-Solarzelle beruht auf einem neuartigen Verfahren, das im Gegensatz zu seinen Vorgängern zur Absorption von Licht kein Halbleitermaterial sondern organische Farbstoffe verwendet. Hier kommt beispielsweise der Blattfarbstoff Chlorophyll zur Anwendung.



*Schematischer Aufbau einer Grätzel-Zelle*

Der Aufbau der Grätzel-Zelle ist an sich so einfach wie genial. Im wesentlichen besteht das Bauteil aus zwei sogenannten planaren Glaselektroden, die auf ihrer Innenseite mit einer elektrisch leitfähigen – aber transparenten – Schicht belegt sind. Dabei werden die beiden Elektroden als Arbeits- und Gegenelektroden bezeichnet, wobei die Arbeitselektrode der Generierung von Elektronen dient. Die Arbeitselektrode wird dabei mit einer nanoporösen Lasur beschichtet. Im Gegensatz dazu erhält die Gegenelektrode eine sogenannte katalytische Schicht, wobei meistens das Material Platin verwendet wird. Der zwischen den beiden Elektroden liegende Bereich wird dagegen mit einem Redoxelektrolyten aufgefüllt.

Die Funktion der Grätzel-Zelle an sich beruht mehr oder weniger auf dem Vorgang einer sogenannten technischen Photosynthese, wobei es allerdings nach wie vor noch keine komplett erforschten und erklärten Details über diese Funktionsweise gibt. Das verwendete Redoxsystem selbst arbeitet an sich mit einer Flüssigkeit, die Elektronen transportieren kann. Des weiteren werden Farbstoffe eingesetzt, die auf den Rutheniumkomplexen beruhen. Allerdings wären für die Funktion der Grätzel-Zelle auch Brombeerextrakte oder Hibiskusextrakte geeignet. Wichtig

ist dabei, dass der verwendete Farbstoff gut auf der monomolekularen Schicht haften kann. Hier gibt es also auch für die Zukunft noch weiteres Entwicklungspotenzial.



*Dream House*

Toyota stellt bereits im März **2005** das erste Gebäude mit fassadenintegrierten Farbstoff-zellenkollektoren vor, einen Prototyp namens ‚**Dream House**‘, der neben avancierter Solartechnik auch als Präsentationsobjekt zukünftiger Hausautomation dient, die das Unternehmen ab **2010** erwartet.

Die Firma Konarka Technologies aus Lowell, Massachusetts, die ihr Produkt inzwischen farbstoffsensibilisierte Solarzelle nennt (Dye-sensitized solar cell, DSSC), unterzeichnet im August 2006 mit der Londoner Renewable Capital Ltd. ein Kooperationsabkommen zur großindustriellen Produktion seiner Power Plastic Zellen-Bänder.



*Konarkas Power Plastic*

Das Unternehmen hatte die ursprüngliche Grätzelzelle sehr stark weiterentwickelt und außerdem eine Produktionstechnologie zur preisgünstigen Herstellung konzipiert. Dabei wird eine photovoltaische Nanotechnologie genutzt, mit der winzige Partikel – 1000 mal kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haares – auf Kunststoff oder Fasermaterialien aufgebracht werden.

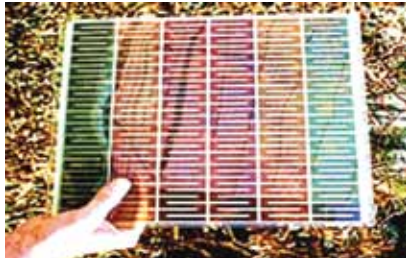
Die auf Titandioxid-Elektroden fixierten Farbstoff-Moleküle haben sich als eine sehr attraktive Zellen-Variante erwiesen, die niedrige Kosten, eine relativ einfache

Fertigung mit einem hohen Wirkungsgrad verbinden. Die 11 %, die teilweise schon erreicht werden, betreffen allerdings nur Zellen, die flüchtige organische Lösungsmittel als Elektrolyten nutzen, was ihren praktischen Einsatz durch den hohen Dampfdruck dieser Lösungsmittel sehr erschwert.

Shaik Zakeeruddin, Michael Grätzel und ihre Kollegen nutzen zur Herstellung ihrer lösemittelfreien Solarzelle eine Mischung aus zwei ionischen Flüssigkeiten als Redox-Elektrolyt in Verbindung mit einem neuartigen **Ruthenium**-basierenden Farbstoff. Ionische Flüssigkeiten haben im wesentlichen einen Dampfdruck von Null, weshalb sie selbst stabilen und schwerflüchtigen organischen Lösungsmitteln vorzuziehen sind.

Doch auch viele andere Gruppen beschäftigen sich bereits mit der Farbstoffzellen-Technologie:

Eine Kostenreduktion um 90 % gegenüber Siliziumzellen versprechen im April **2007** neuartige **grüne Farbstoffzellen** aus Neuseeland, die auch diffuses Licht gut umsetzen. Hierfür wird synthetisches Chlorophyll eingesetzt, dessen Moleküle auf einem dünnen Film aus miteinander verbundenen Titanium-Dioxid-Partikeln aufgebracht sind, die ähnlich wie Nano-Röhrchen die vom Lichteinfall auf den Farbstoff in Bewegung gesetzten Elektronen weiterleiten. Im Grunde ist es möglich, daraus auch einen Farbanstrich zu machen, der dann Strom erzeugt.



*Farbstoff-Solarzelle*

Im Mai 2007 berichten George Crabtree vom Argonne National Laboratory nahe Darien und Michael Wasielewski von der Northwestern University von einer weiteren Methode, mittels sehr einfacher Grundmaterialien eine Solarzelle

herzustellen um Wasser zu spalten und Wasserstoff zu produzieren. Auch sie benutzen dabei Titanium-Dioxid (s.u. Wasserstoff).

Bei den Farbstoff-Solarzellen als ‚weltweit führend‘ bezeichnet sich 2008 das australische Unternehmen Dyesol in Queanbeyan, in der Nähe von Canberra, das schlüsselfertige Produktionsanlagen, Prototyp- und Forschungsausrüstungen für FSZ der dritten Generation anbietet. Die Herstellungslinien stellen Farbstoffsolarzellen her, die zu Modulen bzw. Kacheln miteinander verbunden und integriert werden. Derzeit sind diese Module ockerfarben, das Unternehmen plant jedoch zukünftig Zellen auch in Farben wie grau, grün oder blau anzubieten. Die einzelnen Kacheln können in Reihe oder parallel verbunden werden und erzeugen entweder 12 oder 24 V. Auch dieses Unternehmen arbeitet an flexiblen Tarnmodulen.

Auch Prof. Arie Zaban von der israelischen Bar-Ilan University entwickelt und patentiert gemeinsam mit den Fachleuten seines Unternehmens Bar-Ilan nanotechnology eine Solarzelle, die sie im September **2007** vorstellen, und die aus wenige Nanometer durchmessenden nanodots aus Platin sowie Metalldrähten auf elektrisch leitendem Glas besteht. Diese Zellenart sei bis zu einer Fläche von 100 cm<sup>2</sup> herstellbar.

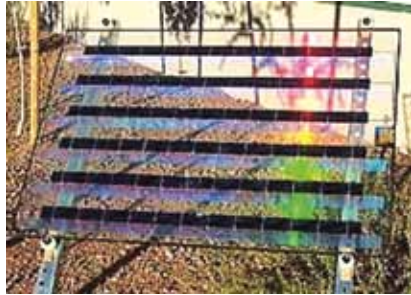


*Farbige Solarzellen  
(Fraunhofer Institut)*



## Holographische Zellen

Im April 2006 gibt die Start-up Firma Prism Solar Technologies aus Stone Ridge, New York, die Entwicklung einer holographischen Solarzelle bekannt, mit der sich die Herstellungskosten um 75 % reduzieren



*Hologramm-Zelle  
(prism solar)*

lassen, während gleichzeitig 25 – 85 % weniger Silizium benötigt wird. Damit sollten sich die Kosten für kristalline Siliziumzellen von 4 \$ pro Watt auf 1,5 \$ senken lassen.

Die flachen und teiltransparenten holographisch-optischen Elemente sind abwechselnd mit den Solarzellen selbst in Streifen angeordnet, wobei die Hologramme die nützlichen Wellenlängen des Sonnenlichtes von unten auf die Strom erzeugende Zelle konzentrieren. Die neuen Panele lassen sich nicht nur auf dem Dach installieren, sondern können ebenso in Fenstern und Glastüren integriert werden.

## Kupfer-Indium-Diselenid

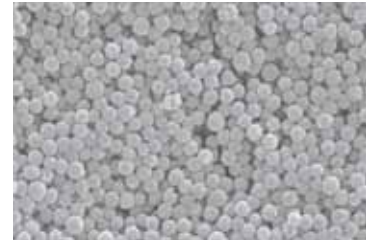
Im Rahmen eines vier Jahre laufenden Projektes werden ab April 2008 Experten der britischen Durham University verschiedene lichtabsorbierende Materialien untersuchen, die sich für die Dünnschicht-Technologie nutzen lassen, darunter Kupfer-Indium-Diselenid sowie Cadmiumtellurid (s.d.).

Das PV-21 Projekt wird im Rahmen der ‚SUPERGEN Initiative‘ vom Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) mit 6,3 Mio. englische Pfund gefördert. Das Team arbeitet außerdem daran das Wachstum des Materials direkt zu beeinflussen, um damit kontinuierliche Strukturen formen zu können.

## Kupfer-Indium-Gallium-Selen-Zellen

Das texanische Start-Up-Unternehmen HelioVolt aus Austin plant 2006 Solarhäuser der nächsten Generation, bei denen die Außenhaut die Selbstversorgung der Häuser mit Energie sicherstellt. Dabei sollen die kostengünstigen CIGS-Dünnschichtsolarzellen (= Copper Indium Germanium Selenium;entsprechend Kupfer, Indium, Gallium und Selen) direkt in die Baustoffe der Mauern und Dächer integriert werden und so die Kosten drastisch senken.

Die Firma NanoSolar Inc. in Palo Alto nutzt eine Technologie, bei der solarsensitives Material – eine Art Tinte aus Nanopartikeln – auf Folien aufgedruckt wird, womit auch auf die teuren, auf



*Nanopartikel*

Vakuum basierenden Methoden verzichtet werden kann. Technisch gesehen besteht die NanoSolar-Zelle aus einer Schicht Aluminiumfolie, auf der als Elektrode einer Molybdän-Schicht aufgebracht ist, anschließend folgt die strahlenabsorbierende CIGS-Beschichtung. Über diese wird dann eine Schicht aus nicht lichtsensitivem Halbleitermaterial gelegt, das als P/N-Anschluß dient. Abschließend kommt eine transparente Schicht aus Zinkoxid darüber.

Nanosolar erklärt, sein Herstellungsverfahren basiere auf der Nutzung von Maschinen aus der Druckindustrie, um mit Hochgeschwindigkeit Solar-Folie herzustellen.



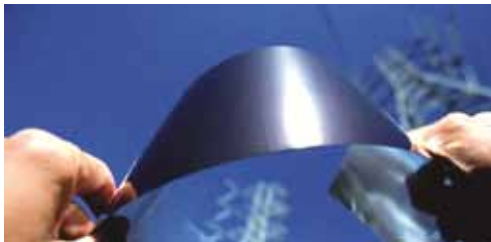
*Nanosolar Druckmaschine*

Das spare teurere Ausrüstung, wie sie bei der Vakuum-Beschichtung benötigt wird. Mit diesen Verfahren produziert Nanosolar 160- bis 200-Watt-Dünnschichtmodule für den Großeinsatz. Sie liefern mit sechs Ampère sehr starken Strom, ermöglichen Solar-Generatoren von bis zu 64 Metern und benötigen weniger Verkabelung pro Generator.



Im Dezember 2007 beginnt NanoSolar mit der Produktion und dem Verkauf seiner CIGS-Zellen und bietet diese tatsächlich zu dem weltweit konkurrenzlosen Preis von nur 0,99 US-\$ pro Watt an. Die Herstellungskosten sollen etwa bei 0,30 US-\$ pro Watt liegen. Bereits jetzt ist die Produktion bis Mitte 2009 schon ausverkauft, und das Unternehmen arbeitet fieberhaft daran, die Herstellungskapazitäten für sein ‚Nanosolar Utility Panel‘ auszubauen.

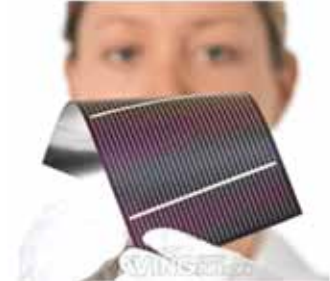
Nanosolar rechnet bis 2012 außerdem mit einer Erhöhung des Modulwirkungsgrads von gegenwärtig 10 - 11 Prozent auf bis zu 12 Prozent. Das Unternehmen ist derzeit nach eigenen Angaben Spitzenreiter mit seinen gedruckten Solarzellen, die unter Laborbedingungen einen auf die Gesamtfläche bezogenen Wirkungsgrad von 15,3 Prozent haben.



*NanoSolar Folie*

HelioVolt gibt Anfang 2006 sein Ziel bekannt, weitgehend energieautonome ‚power buildings‘ entwickeln zu wollen, bei denen die CIGS-Technologie bereits integrierter Bestandteil der einzelnen Bauelemente ist, wie zum Beispiel Metaldächer, Dachfenster, Glasscheiben und sogar Wände.

Am 23. Oktober 2008 berichtet HelioVolt, dass sie gemeinsam mit dem National Renewable Energy Laboratory des U.S.-Ministeriums für Energie (NREL; Golden, Colorado) vom R&D-Magazin mit dem Editor's



Choice Award for Most Revolutionary Technology ausgezeichnet wurde. Den Preis erhielten NREL und HelioVolt zusätzlich zu dem vormals vergebenen R&D 100 Award, er würdigt die gemeinsam erzielten Fortschritte bei der Entwicklung eines einfacheren und schnelleren Druckverfahrens für Dünnschicht-Solarzellen. NREL's Beschichtungstechnologie per Tintenstrahl-Druck und der „FASST“-Druckprozess von HelioVolt wurden entwickelt, um zu einer Kostensenkung der Solarstromproduktion beizutragen. Im November 2011 gibt die Firma Heliovolt bekannt mit einer koreanischen Firma ein 50M\$ Kooperationsgeschäft eingegangen zu sein.

Anfang 2007 wird die Schweizer Firma Flisom gegründet, die bis Ende 2009 ebenfalls mit kommerziellen CIGS-Zellen (CuInGaSe<sub>2</sub>) auf den Markt kommen will. In fünf Jahren soll ein Preis von 0,80 US \$, in 10 Jahren sogar von nur 0,50 US \$ pro installiertem Watt erreicht werden.



*Produktion bei Flisom*

## Kupfer-Indium-Gallium-Schwefel-Selen (CIGSSe)

Im Februar 2006 wird über den Durchbruch eines südafrikanischen Wissenschaftlerteams um Prof. Vivian Alberts an der Universität von Johannesburg berichtet, das nach gut 10 Jahren Forschungsarbeit eine neue, hocheffiziente und sehr preisgünstige Solarzellen-Dünnschichttechnologie entwickelt und weltweit patentiert hat. Ein besonderer Vorteil der neuen Technik ist, daß sie besonders gut auch diffuses Licht in elektrische Energie umwandeln kann.

Das Licht wird dabei durch eine dünne CIGSSe-Schicht, die nur 3 µm dick ist (etwa halb so dünn wie ein menschliches Haar), in Strom umwandelt. Dadurch läßt sich diese Schicht auch auf flexible Oberflächen auftragen, was eine ganze Anzahl neuer Anwendungsbereiche eröffnet.

Die Lizenz für die CIGSSe-Zellen hatte bereits im August 2005 die damals neu gegründete Firma Johanna Solar Technology (JST) GmbH erworben – an der auch die deutsche Firma IFE Solar Systems beteiligt ist, die ca. 50 Mio. € in die südafrikanische Erfindung investiert.

Das Unternehmen baut 2007 mit einer Bundesbürgschaft von rund 70 Mio. € in Brandenburg an der Havel die weltweit größte Fertigungsstätte für CIS-Dünnschicht-Solarmodule mit einer jährlichen Fertigungskapazität von 30 MW. Im November 2008 beginnt die Serienproduktion.



*Modul von  
Johanna Solar*

Erster und wichtigster Vertriebspartner ist die aleo solar AG, die bis zu 80 % der Module abnehmen und unter dem Namen „aleo“ vermarkten wird. 2009 übernimmt die Bosch-Gruppe die Mehrheit an dem Solarmodulhersteller Aleo Solar AG und 60% der Aktien von Johanna Solar. Im August wird der Firmennamen in Bosch Solar CISTech GmbH geändert.



*Firmensitz von JohannaSolar in Brandenburg*

## Kupfer-Indium-Selenid-Zellen

Eine Kombination von Kupfer-Indium-Selenid ( $\text{CuInSe}_2$ ) und Cadmiumsulfid wird bereits 1980 erfolgreich bei Boeing getestet. Die beiden aufgedampften Schichten sind zusammen nur fünf Tausendstel Millimeter dick und erreichen einen Wirkungsgrad von 9,4 %.

Seit 1983 forscht Prof. Klaus Bachmann am Berliner Hahn-Meitner-Institut an Kupfer-Indium-Selenid-Zellen (= Kupfer-Indium-Disulfid, o. Diselenid), die einen Wirkungsgrad von 9,5 % erreichen und ein sehr gutes Langzeitverhalten zeigen. Sie kommen ohne die giftige Cadmiumsulfid-Schicht aus, statt dessen wird das unbedenkliche Zinkselenid genutzt. 1993 wird mit den **CIS-Zellen** ein Wirkungsgrad von 10,2 % erreicht, und 1998 ist man schon bei 13,7 % angekommen.

Ähnliche Versuche gibt es auch an der Universität Stuttgart, wo man das  $\text{CuInSe}_2$  ebenfalls wegen seiner Ungiftigkeit bevorzugt. Man hat dort mit den CIS-Zellen bereits Wirkungsgrade bis 20 % erreicht.

1996 werden im Stuttgarter Zentrum für Sonnenenergie-

und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Dünnschicht-Zellen von 30 mal 30 Zentimetern hergestellt – mit einem Wirkungsgrad von 10 %. Und **1998** erreichen die Zellen des ZWS bereits einen Wirkungsgrad von fast 12 %.

**1999** wird in der Nähe von Stuttgart das Unternehmen Würth Solar gegründet. Noch im gleichen Jahr baut sie im Energie- und Technologiepark Marbach eine Solarfabrik mit einer Kapazität von 10 MW, die Investitionskosten der ersten Pilotphase liegen bei 15 Mio. DM. Hergestellt werden CIS-Dünnschichtzellen mit einer Dicke von 2 µm, wobei als neuer und kostensparender Produktionsschritt die genutzten Materialien Kupfer, Indium, Gallium und Selen unter hochreinen Vakuumbedingungen bei 500°C gleichzeitig verdampfen, und nicht wie zuvor üblich in mehreren Schichten des Aufbringens und Legierens zusammengesetzt werden. Die Elemente haften dabei auf einer Glasplatte, die zuvor mit dem Metall Molybdän beschichtet wurde. Nach dem Auftragen einer durchsichtigen Kontaktschicht aus Zinkoxid werden die elektrischen Kontakte aufgebracht und das CIS-Modul zwischen zwei Glasplatten gepackt.

Im Rahmen eines vom Bundesumweltministerium (BMU) geförderten Forschungsprojektes wird am ZSW eine ganz neue Herstellungsmethode entwickelt, CISROLL. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem eine Polymer- oder Metallfolie von einer Rolle abgewickelt, verschiedene Beschichtungs-, Fertigungs- und Kontrollschritte durchläuft, und dann am Ende der Anlage als fertige Solarzelle wieder auf eine Rolle aufgewickelt wird. Für diese Zellen reichen vier Schichten von insgesamt 4 tausendstel Millimetern Dicke aus, die auf Trägerplatten aufgedampft werden. Sie erreichen derzeit einen Wirkungsgrad von zwischen 11% und 12%. Am **27. Oktober 2006** nimmt Würth Solar in Schwäbisch Hall die weltweit erste Serienproduktion von CIS-Solarmodulen auf, ab **2007** soll die Produktion eine Jahreskapazität von ca. 15 MW erreichen, entsprechend 200.000 Modulen.

## Lumeloid-Zellen

Lumeloid ist ein Polymer-Kunststoff-Film, ein organischer Halbleiter mit dem seit Mitte der 1980er bei der Phototherm Incorporated in Amherst (New Hampshire/ USA) experimentiert wird. Das damit beschäftigte Wissenschaftler-Brüderpaar Alvin und Mortimer Marks beziffert den theoretischen Wirkungsgrad von Lumeloid mit 80 %, allerdings beträgt die Lebensdauer bislang maximal ein Jahr. Bei der Lumeloid-Zelle wird die eintreffende Photonenenergie durch ein Polarisationsprinzip organisiert und dann in elektrischen Strom umgewandelt. Dabei werden mikroskopisch kleine Strukturen eingesetzt, die so ähnlich wie Antennen wirken. Die ungiftige Herstellung des Dünnschichtfilms von 8 Mikrometern mitsamt seinen integrierten molekularen Dioden ist sehr günstig, und das Produkt soll einen Wirkungsgrad von 72 % erreichen!

Whitley Strieber behauptet in einem seiner Bücher, daß das Material jedoch klassifiziert wurde, da es für militärische Satelliten eingesetzt werden sollte. Es sei klar gewesen, daß man während des kalten Krieges auch alle diesbezüglichen Informationen so weit wie möglich zurückhielt.

In einer Meldung vom September 2000 wird davon gesprochen, daß die Zelle bereits im nächsten Jahr auf den Markt kommen kann, doch dann hört man erst wieder 2003 von dieser Technologie, mit der sich nun die Firma Polarized Solar Electric Co. aus Midlothian, Virginia, beschäftigen soll, die allerdings keine Internetpräsenz zu besitzen scheint. Es mutet seltsam an, daß eine dermaßen effektive Technologie, und sogar die Information darüber, so gut wie vollständig aus der Öffentlichkeit verschwunden ist – während sie im militärischen Bereich inzwischen möglicherweise schon längst genutzt wird (?). Mehrere Artikel, auf die in einem der wenigen Berichte hingewiesen wird, sind jedenfalls nicht zu finden, auch der angegebene Link auf die Website von Dr. Marks führt ins Leere.



## Lepcon-Zellen

Neben der Lumeloid-Zelle läßt sich Marks 1988 auch eine Lepcon-Zelle patentieren. Hierbei handelt es sich um ein vorläufiges Desing – bei dem ein Geflecht aus Millionen von Kupfer- oder Aluminiumstreifen, die nur ein Tausendstel Millimeter breit sind, auf Glas als Trägermaterial aufgetragen wird (während die Lumeloid-Zelle aus Plastik besteht).

In beiden Fällen wird der Effekt der Photosynthese nachgeahmt, wobei eine serielle-parallele Schaltung umgesetzt wird, bei dem das Licht nach zwei Vektoren ausgerichtet wird: Der erste elektrische Vektor verläuft parallel zur Netzwerk-Achse und absorbiert seinen Lichtanteil vollständig, während die zweite Achse senkrecht dazu steht und das Licht als polarisiertes Licht weiterleitet, ebenfalls ohne Abstriche. Daher wird auch von einer theoretischen Effizienz von 80 % gesprochen – 40 % durch die direkte Umwandlung und 40 % durch die Weiterleitung.

Im Fall der Lepcon-Zelle kommt noch ein weiterer interessanter Aspekt dazu: Schaltet man umgekehrt Strom auf die Zelle, dann emittiert diese Licht. Markls nannte die den ELCON-Effekt (Electricity to Light Converter). Doch auch über diesen Zellentyp war später nichts mehr zu erfahren.

## Nano-Zellen

STMicroelectronics (STM) berichtet Ende September 2003 über ein Forschungsprojekt, das bis zum Ende des Jahres 2004 abgeschlossen sein soll und die Stromerzeugung mit Solarzellen schon in absehbarer Zeit rentabel werden lassen könnte. Dabei werden statt Siliziumkristallen, die durch die erforderliche hohe Reinheit die derzeit verfügbaren Solarzellen preislich wenig attraktiv machen, neue Materialien eingesetzt. Derzeit werden zwei unterschiedliche Wege verfolgt. Der erste Ansatz basiert auf der Erfindung von Professor Grätzel (s.o.), während der zweite Weg weitgehend organische Materialien

unter Verwendung von Nanostrukturen benutzt. Das Unternehmen zielt auf eine 20-jährige Lebensdauer der Solarzellen und einen Preis pro Kilowattstunde von unter 0,20 Euro. Der angepeilte Wirkungsgrad der Zellen liegt zwar mit 10 % deutlich unterhalb dem hochwertiger Silizium-Solarzellen, aufgrund der wesentlich niedrigeren Herstellungskosten würde dieser Nachteil allerdings mehr als wettgemacht.

Die Vorstellung, daß Solarzellen aus Plastik eines Tages bis zu fünfmal effizienter sein werden als die heutigen Technologien, ist nicht mehr abwegig, nachdem es Wissenschaftlern der University of Toronto um Prof. Ted Sargent Anfang 2005 gelingt, mittels **Nanopartikeln** (quantum dots) das entsprechende Polymer-Material so zu verändern, daß es erstmals auch die Infrarotstrahlung der Sonne in Strom umwandeln kann. Die Substanz läßt sich wie Fabe auf Trägermaterialien aufsprühen, die Lackierung eines Fahrzeugs beispielsweise kann dadurch gleichzeitig die Batterie nachladen.

Die Infrarotzelle ist allerdings nicht auf die Sonne angewiesen, sondern kann Wärmestrahlung auch aus jeder anderen Quelle nutzen, zum Beispiel von Menschen oder Tieren. Als potentieller Wirkungsgrad werden bis zu 30 % angegeben.

Ghim Wei Ho und seine Kollegen von der University Cambridge experimentieren seit 2006 ebenfalls mit der Entwicklung neuer Materialien. Für ihren Versuch tropfen sie das flüssige Metall Gallium, das in Verbindungen zur Herstellung von Leuchtdioden und Transistoren dient, auf eine Silizium-Oberfläche. Das Ganze wird mit einem Methan enthaltenden Gas bedampft und kondensiert dann in Form von Nanodrähten aus Siliziumkarbid mit einem Durchmesser von weniger als einem Tausendstel eines menschlichen Haares.

Das Verfahren nennt sich chemische Abscheidung aus der Gasphase (Chemical Vapor Deposition). Durch Veränderung des Druckes und der Temperatur kann

der Wachstumsprozess der feinen Drähtchen beeinflusst werden und es entstehen verschiedene neue Strukturen und Formen, die auch praktische Anwendungsmöglichkeiten für Nanomaterialien bergen, u.a. als Grundlage für einen neuen Typ von Solarzelle.

Denn alle heutigen Solarzellen liefern maximal ein angeregtes Elektron pro eingefangenen Photon. Ihr Prinzip beruht darauf, daß ein eintreffendes Photon den sogenannten Bandabstand überwindet, also den Energieabstand im Halbleiter zwischen einem im Kristall fixierten und einem frei beweglichen Elektron.

Doch schon 1982 entdeckt der Materialwissenschaftler Alexander Efros am Naval Research Laboratory in Washington DC die theoretische Möglichkeit, daß ein Photon auch mehrere Ladungsträger freisetzen konnte. Zwei Jahrzehnte stetiger Verbesserungen an den sogenannten Halbleiter-Nanokristallen (oder auch Quantum Dots) sind notwendig, bis der physikalische Chemiker Arthur Nozik vom NREL 2002 voraussagen kann, daß Nanokristalle gegenüber massiven Halbleitern tatsächlich im Vorteil sind. Als Grund hierfür verweist er darauf, daß sich in Nanostrukturen die Physik verändert, und in vier bis acht Nanometer großen halbleitenden Bleiselenid-Nanokristallen bis zu sieben (!) energiegeladene Ladungsträger pro eintreffendem Photon entstehen, statt nur einem.

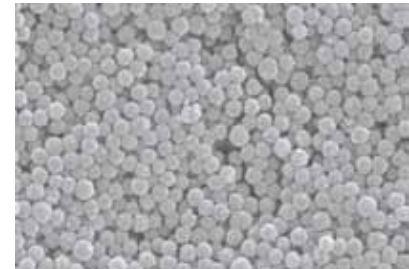
Es dauert dann bis 2004, als der Physiker Victor Klimov, der in Los Alamos arbeitet, endlich belegen kann, daß derartiges Verhalten auch reproduzierbar und nachweisbar ist, was 2006 von einer Forschergruppe am National Renewable Energy Laboratory (NREL) bestätigt wird. Nun will Klimov durch Miniaturisierung der Solarzellen auf wenige Nanometer – was durch die Chipherstellung mittlerweile durchaus realisierbare Technik ist – die Effizienz auf mindestens zwei, theoretisch aber sogar bis zu sieben Elektronen pro eintreffendem Photon erhöhen.

Sollte die praktische Umsetzung in Großserien gelingen,

könnte diese Verbesserung tatsächlich die Effizienz der photoelektrischen Stromerzeugung deutlich erhöhen und den Solarstrom preislich konkurrenzfähig machen.

An der australischen University of New South Wales in Sydney wird Ende **2006** in der Weiterentwicklung von Silizium-Zellen gearbeitet. Prof. Martin Green, der sich schon seit über 20 Jahren mit Optimierungsschritten wie dem lasergestützten Eingravieren von V-Ritzen in Solarzellen beschäftigt, stellt eine Mehrschicht-Zelle vor, bei der die **Quantendotierung** Wellenlängen zwischen 1.100 nm (Infrarotlicht) bis zu 600 nm (rotes Licht) absorbieren kann.

Während die oberen Schichten mit den kleinsten dots die kürzesten Wellenlängen absorbieren, steigert sich mit der Größe der dots auch die Länge der Wellen,



*Nanodots*

die in Strom umgewandelt werden. Die Zelle von Green besteht zu diesem Zeitpunkt aus drei Schichten.

Die Technologie der **Quantenpunktmaterialien** („quantum dots“) geht auf die Chemikerin Pamela Shapiro und ihr Team an der University of Idaho im Jahr **2006** zurück, wo eine CIS-Zelle entsprechend modifiziert wird, um die sonst überschüssige Abwärme ebenfalls in Strom umzuwandeln. Am National Renewable Energy Laboratory (NREL) in Golden, Colorado, wird Mitte **2007** in Zusammenarbeit mit der Firma Innovalight Inc. intensiv an der Weiterentwicklung von Materialien gearbeitet, welche die Effektivität von Solarzellen drastisch erhöhen könnten. Bei diesen Quantenpunktmaterialien handelt es sich um **Nanokristalle** aus Silizium, die im Gegensatz zu anderen Materialien den Vorteil haben, daß für jedes eindringende

Photon des hochenergetischen Sonnenlichtes nicht nur ein, sondern zwei oder sogar drei Elektronen produziert werden. Und während sich in den meisten Solarzellentypen die Energie des blauen und ultravioletten Bereichs des Spektrums in nutzlose Abwärme umwandelt, sind die Nanokristalle in der Lage, neue quantenmechanische Effekte zu nutzen, um auch diese Energie in Elektronen umzuwandeln. Damit können sich Wirkungsgrade bis zu 40 % erreichen lassen, durch den Einsatz von Konzentratoren sogar bis zu 60 %. Außerdem sei die Technologie, die als **mehrfache Exzitonerzeugung** (MEG – Multiple Exciton Generation) bezeichnet wird, wesentlich preisgünstiger als die anderen. Hinzu kommt, daß hier auch keine giftigen Substanzen wie Blei oder Cadmium benutzt werden, ebenso wenig seltene Materialien wie zum Beispiel Indium. An den weiteren Arbeiten zur Umsetzung dieser Technologie beteiligen sich auch Elektro- und Computingingenieure der University of Delaware.

Die Entwicklungen im Bereich der Nanotechnologie schreiten inzwischen sehr schnell voran und sind auch vielversprechend. Aus diesem Grunde gibt es noch diverse andere Gruppen an Universitäten, Forschungsinstituten und bei Unternehmen, die sich intensiv mit der Umsetzung im Bereich neuer Solarzellen beschäftigen.

Soweit es mir möglich war habe ich diese Entwicklung verfolgt und hier dokumentiert, es ist jedoch so gut wie unmöglich einen kompletten Überblick zu erlangen – denn dies würde ein eigenes Recharteam erfordern. Die folgenden Informationen sind daher zwar knapp gehalten, nennen jedoch weitestgehend die Namen der Institutionen und der federführenden Wissenschaftler, so daß eine vertiefende Recherche in der Fachpresse und im Netz leicht möglich ist:

Dezember **2006**: Takanori Fukushima an der University of Tokyo entwickelt gemeinsam mit seinem Team **Nanokabel**, welche Licht in Strom umwandeln und in Zukunft zu Versorgung von Nano-Robotern eingesetzt werden sollen.

Die Kabel haben einen Durchmesser von 16 Nanometer und sind mehrere Mikrometer lang. Sie imitieren eine lichtempfindliche Antenne, wie einige Bakterien sie besitzen.



*Nanodraht (Harvard)*

Auf der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme ist das Ende eines **koaxialen Nanodrahtes** zu sehen.

Juli **2007**: Prof. Somenath Mitra und sein Team am New Jersey Institute of Technology (NJIT) entwickeln eine preisgünstige organische Solarzelle, die auf flexiblem Polymer-Kunststoff aufgestrichen oder aufgedruckt werden kann. Der Prozeß wird als sehr einfach beschrieben und Mitra mit den Worten zitiert: „Someday homeowners will even be able to print sheets of these solar cells with inexpensive home-based inkjet printers.“ Die am NJIT hergestellten Zellen bestehen aus einem Komplex aus Kohlenstoff-**Nanoröhrchen**, die rund 50.000 mal kleiner sind als ein menschliches Haar. Trotzdem leiten sie elektrischen Strom effizienter weiter als jeder heutige metallische Draht, ihre Leitfähigkeit ist höher als die des Kupfers. An diesen Nanoröhrchen wiederum sind sogenannte **Buckyballs** (Fullerene) angeschlossen, die ebenfalls aus Kohlenstoff hergestellt und für den Einfang der Lichtphotonen zuständig sind, so daß kleine schlangenförmige Strukturen entstehen.

Oktober **2007**: Die Arbeitsgruppe von Charles Lieber an der Harvard University stellt winzig kleine Solarzellen aus Halbleiter-**Nanoröhrchen** her. Die Röhrchen bestehen aus einem p-dotierten Kern, um den ein undotierter und eine n-dotierter Silizium-Mantel gelegt sind (PIN-Dioden).

Dezember 2007: Martin Aagesen an der Universität Kopenhagen entdeckt im Zuge seiner Doktorarbeit am Niels Bohr Institut die sogenannten **Nanoflocken** (nanoflakes), von denen angenommen wird, daß sie bis zu 30 % der Sonnenenergie in Strom umwandeln können. Diese Flocken zeichnen sich durch eine selten perfekte kristalline Struktur aus. Aagesen ist gleichzeitig Chef der SunFlake Inc. in Kopenhagen, welche die Entwicklung der neuen Solarzellen vorantreiben will.



*Nanoflocken*

Januar 2008: Wissenschaftler um Prof. Jin Zhang von der University of California in Santa Cruz demonstrieren, das geordnete Reihen von **Nanoröhrchen**, die sie auf einem Silizium-Wafer wachsen lassen, ein hoch effizientes thermo-elektrisches Verhalten zeigen. Damit lassen sich sowohl preisgünstige thermo-elektrische Systeme zur Nutzung von **Abwärme** entwickeln, als auch neue Materialien zur Solarzellenherstellung. Hier werden zwei Techniken kombiniert: die Dünnschicht-Technologie mit metallischen Nanopartikeln wie Titaniumdioxid, die mit Substanzen wie Stickstoff angereichert sind, und die stark lichtabsorbierende Quantendotierung. Bei den anschließenden Tests zeigt sich, daß die erzielte Leistung die Erwartungen noch übertroffen hat, weil beide Techniken durch ihre **Synergie** ein höheres Ergebnis erreichten als die Summe der beiden einzelnen Komponenten.

Januar 2008: Dr. Loucas Tsakalacos und seinen Nano Photovoltaics (PV) Team bei GE Global Research, der zentralen Forschungsorganisation der General Electric Company (GE), zeigen eine Dünnschicht-Solarzelle, die auf **Nanodrähtchen** basiert und das Potential für einen Wirkungsgrad von 18 % hat.

## **Optimierungs- und Verstärkungstechniken**

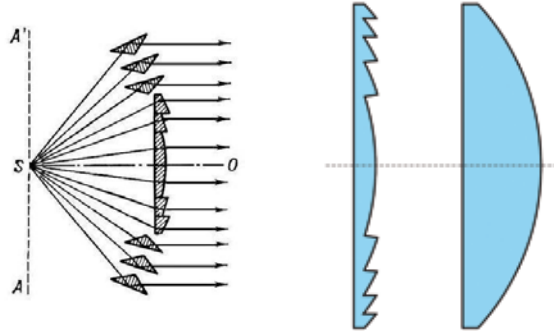
Einen der ersten und wichtigsten Schritte zur Optimierung des Energieertrags von Solarzellen bildet die **Sonnennachführung**, zu deren Umsetzung es schon früh die unterschiedlichsten Techniken und Mechaniken gab. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass durch eine einachsige Nachführung der Solarmodule der jährliche Energiegewinn um bis zu 27 %, durch eine zweiachsige Nachführung sogar um bis zu 40 % gesteigert werden kann. An zweiter Stelle sind **Spiegel** zu nennen. Einem Bericht der Forschungs- und Entwicklungsinitiative Solare Energieversorgung (FEISS) der TU-Berlin zufolge lässt sich sogar bei einfachen Siliziumzellen die Ausgangsleistung verdoppeln, wenn zusätzliche Spiegel eingesetzt werden. Ein derartiges Modul in Form einer sogenannten Solar-Furche mit seitwärts hochgeneigten Spiegelflächen muss beim Ausrichten der zu den Spiegeln parallelen Schwenkachse nach Ost-West-Richtung sogar nur einmal pro Monat um wenige Winkelgrade nachgestellt werden – womit eine teure und komplizierte mechanisierte Sonnennachführung entfallen kann.

Die Kombination dieser beiden Technologien sind die Heliostaten, also sonnennachgeführten Spiegel, die zur Umleitung von Tageslicht bzw. seiner Einleitung in Gebäude genutzt werden.

Neben Nachführungs-Systemen (Solartracker) und Spiegeln sind an dritter Stelle **Konzentratoren** zu nennen, deren bekannteste die optischen Linsen sind.

Besonders interessant sind in diesem Bereich die lichtbündelnden **Fresnel-Linsen** (oder **Fresnelsche Stufenlinsen**), die bereits in verschiedenen Systemkonfigurationen eingesetzt werden, teilweise in Kombination mit einer einachsigen Sonnennachführung. Diese Linsen gehen auf den französischen Ingenieur und Physiker **Augustin Jean Fresnel** (1788 — 1827) zurück, der mit seinen Arbeiten der Wellentheorie des





Fresnel-Linse (Prinzip)

Fresnel - Normal-Linse

Lichtes zum Durchbruch verhalf. Fresnel war es der damals nachgewiesen hat, dass Licht aus Transversalwellen besteht; ihm gelang auch die erste Wellenlängenbestimmung des Lichtes.

Der Allgemeinbegriff für diese Großkraftwerke lautet **CPV (Concentrated Photovoltaic)** oder **HCPV (High Concentration Photovoltaic)** während der Begriff **CSP (Concentrated Solar Power)** zumeist für die entsprechenden *thermischen* Kraftwerke genutzt wird.

Bereits im Mai 1978 meldet Thyl Steinemann beim Bundesamt für geistiges Eigentum in Bern das erste Patent seines Heliofol-Solkraftwerk-



Heliofol II

systems an, dessen Effizienz und Wirtschaftlichkeit von kaum einem anderen photovoltaischen Solarsystem erreicht wird. Das Heliofol-System verwendet preisgünstige Materialien, die das Sonnenlicht auf hoch belastbare Konzentratoren-Solarzellen bündeln. Diese Hochleistungszellen sind jeweils kaum

größer als ein Daumnagel (5 cm<sup>2</sup>), leisten aber bei 120facher Strahlungsverdichtung und zweiachsiger Sonnennachführung das Fünffache gegenüber einer üblichen Solarzelle in der Größe einer Handfläche (150 cm<sup>2</sup>).

Der Prototyp I besitzt etwa 150 einzelne Spiegelstreifen, die das Sonnenlicht auf einen, mit einem Glasrohr wärmeisolierten schwarzen Absorber verdichten.

**1986** beginnt Prof. Richard Swanson an der Universität von Kalifornien mit der Arbeit an **Tandemzellen**, bei denen mehrere hintereinander angeordnete Siliziumschichten mit jeweils verschiedenen Stoffen – etwa Germanium oder Kohlenstoff – legiert werden. Er erzielt damit Wirkungsgrade von 27 %, wobei bis zu 30 % als erreichbar gelten. Die nur 80 µm dicke Zelle (etwa Haardicke) empfängt fast das gesamte sichtbare Spektrum. Prof. Swanson ergänzt seine Zellen mit winzigen **Fresnel-Kunststofflinsen**, die das Licht auf die etwa 17.000 aktiven Punkte der 15 mm<sup>2</sup> großen Fläche konzentrieren.

Diese Tandemzellen werden auch **Stapelzellen** oder **Kaskadenzellen** genannt, weitere Namen sind **Sandwich-** oder **Schichtbau-Zellen**. Energiereiche Lichtquanten werden schon in der ersten Schicht absorbiert, während energieärmere in einer der folgenden Schichten mit der passenden Energielücke ‚geschluckt‘ werden. Theoretisch sind mit dieser Technik Wirkungsgrade bis zu 50 % möglich. Das ISE erreicht mit Gallium bereits **1997** einen Wirkungsgrad von 31 %, wobei hier noch zusätzlich **Plexiglaslinsen** zum Einsatz kommen. **1999** wird am selbigen ISE eine **monolithische Tandemzelle** mit einem Wirkungsgrad von 27 % entwickelt, was zu diesem Zeitpunkt ein Europa-Rekord ist. Da diese Zelle in einem einzigen Prozeß hergestellt wird, ist ihre Fertigung weit kostengünstiger als das Aufeinandersetzen zweier getrennt hergestellter Zellen, wie im Fall der herkömmlichen Tandem-Zelle. Später setzt Japan mit einem Wirkungsgrad von 30,9 % einen neuen Weltrekord bei monolithischen

Tandemzellen.

**Tandemzellen** aus **amorphem und mikrokristallinem Silizium** gelten unter Fachleuten als eine High-End Dünnschicht-Technologie.

Die Firma **Bluenergy** mit Niederlassungen in den USA (Boulder, Colorado) und in Deutschland (Bluenergy AG in Wermelskirchen), entwickelt ein Verfahren welches es ermöglicht, die Kontaktbahnen durch die Halbleiterelemente überlappend abzudecken, anstatt diese wie bislang üblich als sichtbare Lötbander auf der Oberfläche zu plazieren.

Außerdem stellt das Unternehmen eine Fluorpolymer-Folie vor, deren Mikrostruktur (Dendriten im Nanometer-Bereich) sowohl das einfallende Licht aus allen Winkeln einfängt, als auch selbstreinigend ist (Lotos-Blüten-Effekt). Damit können die Lichtverluste durch spiegelnde Flächen und Verschmutzungen minimiert werden.



*Dendriten Mikrostruktur*

Das Unternehmen ist auch im Bereich der Windenergie aktiv, wo man einen weiterentwickelten [Savonius-Rotor](#) komplett mit Solarzellen laminiert (s.d.). In Zusammenarbeit mit einem Dachziegelhersteller wird ein Mini-Solar-Panel entwickelt, das einfach in die zugehörige Dachpfanne eingeklemmt werden kann.

Für die Elektrifizierung des Transrapid mit Solarenergie entwickelt **Bluenergy** ein völlig neuartiges Modul, das herkömmliche Photovoltaik-Module mit Glaskörper dem enormen Luft Über- und Unterdruck des 400 km/h schnellen Zuges nicht standhalten konnten. Der Träger des neuen, praktisch unzerstörbaren Moduls besteht aus einer perforierten, rostfreien Edelstahlplatte (V2A-Blech). Mir ist allerdings nicht bekannt, daß dieses Konzept bislang umgesetzt wurde (s. Patent Nr. 102.38.385.5 vom 15.09.2002, Solarer Transrapid).

Kurz vor der Serienreife steht dagegen die Ausstattung flexibler Materialien mit Photovoltaik-Modulen, wobei auch hier – wie bei allen Bluenergy-Produkten – eine Monofluorpolymerverkapselung (Teflon) Anwendung findet. Mit den flexiblen Membran-Modulen der Firma wird die PV-Nutzung bei allen Arten von Zelten und Planen aus Glasfieber oder Trevira möglich, ebenso wie bei Segelschiffen, die ihren Energiebedarf nun direkt aus dem eigenen Segel decken könnten.

Dafür, daß das Unternehmen nur zwei bescheidene Referenzprojekte vorweisen kann, ist kaum nachzuvollziehen, daß es eine dermaßen große Zahl von Preisen eingeehmt hat, wie z.B. den Innovationspreis der Deutschen Wirtschaft **1981, 1986** und **1998**, den Brüsseler Merite de L'invention **1988**, den Four Star Invention Preis der Hans-Sauer-Stiftung **1990**, den niederländischen Environment Award **1994**, den Erfinderpreis NRW **1996**, den Energie- und Umweltpreis der Schuler-Stiftung in Zusammenarbeit mit dem Wuppertal-Institut **1996**, sowie den Wuppertaler Energie und Umweltpreis **2000**.

Im Oktober **2010** meldet SUS-Unternehmen SunPower Corp., das mit seinen hocheffizienten Zellen (> 20 %) inzwischen knapp 1 Mrd. \$ Umsatz macht, daß man sich wieder ernsthaft mit Solarkonzentratoren beschäftigt. Man habe im Labor bereits ein Modell entwickelt, das das Licht, welches auf das Solarzellenpanel fällt, um einen Faktor von 6 bis 7 steigert. Eine erweiterte Version des Gerätes namens **Alpha-2 LCPV** (Low-Concentration Photovoltaic) wird ab August an den Sandia National Labs in Albuquerque getestet. Es handelt sich um eine PV-Anlage mit Flachspiegeln und einachsiger Nachführung, die einen Systemwirkungsgrad von 15,6% erreicht.

In der bislang aktuellsten Meldung vom Dezember **2010** gibt SunPower bekannt, daß die Konzentrazorzellen im Labor 25 % erreichen, wobei im Feldeinsatz schon bis zu 24 % gemessen werden konnten. Die Entwicklung sei jedoch noch nicht marktreif.



*Alpha-2 LCPV*

Am Zentrum für photovoltaische Systeme der Universität von New South Wales in Sydney erreicht Prof. Martin Green bereits **1989** im Labormaßstab bei monokristallinen Siliziumzellen einen Wirkungsgrad von 23 %, und bei polykristallinen 18 % durch das lasergestützte **Eingravieren von V-Ritzen** in das Solarzellen-Material: Zwischen den pyramidenförmigen Erhebungen fängt sich das Sonnenlicht, fast jedes Photon wird zur Energieumwandlung genutzt. Das Forscherteam um Prof. Green hofft, sogar bis auf 25 % zu kommen. Bereits lizenzierte Vorgängermodelle erreichen 20 % und werden schon **1992** in großen Mengen produziert und nach Japan verkauft. Für seinen Erfolg auf dem Gebiet der Solarzellen-Entwicklung erhält Prof. Green **1991** den Eureka-Preis für Umweltforschung. Bis **1996** hat die Universität schon Solarzellen für über 10 Mio. AUS-\$ verkauft, unter anderem auch an Spanien (Toledo), Deutschland (Technologiepark Gelsenkirchen) und in die Schweiz (Parlamentsgebäude). Auf der Photovoltaik-Konferenz **1998** in Wien berichtet Prof. Green von neuen Rekorden: 24,4 % für monokristalline und 19,8 % für polykristalline Module.



*V-Trog Anlage*

**1997** werden erstmals **V-Trog Solar-Generatoren** großtechnisch eingesetzt, eine weitere Entwicklung des Stuttgarter Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW). Längsspiegel an beiden Seiten der Zellen lenken das Licht auf diese und sollen die Energieausbeute um bis zu 80 % steigern. Die 8 Mio. DM teure Anlage wird auf dem Dach des neuen Mercedes-Benz-Motorenwerkes in Bad Cannstatt installiert, ist 5.000 m<sup>2</sup> groß und soll jährlich etwa 500.000 kW/h Solarstrom liefern.

Bei der Freiflächen-Testanlage ‚Widderstall‘ des ZSW auf der Schwäbischen Alb wird im Vergleich zu einem fest installierten PV-Generator ein Strahlungszugewinn von 55 % und ein Energiezugewinn von 45 % erzielt.

Mit einer **Konzentrator-Solarzelle** aus III-V Halbleitern erzielt das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) Anfang **2005** einen europäischen Wirkungsgradrekord von über 35 %. Der Winzling ist 0,031 cm<sup>2</sup> klein und besteht aus Materialien der dritten und fünften Gruppe des Periodensystems. Bei der Rekord-Zelle handelt es sich um eine monolithische Tripel-Solarzelle, die aus Galliumindiumphosphid, Galliumarsenid und Germanium besteht und in einem einzigen Prozeß hergestellt wird. Die hohe Effizienz wird durch die Umwandlung unterschiedlicher Bereiche des Sonnenspektrum erreicht. Das Unternehmen **RWE Space Solar Power** in Heilbronn

fertigt diese Tripelzellen bereits für den Einsatz im Weltraum nach einem ebenfalls am Fraunhofer ISE entwickelten Prozeß. Auf der Erde werden Tripelzellen als Konzentrator-Solarzellen eingesetzt. **Fresnel-Linsen** konzentrieren dabei das Sonnenlicht auf die sehr kleinen, runden Zellen in der Größe von Leuchtdioden. Mit der Technologie der Flatcon-Konzentratormodule (s.u.), die schon in Kürze dem Markt zur Verfügung stehen soll, können Systemwirkungsgrade deutlich über 25 % erzielt werden.

**2008** erreichen die Konzentratormodule des ISE unter realen Bedingungen am Standort Freiburg bereits einen Wirkungsgrad von 28,5 %. Die Wissenschaftler glauben, daß in den kommenden Jahren Modulwirkungsgrade bis 35 % möglich sind.

Im März **2010** geht der zweite Preis des FEE-Innovationspreises Energie der Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V. an die Arbeitsgruppe ‚III-V Solarzellen und Epitaxie‘ am ISE. Damit wird der Anfang **2009** erreichte Rekordwirkungsgrad von 41,1 % für eine Mehrfachsolarzelle aus den III-V-Halbleitern Gallium-Indium-Phosphid/Gallium-Indium-Arsenid/Germanium ausgezeichnet. Hierbei wurde das Sonnenlicht mit Hilfe einer **Fresnel-Linse** 454-fach auf die 5 mm<sup>2</sup> kleine Zelle konzentriert.

Ein weiterer interessanter Ansatz, damit weniger Licht reflektiert und mehr absorbiert werden kann, ist es Solarzellen zu ‚schwärzen‘.

Mit **schwarzen Solarzellen** beschäftigen sich hauptsächlich zwei Forschungsgruppen. An der Harvard University wird unter der Leitung des Physikers Eric Mazur die spiegelnde Oberfläche des Wafers mit extrem kurzen Laserimpulsen in einen stark lichtabsorbierenden und schwarz erscheinenden Wald mikroskopischer Spitzen verwandelt.

An der TU München wiederum gelingt es Prof. Martin Stutzmann und seinen Kollegen im Jahr **2006** die Reflektion der Silizium-Oberfläche im photosensitiven Bereich der Zellen um 95 – 98 % zu senken. Hierfür entwickelte der Physiker Svetoslav

Koynov eine einfache und schnelle Technik, die bei jeder Siliziumart und -dicke eingesetzt werden kann, und bei der auf naßchemischem Wege eine Textur in die Zellenoberfläche eingebracht wird. Dabei werden auf der Siliziumoberfläche nanometergroße Goldkörnchen ausgebracht, die sich im Rahmen einer katalytischen Reaktion mit einer Lösung aus Wasserstoffperoxid und Fluorwasserstoffsäure regelrecht in die Oberfläche hineinbohren. Die Nanopartikel lassen sich anschließend mit einer Lösung aus Jod and Kalium wieder entfernen. Man rechnet damit, daß der Wirkungsgrad der entsprechend behandelten Zellen dadurch um 10 – 20 % gesteigert werden kann. Nun sei man auf der Suche nach finanzieller Unterstützung um die Methode weiter zu entwickeln und in drei Jahren auf den Markt zu gehen.

Forscher des Mainzer Max-Planck-Instituts für Polymerforschung in Mainz und des Sony Materials Science Laboratory in Stuttgart berichten im Oktober **2006** über ein neuentwickeltes Verfahren, mit dem man das langwellige Licht mit niedriger Energie einer gewöhnlichen Lichtquelle in kurzwelliges Licht höherer Energie überführen kann.

Durch die geschickte Kombination zweier lichtaktiver Substanzen (Platinoctaethylporphyrin und Diphenylanthracen), deren Lösung langwelliges, grünes Licht in kurzwelliges, blaues Licht umwandelt, gelingt es nun erstmals, auch Photonen aus gewöhnlichem Licht, wie etwa Sonnenlicht, so zu manipulieren, daß sich die Energie der Photonen bestimmter Wellenlängen addiert (**Photonenpaarung**). Damit läßt sich die Effizienz von Solarzellen drastisch erhöhen. Und anstatt eine neue Solarzelle zu basteln, werden bestehende Module mittels einer zusätzlichen Schicht verbessert. Um diesen Prozeß zu optimieren und einer Anwendung näher zu bringen erproben die Wissenschaftler neue Substanzpaare für weitere Farben des Lichtspektrums und versuchen, diese in eine Polymermatrix zu integrieren.

**Solar Junction** ist eine **2007** erfolgte Ausgründung der Stanford University, die zuerst in Cupertino und später in San Jose, Kalifornien, neue Herstellungsprozesse für



hocheffiziente Multi Junction Solarzellen entwickelt, die in CPV-Systemen zum Einsatz kommen sollen. Das Startkapital stellt der Investor New Enterprise Associates (NEA) zur Verfügung.

Anfang 2010 bekommt das Unternehmen eine Förderung von 3 Mio. \$ durch das National Renewable Energy Laboratory (NREL) im Rahmen des PV Incubator Programms des DOE. Damit soll die



*Solar Junction Teststand*

Technologie von Solar Junction, dem ersten Unternehmen das wäßrige Nitride (Dilute Nitrides) für Multi Junction Zellen einsetzt, weiterentwickelt werden. Und schon im März bringt eine weitere Finanzierungsrunde 13,3 Mio. \$ von NEA, Draper Fisher Jurvetson und Advanced Technology Ventures, womit ein Gesamtinvestitionsvolumen von 33 Mio. \$ erreicht wird. Das NREL bescheinigt im Januar 2011, daß die Zellen bei 1.000-facher Sonneneinstrahlung einen Wirkungsgrad von 40,9 % erreichen. Nur einen Monat später sind es schon 41,4 %.

Im März 2011 wartet Solar Junction auf die Entscheidung des DOE über einen 80 Mio. \$ Kredit, um zu günstigen Konditionen die Demonstrations-Herstellungsanlage von derzeit 7 MW auf 250 MW pro Jahr erweitern zu können. Die Produktion soll dann Anfang 2012 beginnen.

Einen Weltrekord kann das Unternehmen im April 2011 verbuchen, als bei 400-facher



*Solar Junction Zellen*

Sonneneinstrahlung an einer verkaufsfertigen Zelle aus der Produktion eine Effizienz von 43,5 % gemessen wird (bei

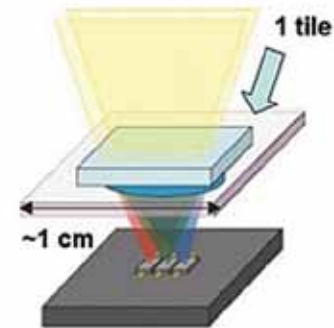
1.000-facher Einstrahlung ging diese auf 43,0 % herunter). Die Fläche der neuen Zelle beträgt nur 5,5 x 5,5 mm.

Im Mai 2007 stellen Forscher der australischen University of New South Wales eine Solarzelle mit Konzentrator vor, die einen Wirkungsgrad von 30 – 50 % erreicht. Hier wird ein rund 10 nm sarker Silber-Dünnsfilm auf eine Solarzelle gelegt und auf 200°C aufgeheizt. Dabei zerfällt dieser Film in winzige, 100 nm große ‚Inseln‘ aus Silber, welche den Grad des Lichteintrags erheblich steigern. Zur Versorgung eines Einfamilienhauses würde demnach eine Fläche von 10 m<sup>2</sup> ausreichen.

Einen reproduzierbaren Wirkungsgrad von 40,7 % erreicht dagegen im Juni 2007 die **Metamorphic Multi-Junction Concentrator Cell** (MMCC) der Boeing-Tochter **Spectrolab Inc.** – womit gleichzeitig der bislang als theoretische Obergrenze geltenden Wert von 37 % durchbrochen wird. Doch lange hält dieser Rekord nicht vor, denn nur einen Monat später erreicht die **Very High Efficiency Solar Cell** (VHESC) einen Wert von 42,8 %. An dem knapp 2-jährigen Forschungsprogramm sind allerdings eine ganze

Reihe hochkarätiger Unternehmen und Forschungsinstitutionen beteiligt: BP Solar, Blue Square Energy, Energy Focus, Emcore, SAIC, die University of Delaware, das National Renewable Energy Laboratory, die Georgia Institute of Technology, Purdue University, University of Rochester,

das Massachusetts Institute of Technology, die University of California Santa Barbara, die Firma Optical Research Associates und die Australian National University.



*Lateral Solar Cell*

Als nächster Schritt wird die DARPA nun ein Konsortium aus der University of Delaware und dem Chemieriesen DuPont über drei Jahre lang mit einem Gesamtbetrag von 100 Mio. \$ finanzieren, um die Zelle unter dem Titel **Lateral Solar Cell** zu einem kommerzialisierbaren Produkt weiterzuentwickeln. Wobei man sich als Zielvorgabe eine Zelle mit einem Wirkungsgrad von 50 % vorstellt.

**IBM** meldet im Mai **2008** die Entwicklung eines flüssigen Metalls zur Kühlung von Konzentrator-Solarzellen. Die Forscher des Unternehmens um Supratik Guha, dem Forschungsleiter für Photovoltaik bei IBM Research, stellen einen neuen Rekord auf, als sie mit Hilfe einer großen **Fresnel-Linse** 230 W Sonnenenergie auf eine 1 cm<sup>2</sup> kleine Solarzelle richten, was einer 2300-fachen Bündelung des direkten Sonnenlichts entspricht. Die Konzentrator-Zelle von IBM wandelt die Sonnenenergie in 70 W elektrische Energie um und erzielt damit eine fünfmal so hohe Leistungsdichte wie herkömmliche Konzentrator-Photovoltaik (PV) Solarstromanlagen.

Durch die Anwendung einer Kühlmethode für Mikroprozessoren gelingt es, die Solarzellen hierbei von über 1600°C auf 85°C zu kühlen. Bei dieser Flüssigmetall-Technologie wird eine extrem dünne Schicht einer Gallium-Indium Legierung zwischen der Solarzelle und dem wassergekühlten Kühlkörper aufgetragen, wobei diese Schicht die Wärme wesentlich besser und effizienter abführt als alle bislang eingesetzten Materialien.



*IBM Prototyp*

SPIR, ein amerikanisches Solar-Unternehmen zur Bereitstellung von Ausrüstungen und schlüsselfertigen Produktionslinien zur Herstellung von PV-Zellen und Modulen, gibt im April **2009** bekannt, daß seine hundertprozentige Tochtergesellschaft, die **Spire Semiconductor LLC** in Bedford, Massachusetts, im Rahmen eines 18-monatigen Forschungsprogramms eine Dreischicht-Solarzelle auf Basis von III-V-Halbleitern wie Galliumarsenid mit einem Wirkungsgrad von 42,5 % entwickeln soll. Die hocheffiziente Konzentratorzelle, die für eine 500-fache Sonneneinstrahlung angelegt ist, wird zusammen mit dem National Renewable Energy Laboratory (NREL) des DOE entwickelt, wobei das Programm mit 3,71 Mio. \$ finanziert wird. Später soll die neue Dreifach-Solarzelle weltweit unter dem Namen **Triathlon** angeboten werden.

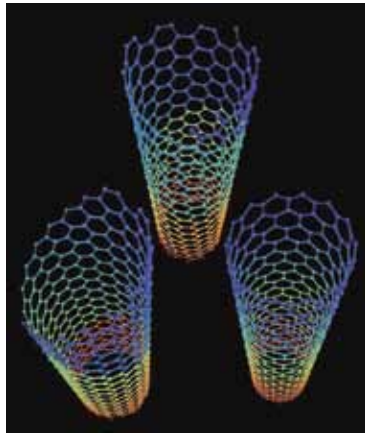
Bereits im Mai **2010** gibt Spire bekannt, mit 41 % einen neuen Rekord-Wirkungsgrad bei seinen produktionsbereiten, 1 cm<sup>2</sup> großen Konzentratorzellen erreicht zu haben. Einen Monat später gibt es einen weiteren Auftrag zur Entwicklung von Mehrfach-Solarzellen mit sehr hoher Effizienz für Raumfahrtanwendungen, der diesmal von der Missile Defense Agency (MDA) stammt.

Im September **2009** meldet die Fachpresse, daß Wissenschaftler der amerikanischen Cornell University um Paul McEuen und Jiwoong Park eine Photodiode vorgestellt haben, die aus nur einem **Kohlenstoff-Nanoröhrchen** besteht, welches Licht extrem effektiv in elektrischen Strom umwandelt und diesen noch dazu verstärkt. Grundlage der neuen Umsetzung ist eine schon früher erzeugte Diode aus einem einwandigen Nanoröhrchen – im Prinzip ein einfacher Transistor, der Strom nur in einer Richtung durchläßt.

Bei der Weiterentwicklung wird ebenfalls ein einwandiges Nanoröhrchen genutzt, eine aufgerollte Graphenschicht, die etwa so groß ist wie ein DNA-Molekül. Das Röhrchen wird zwischen zwei elektrische Pole eingespannt und mit

Laserstrahlen verschiedener Farbtemperatur angestrahlt. Dabei wird gemessen, wie viel elektrischer Strom erzeugt wird. Es zeigte sich, daß das Nanoröhrchen deutlich mehr Strom fließen läßt, als erwartet, wobei eine höhere eingestrahlte Energie in Form von Photonen sogar multiplizierend auf die Menge der fließenden Elektronen wirkt. Wegen der engen zylindrischen Struktur des Nanoröhrchens können es die Elektronen nämlich nur einzeln passieren. Dabei werden sie angeregt und lösen ihrerseits weitere Elektronen aus der Struktur, die den Fluß und damit den Strom verstärken.

Im Grunde sollten sich aus Nanoröhrchen fast ideale photovoltaische **Nanozellen** herstellen lassen, weil sie allein durch den Einfluß des Lichts die Elektronen quasi ‚vermehren‘ und andererseits keine Restenergie in Form von Wärme verlieren, was teure Kühlsysteme obsolet macht. Eine erste Solarzelle im Kleinstmaßstab ist



*Kohlenstoff-Nanotube (Grafik)*

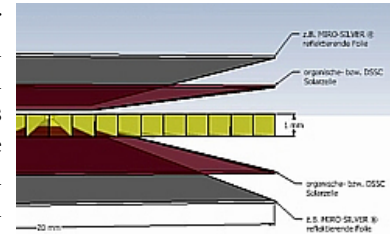
bereits hergestellt, bis zu wirtschaftlich nutzbaren Anlagen wird es noch etwas dauern.

Im März **2011** gibt die bislang recht schweigsame **Alta Devices** im kalifornischen Santa Clara bekannt, daß sie von einer beträchtlichen Zahl an Investoren satte 72 Mio. \$ erhalten hat, um die neu patentierte Technologie des Unternehmens weiter zu entwickeln und zu produzieren. Dabei handelt es sich um Photovoltaik-System, das eine weniger als 500 Nanometern (= ½ Mikrometer) **dünne Absorberschicht** besitzt – was deutlich dünner ist als die mehreren Mikrometer herkömmlicher Solarzellen.

Diese dünne Schicht kann die Effizienz und Flexibilität verbessern, denn so lange wie die Absorberschicht nur in der Lage ist Licht einzufangen, erhöht sich ihre Effizienz je geringer ihre Dicke ist. Damit ließen sich die Kosten hocheffizienter PV-Zellen signifikant senken. Alta Devices plant bereits **2011** auf den Markt zu kommen.

Die kleine Firma **sunrydz** in Berlin, hinter welcher der Entwickler Ryszard Dzikowski steht, entwickelt eine innovative **3D Solarzellen**-Anordnung, bei der die Energieumwandlung in farbstoffsensibilisierten Solarzellen (DSSCs) wesentlich effizienter als in zweidimensionalen Einheiten verläuft. Das Patent für die ‚Kalte‘ konzentrierende Photovoltaik wird im März **2010** angemeldet.

Das Licht wird mit einem Tageslichtkonzentratoren ohne Wärme konzentriert und über eine Glasfaser-Litung in eine lichtleitende PMMA-Folie eingekoppelt, die als Substrat für zwei Polymer-, Farbstoff- oder andere dafür geeignete Solarzellen dient, die mit ihren zueinander gewandten photoaktiven Schichten darauf aufgebracht sind. Die innere Struktur der Folie ist mit lichtleitenden Schächten und Mikrostrukturen versehen, die für eine effiziente Beleuchtung der sie umliegenden **Solarzellen** sorgen. Die daraus entstehende dünne Tandemzelle läßt sich leicht in mehreren sandwichartigen Lagen aufstapeln.

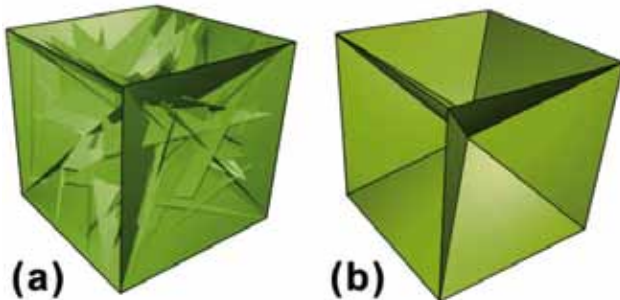


*sunrydz Aufbau (Grafik)*

Im April **2010** berichten die Fachblogs erstmals über eine Alternative zu den sonst üblichen Nachführungssystemen. Jeffrey Grossman vom **MIT** findet nämlich heraus, daß **3-D Strukturen** bis zu zweieinhalb Mal so viel Strom produzieren wie flache Panele. Grossman wurde davon inspiriert, wie Bäume ihre Blätter ausrichten, um ein Maximum der Sonnenstrahlung einzufangen. Gemeinsam

mit seinem Studenten Marco Bernardi entwickelt er ein Computerprogramm mit genetischen Algorithmen, das den Prozeß der Evolution imitiert und von zufälligen Mustern ausgehend über Tausende von Formen und von einer Generation zur nächsten immer effizientere gefaltete Oberflächen kreiert. Als Ergebnis entstehen dabei Formen, bei denen die Lichtausbeute fast über den gesamten Tag nahezu konstant bleibt – ohne nachgeführt werden zu müssen.

In einigen der wunderschönen, Origami-ähnlichen Formen reflektieren die Oberflächen einander, was zur Intensivierung der Sonneneinstrahlung und zu weiterem Energiegewinn führt. Je größer die Formen, desto effektiver werden sie, sodaß die **3-D Paneele** bis zu 120 kWh pro Tag erreichen, wo ein herkömmliches Panel gerade einmal 50 kWh erzielte. Den Berechnungen zufolge würde ein 1,83 m (= 6 ft) hohes **3-D Solarmodul** 20 % mehr elektrische Energie erzeugen, während ein 10 m hohes Modul sogar 240 % mehr Sonnenlicht in elektrische Energie umwandeln könnte.

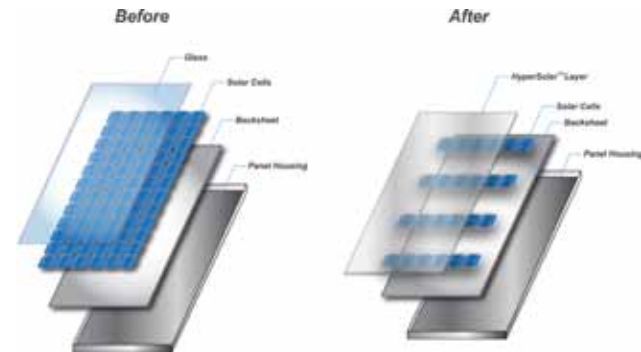


(a) (b)  
2 verschiedene 3D Struktur des MIT (Grafik)

Gemeinsam mit Vladimir Bulovic und David Perreault von EECS wird nun weiter nach den wirksamsten Faltungen gefahndet, um anschließend ein Prototyp-System zu bauen. Man sucht nach einem sinnvollen Mittelweg zwischen den billig herzustellenden flachen Zellen und den zwar effektiveren, aber auch wesentlich teureren 3-D Sonnenkollektoren. Angestrebt wird eine Form, die sich für den Transport zusammenklappen läßt und erst am Aufstellungsort bei der Montage ihre dreidimensionale Struktur bekommt.

Der Dresdner Solarmodulhersteller Solarwatt AG errichtet Mitte **2010** im niedersächsischen Lauenförde das erste Solarkraftwerk mit dem innovativen Glas **f | solarfloat HT** der **f | solar GmbH**. Durch die zusätzliche extrem robuste **Antireflexbeschichtung** des Glases erhöhen sich die Modulleistung und damit die Stromausbeute des 2,1 MW Solarkraftwerkes um bis zu 2,5 %. Installiert werden knapp 9.000 polykristalline Module von Solarwatt.

Die neu gegründete **HyperSolar Inc.** im kalifornischen Santa Barbara entwickelt den weltweit ersten dünnen und flachen Solar-Konzentrator für Standard-Solarzellen – durch den Einsatz einer von Nadir Dagli gestalteten innovativen Photonik sowie einer Low-Cost-Fertigung. Die Acryl-Konzentratoren können direkt auf die Zellen aufgesetzt werden und sollen deren Leistung um 300 % bis 400 % steigern.



HyperSolar (Prinzip)

Die im September **2010** beantragten Patente des Unternehmens basieren auf vier Photonik-Innovationen:

**Mikro-Konzentratoren** - Eine Matrix aus kleinen und hocheffizienten Solar-Konzentratoren wird verwendet, um das Sonnenlicht den ganzen Tag lang aus den verschiedensten Winkeln zu sammeln, ohne daß eine Sonnennachführung notwendig ist.



**Photonische Lichtleitung** (Photonics Light Routing) - Eine Solid-State-Photonik-Netzwerk unter dem Mikro-Konzentratoren transportiert das Licht von den Sammelpunkten an der Oberseite zu Punkten mit konzentriertem Output an der Unterseite, was in einer sehr dünnen Schicht machbar ist.

**Photonische Lichttrennung** (Photonics Light Separation) - In dem Photonik-Netzwerk werden Techniken eingesetzt, um das gesammelte Sonnenlicht in unterschiedliche Spektralbereiche aufzuteilen, die zu jeweils unterschiedlichen Ausgängen an der Unterseite geleitet werden, wo verschiedene Arten von Solarzellen plaziert werden können.

**Photonisches Wärmemanagement** (Photonics Thermal Management) - Solarzellen können nur einen Teil des solaren Spektrums in Strom umwandeln, während der ungenutzte Teil in Wärme umgewandelt die Leistung der Solarzelle beeinträchtigt. Die HyperSolar-Technologie filtert daher den ungenutzten Teil des Sonnenspektrums heraus, um eine Überhitzung zu vermeiden.

Da nicht alle Solarzellenarten in der Lage sind eine derart hohe Lichtintensität zu verkraften, will HyperSolar verschiedene **mikrophotonische Konzentratoren** mit geringer, mit gemischter und mit hoher Konzentration entwickeln und anbieten. Je nach Konfiguration können Hersteller bis zu 75 % Zellenmaterial einsparen, indem sie als Zellenabdeckung statt Glas die Solarkonzentratoren von HyperSolar einsetzen.

Zur Zeit arbeitet das Unternehmen daran eine Demonstrationsanlage zu entwickeln, um bis zur Produktionsreife zu gelangen. Kritisches Element der Entwicklung ist die Haltbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Materialien. HyperSolar untersucht verschiedene Polymere und Gläser, die sowohl kostengünstig sind als auch mindestens 20 Jahre lang halten.

## **Sonnenfarm (Flachspiegel-Kollektoren)**

Eine Variante der Parabolspiegel-Hochtemperatursysteme bilden kompakte **Fresnel-Kollektoren** mit **flachen Spiegelfacetten**. Die Spiegel sind parallel angeordnet und konzentrieren das Sonnenlicht auf ein mehrere Meter darüber liegendes Absorberrohr. Ein Sekundär-Reflektor oberhalb des Absorberrohres lenkt zusätzliche Strahlung in die Brennlinie. Ein Kollektor mit 24 m Breite in 1.000 m Länge kann im Absorberrohr Dampf mit mehr als 500°C für eine Stromleistung von ca. 5 MW produzieren.

Die Vorteile dieses Systems: Der Kollektoraufbau ist einfach und für die Massenfertigung gut geeignet, die geschlossene Anordnung der Spiegel erfordert weniger Raum und bietet unter der Konstruktion eine partiell verschattete Fläche, die sich z.B. für den Gemüseanbau gut eignet.

Die ersten Untersuchungen an dieser Compact Linear Fresnel Reflector (CLFR) Technologie werden Anfang der **1990er** Jahre an der Sydney University und gemeinsam mit der Solsearch Pty Ltd. durchgeführt.

Im Dezember **2007** errichtet **Ausra** in Las Vegas eine hochautomatische Produktionsanlage, in der die Reflektoren, Absorberrohre und andere Schlüsselkomponenten hergestellt werden. Die Kapazität beträgt ab April **2008** vier Quadratmeilen Kollektoren mit einer Gesamtleistung von über 700 MW pro Jahr – also jeweils ausreichend zur Versorgung von mindestens 500.000 Haushalten. Das Unternehmen befindet sich inzwischen zu großen Teilen im Besitz von Khosla Ventures und Kleiner, Perkins, Caufield & Byers.

Im März **2008** legt Ausra eine Studie vor, derzufolge seine thermischen Solarkraftwerke über 90 % des US-weiten Strombedarfs inklusive dem Bedarf einer großen Flotte von Elektrofahrzeugen decken könnten.

Ebenfalls im März **2008** meldet die französische Wissenschaftspresse, daß man nun auch dort in die Errichtung solarthermischer Kraftwerke nach dem Parabolspiegel-Prinzip einsteigen will. Im Rahmen des Projektes ‚Solenha‘, das als nationaler Impulsgeber für die Entwicklung weiterer

Hochleistungs-Solartechnologien gesehen wird, soll eine erste 12 MW Anlage mit einer Fläche von 40 bis 80 Hektar gebaut werden, die den Strombedarf einer Stadt mit zirka 37.000 Einwohnern deckt. Der Baubeginn für das 80 Mio. € Projekt ist für **2008** und die Inbetriebnahme für **2010** vorgesehen, es soll dann bis **2040** in Betrieb bleiben.

Im Juli **2008** soll in Südostspanien in der Nähe von Murcia eines der ersten kommerziellen thermischen Solarkraftwerke mit Fresnelkollektoren in Betrieb gehen. Die 2 MW Anlage mit rund 18.000 m<sup>2</sup> Spiegelfläche wird von den Unternehmen M+W Zander und Novatec Biosol errichtet, nachdem man die Technologie ab **2006** auf einem 200 m<sup>2</sup> Testfeld optimiert hatte. Der Receiver in der Brennlinie wird von acht Spiegelreihen angestrahlt, wodurch das in ihm enthaltene Wasser verdampft und eine Stromturbine antreibt.

### **Parabolspiegel Anlagen (Dish-Stirling-Systeme)**

Eine weitere Form der solarthermischen Kraftwerke beinhaltet den Einsatz von Parabol-Spiegeln, die das Sonnenlicht auf (nur) einen Brennpunkt fokussieren und dort Temperaturen bis zu 800°C erreichen. Dabei wird die Wärme nicht nur zum Betrieb eines Wasser-Dampf-Kreislaufs genutzt, sondern – wie auch überwiegend umgesetzt – zum direkten Antrieb eines Stirlingmotors. Diese zweiachsig nachgeführten Systeme sind besonders für den dezentralen Einsatz geeignet (stand-alone-systems) und liegen typischerweise im Leistungsbereich zwischen 5 kW und 50 kW. Für größere Leistungen lassen sich die Systeme zu einer Farm zusammenschalten.

Das südbadische Unternehmen Bomin-Solar von Prof. Hans Kleinwächter in Lörrach-Haagen gilt seit **1970** als Pionier bei der Entwicklung dieses Anlagentyps. Gemeinsam mit seinem Sohn Jürgen (s.o.) erfindet er **1972** ein Vakuumsystem zur Verformung flexibler Spiegeloberflächen, womit eine extreme Preis- und Gewichtsreduzierung gegenüber festen Spiegeln erreicht

wird. Diese **Folienspiegel** aus Hostaflon ET sind kratzfest, und dadurch gegen Hagel- und Sandstürme gefeit, auch ihre Nutzungsdauer von 10 Jahren liegt nicht hinter der konventioneller Glas- oder Metallspiegel zurück. Der zu einer metallisierten Folie verarbeitete Flour-Kunststoff ist chemisch mit Teflon verwandt. Die Folie wird über einen Rahmen aus Faserverbundwerkstoffen gespannt und mittels einer Vakuumpumpe in die gewünschte Parabolform gebracht. Derartige Spiegel weisen einen Wirkungsgrad von 80 % – 90 % auf. Dieses Unterdruck-Verfahren wird inzwischen weltweit bei Metallspiegeln angewandt.

Zur Überbrückung von Ausfallszeiten bzw. für den nächtlichen Betrieb entwickelt die Bomin-Solar außerdem eine Methode der Energiespeicherung, die sich ideal in das vorhandene Konzept einpassen lässt: Das von einem Parabolspiegel gebündelte Licht trifft mit 450°C auf einen mit Magnesiumhydrid gefüllten Behälter, wodurch sich dort der Wasserstoff vom Magnesium trennt und in einen zweiten Behälter fließt, wo er sich mit einer Eisen-Titan-Legierung verbindet. Bei beiden Prozessen wird Wärme frei, die zu Heizzwecken oder zum Betrieb eines Motors genutzt werden kann. Bei Nacht oder bei Bedeckung kehrt sich das Ganze um: Der Wasserstoff verlässt die Eisen-Titan-Legierung und strömt zurück zum Magnesium, wobei sich der zweite Speicher bis auf minus 20°C abkühlt. Und indem im ersten Speicher Wasserstoff und Magnesium wieder miteinander reagieren, entsteht dort Wärme über 450°C, die jetzt den Motor antreiben kann.



*Folienkuppel-Dish*

Eine besonders große Dish-Farm ist die **SolarPlant 1** der LaJet Energy Company in Abilene, Texas, die Mitte **1984** mit insgesamt 700 Konzentratoren vom Typ LEC-460 auf der Warner Ranch in der Nähe von Warner Springs, etwa 45 Meilen nordöstlich des kalifornischen San Diego, in Betrieb geht. Damals wurde besonders die kostengünstige Errichtung dieser Farm betont, deren Strom zu jener Zeit nicht teurer war als der aus fossilen oder nuklearen Quellen. Die Anlage hat eine elektrische Leistung von 4,92 MW, die an die San Diego Gas & Electric (SDG&E) verkauft wird, und besteht aus zwei unterschiedlichen Konzentrator-Feldern: Im ersten Feld wird Dampf mit einer Temperatur von 276°C erzeugt, aus dem anschließend das Wasser abgeschieden und in den Kreislauf zurückgespeist wird. Im zweiten Feld erfolgt dann eine Nacherhitzung auf 371°C und die Weiterleitung zu zwei Turbinen. Von diesen hat die erste eine Leistung von 3,68 MW, während die zweite für 1,24 MW ausgelegt ist und primär beim Hoch- bzw.



*Solar Plant I*

Herunterfahren der Anlage eingesetzt wird, wenn nicht genug Dampf für den Betrieb der großen Turbine erzeugt wird, bzw. bei einer zu geringen Sonneneinstrahlung, die nicht für den gemeinsamen Betrieb beider Turbinen ausreicht.

Man hatte bereits **1979** mit der Entwicklung der LEC-460 Konzentratoren begonnen und im Laufe der Jahre insgesamt sechs verschiedene Modelle gebaut, bis das Ziel eines hochoptimierten Konzentrators erreicht war. Jeder einzelne LEC-460 besitzt zugunsten schneller Reaktionszeiten und zur Vereinfachung der Gesamtanlagen-Software eine

eigene Prozessorsteuerung zur Sonnennachführung. Jeder Konzentrator besteht aus 24 runden Einzelspiegeln aus einer leichten Polymerfolie, deren Wölbung mittels kleiner Vakuumpumpen exakt gesteuert wird. Der Konzentrationsfaktor beträgt 225. Die Edelstahl-Receiver, die alleine durch das Sonnenlicht eine permanente Schwärzung erreichen, sind mit einer Salzschnmelze gefüllt, in der sich die wasserführenden Rohre erhitzen. Diese Schmelze wirkt bis zu 30 min. lang auch als Wärmepuffer. Die low-cost Trägerkonstruktion aus Metall und Karbonfasern ist auf eine Massenfertigung zugeschnitten. Im Gegensatz zu den Bauzeiten von 10 – 15 Jahren bei Brennstoff- oder Nuklear-Energieanlagen rechnet man bei einer **SolarPlant** mit Bauzeiten von nur einem Jahr. Dafür wird die Lebensdauer der Anlage mit 20 – 30 Jahren angegeben, bei einer Amortisationszeit von 10 Jahren. An den Reflektoren müssen die Polymerfolien allerdings schon nach 5 Jahren ausgetauscht werden. Das Gelände der **SolarPlant 1** Anlage wird übrigens begrünt, um die lokale Staubbefreiung zu reduzieren.



*Parabolspiegel mit Stirling*

In Deutschland entwickelt Schlaich, Bergermann & Partner mit sechs weiteren Partnern aus Deutschland und Spanien mit EU-Förderung ein fortschrittliches System mit dem Namen **EuroDish**, bei dem es in erster Linie um eine Kostenreduzierung gegenüber den Vorgängermodellen geht. So wird der 8,5 m durchmessende Konzentrator als dünnwandige Sandwichschale aus glasfaserverstärktem Epoxidharz hergestellt. Außerdem wird die Konzentratorfläche um 25 % größer ausgelegt als für die

Nennleistung des Stirlingmotors erforderlich ist. Zwar geht so bei maximaler Einstrahlung ein Teil der Wärme verloren, die durch ein kleines Gebläse an den Receiverrohren abgeführt wird, doch bei mittlerer und geringer Einstrahlung kann der Motor trotzdem mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden. Im Jahresmittel kann der Ertrag bei Standorten mit nur wenigen Stunden maximaler Einstrahlung um fast 30 % gesteigert werden. Seit **2000** bzw. **2001** werden zwei EuroDish-Prototypen in Almería getestet.



*Euro-Dishs mit Stirlingmotoren*



*Zenith-Dishfarm*

Die israelische Firma Zenith Solar aus Nes Ziona nahe Tel Aviv präsentiert im März **2008** eine Dish-Technologie von der sie behauptet, die weltweit effektivste zu sein.

Der Spiegel hat eine Fläche von  $10 \text{ m}^2$  und fokussiert die Sonnenstrahlen auf einen Receiver-Generator mit einer Fläche von  $100 \text{ cm}^2$ , der *sowohl* Strom produziert als auch Wasser erhitzt, so daß man von einem Nutzungsgrad von rund 70 % spricht.

Entwickelt wurde der Zenith-Dish in Zusammenarbeit mit der israelischen Ben-Gurion University und dem deutschen Fraunhofer Institut. Die aktuellen Planungen sehen vor, zum einen mit 86 Parabolspiegeln rund 25 % des Energiebedarfs von 250 Familien des Kibbutz Yavne zu decken, zum anderen mit einer Anzahl weiterer Spiegel den Verbrauch von Heizöl einer großen Chemiefabrik zu ersetzen. Bei einem Erfolg plant Zenith **2009** mit der Vermarktung zu beginnen.

### **Sonnenturm**

Auch die Idee des Sonnenturms ist nicht neu, sie geht im Grunde auf den Erfinder des Entfernungsmessers, den Engländer Archibald Barr (1855 – 1931) im Jahre **1896** zurück, wurde aber erst **1957** von den sowjetischen Physikern Aparase, Baum und Garf wieder aufgegriffen, die ein Modell im Maßstab 1:50 bauten. Bei derartigen Systemen werfen ausgedehnte Felder von sonnennachgeführten Spiegeln (Heliostate) ihre Strahlen auf die Spitze eines hohen Turmes, wo sich ein Dampfkessel befindet, dessen Druck dann eine Turbine zur Erzeugung elektrischer Energie antreibt. Die erreichbaren Temperaturen betragen durch den Konzentrationsfaktor von 300 bis 500 im allgemeinen zwischen  $200^\circ\text{C}$  und  $800^\circ\text{C}$ , der Wirkungsgrad wird mit 11 % angegeben.

Anfang **1980** beginnt man bei Bastrow in der Mojave-Wüste, gut 200 km östlich von Los Angeles mit dem Bau einer **10 MW** Turmanlage, die auch L.A. mitversorgen soll. Das komplett vom US-Energieministerium finanzierte **Solar One** System des kalifornischen Stromproduzenten Southern California Edison (SCE) besteht aus einem 90 m hohen Stahlurm mit einem golden-leuchtenden Absorber auf der Spitze, in dem





*Solar One Turmkraftwerk  
(Mojave)*

bei 500°C – 1.000°C der Turbinendampf erzeugt wird, und 1.818 kreisförmig angebrachten konkaven Spiegeln mit je 7 m Länge und 6 m Breite. Die Anlage kostet umgerechnet 310 Mio. DM und geht **1982** in Betrieb. **1988** steht die Anlage nach sechsjähriger vielversprechender Testphase zum Verkauf – für den symbolischen Wert von einem Dollar. Die Firma Edison hat das Experimentieren aufgegeben und kauft den Strom lieber aus den Solarfarmen von LUZ (s.o.). **1995** wird **Solar One** mit einem Nitratsalz-Speicher aufgerüstet. Ab 2003 werden in Spanien aufgrund der dort seit 2002 bestehenden hohen Einspeisevergütung, die sich allerdings nur auf reine Solaranlagen erstreckt, neben zwei Parabolrinnen-Projekten (s.o.) auch zwei Solarturm-Projekte angegangen. Das Solarturmkraftwerk **PS 10** wird 15 km westlich von Sevilla errichtet: Knapp 1.000 nachgeführte Heliostaten mit je 90 m<sup>2</sup> Fläche erhitzen einen Satteldampf-Receiver, dessen Turbine **11 MW** erbringt. Um Leistungsschwankungen auszugleichen wird ein 305 m<sup>3</sup> großer Wärmespeicher integriert. Betriebsbeginn soll erst Mitte 2004 sein, dann Mitte 2006, die Investitionskosten betragen 28 Mio. €, und beteiligt sind die Unternehmen Abenao, Inabensa, Solucar, CIEMAT sowie das DLR.

Am **28. Juni 2004** ist Baubeginn für das erste kommerzielle Turmkraftwerk der Welt. Das Kraftwerk des spanischen Technologiekonzerns Abengoa im andalusischen Sanlúcar la Mayor bei Sevilla wird mit einer Leistung von **11 MW** Strom für 10.000 Familien liefern.

Das Abengoa-Vorhaben ist eines von vier vor zwei Jahren angekündigten solarthermischen Kraftwerks-Projekten in Spanien. Möglich macht sie das seit Ende **2002** gültige Einspeisegesetz. Es vergütet den in solarthermischen Kraftwerken erzeugten und in das Netz eingespeisten Strom mit mindestens zwölf Eurocents pro Kilowattstunde. Hinzu kommt der zum Zeitpunkt des Einspeisens gültige Pool-Strompreis von im Durchschnitt vier Eurocents.

Im März **2007** geht das Solucar-Kraftwerk mit seinem 40 Stockwerke hohen und ästhetisch optimierten Turm ans Netz. Das Sonnenlicht wird von 600 großen Heliostaten auf den zentralen Absorber geworfen.



*Solucar Solarturmkraftwerk*

Zu dieser Zeit werden damit 6.000 Haushalte mit Strom versorgt, während das Potential eigentlich für alle 600.000 Einwohner Sevillas reichen sollte. Insbesondere soll durch die Speicherung von Wasserdampf während des Tages auch der Nachtbetrieb gewährleistet werden – was derzeit allerdings nur für eine einzige Betriebsstunde funktioniert. Eine fast doppelt so große **20 MW** Schwesteranlage ist inzwischen gebaut.

Der Bau des größten Sonnenturmkraftwerk der Erde Kraftwerks soll **2008** im südöstlichen Bundesstaat Victoria, in der Nähe von Mildura, beginnen. Das Kraftwerk des Unternehmens Solar Systems, dessen knapp 20.000 Spiegel von jeweils 26 m<sup>2</sup> Fläche die Sonnenstrahlen auf das Zentrum konzentrieren, wird **2013** nach seiner

Fertigstellung **154 MW** Strom für 45.000 Haushalte liefern. Besonders interessant ist hier der neue Ansatz, auf dem 40 m hoher Turm im Zentrum der Anlage temperaturresistente ‚Super-Solarzellen‘ mit einem Wirkungsgrad von 35 % als Empfänger zu installieren, welche das gebündelte Sonnenlicht in Strom umwandeln.



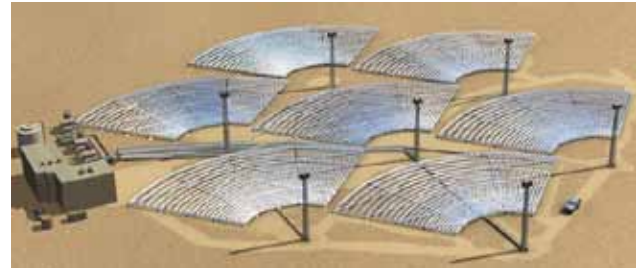
*Solarturm-Kraftwerk PS 30*

Im November **2007** verkündet die Regierung der Nordaustralischen Provinz Queensland, daß die Stadt Cloncurry ihre Stromversorgung bis **2009** komplett durch Solarthermie sichern wird. Hierbei werden 8.000 Spiegel das Sonnenlicht auf Graphitblöcke richten, durch welche Wasser gepumpt wird, das anschließend als Dampf mehrere Turbinen betreibt, wobei diese Blöcke tagsüber so viel Hitze speichern, daß auch ein ununterbrochener Betrieb über Nacht möglich ist.

Cloncurry wird deshalb ausgesucht, weil hier im Jahr **1889** eine bislang ungebrochene Rekordtemperatur von 53°C gemessen wurde.

Ende **2007** startet Suchmaschinen-Betreiber Google unter dem Namen RE<C ein millionenschweres Forschungsprojekt für erneuerbare Energien. Im ersten Schritt sollen sich Googles Forscher auf die Nutzung von Sonnen- und Erdwärme spezialisieren. Gesteuert wird das

Forschungsprogramm von Googles philanthropischem Ableger Google.org, der Ende **2006** mit dem Ziel gegründet wurde, Armut, Krankheiten und die globale Erwärmung zu bekämpfen.



*eSolar Anlagen (Grafik)*

Die von Google bevorzugten Heliostate von eSolar, einem Startup des in Pasadena ansässigen Idealab, sind insbesondere für die Errichtung kleinerer Solarturm-Anlagen gedacht. Durch die Massenproduktion der Spiegel, die 100 bis 300 mal kleiner als die konventionellen Modelle sind, sollen die Investitionskosten für Solarturmanlagen um bis zu 50 % gesenkt werden können. Die Firma eSolar spricht dabei von Anlagengrößen mit **33 MW** – die sich allerdings auch zu Farmen bis über **500 MW** zusammenschalten lassen.

Im Juni **2008** meldet eSolar, daß sie in Kalifornien für den Stromversorger Southern California Edison (SCE) aus Los Angeles eine solarthermische Heliostaten-Anlage mit errichten werden, die **2011** in Betrieb gehen soll. bereits **2012** soll die Anlage **105 MW** erreichen, und **2013** dann die geplante Gesamtleistung von **245 MW**.

### **Sonnenofen**

Auch bei diesem System reflektieren und konzentrieren eine Anzahl von Spiegeln die Sonnenstrahlen. Allerdings werden hier wesentlich höhere Temperaturen erzielt als bei den zuvor beschriebenen Systemen.

Eine frühe Form des Solarofens wird in dem Magazin

Popular Mechanics vom Mai **1924** vorgestellt. Er besteht aus 25 kegelförmig angeordneten Spiegeln und Linsen und scheint auf die Versuche des schwedisch-amerikanischen Ingenieurs John Ericsson (1803 – 1889) zurückzugehen. Der Ofen soll in der Lage gewesen sein, Metallproben von 2 g zu schmelzen.



*Solarofen (1924)*

Die eindrucksvollste dieser Anlagen bildet jedoch auch noch heute der Sonnenofen von Odeillo Font-Romeu in den französischen Pyrenäen:



*Odeillo-Sonnenofen*

In Frankreich beginnt **1946** das Centre National de la Recherche Scientifique mit der Untersuchung der verschiedenen Methoden zur Nutzung der Solarenergie. Erste Tests an großen Solaröfen werden durchgeführt, in **Meudon** wird ein **2 kW** Ofen errichtet. Durch die erfolgreichen Versuche erkennt man **1949** die immensen Möglichkeiten der solaren Hochtemperatur-Technologie

und beauftragt den französisch-deutschen Wissenschaftler Felix Trombe (1906 – 1985) zuerst mit dem Bau eines **50 kW** Ofens in **Mont-Louis**, in den östlichen Pyrenäen, der **1953** in Betrieb geht und schon **3.000°C** erreicht, und dann mit dem Bau des **1 MW** Solarofens bei **Odeillo**.

**1968** beginnt der Bau in 1.500 m Höhe – wo die klimatischen Verhältnisse eine Betriebsdauer von gut 3.000 Arbeitsstunden pro Jahr erlauben. Der Odeillo-Solarofen, dessen riesiger parabolischer Spiegel aus kleinen Einzelspiegeln fast die gesamte Fassade eines elfstöckigen Gebäudes bedeckt, geht **1970** in Betrieb und erreicht im Brennpunkt Temperaturen bis zu **3.800°C**, womit in jedem Fall Stahl geschmolzen werden kann. Die Anlage besitzt auf acht vorgelagerten Terrassen 63 bewegliche Planspiegel zu je **45 m<sup>2</sup>**, von denen jeder aus 180 Spiegelsegmenten besteht. Diese Spiegel mit ihrer Gesamtfläche von **2.835 m<sup>2</sup>** lenken ihre Strahlen auf den riesigen Parabolspiegel von rund **1.830 m<sup>2</sup>**, der **54 m** breit und **40 m** hoch ist, und in dessen Brennpunkt das Ofenhaus liegt. Dieser Hohlspiegel ist keine zusammenhängende Fläche, sondern ist aus **9.130** einzelnen Spiegelsegmenten von **48,5 x 48,5 cm** zusammengesetzt, die alle der Form des Paraboloids entsprechend leicht gekrümmt sind.

Trotz dieses großen Aufwandes liefert die Anlage bei ihrer offiziellen Inbetriebnahme **1977** allerdings nur **0,06 MW**, ans Netz gehen davon ganze **100 kW**. Der Wirkungsgrad soll **8 %** betragen, der theoretische Konzentrationsfaktor beträgt **37.700**, aber durch Streuungs- und Absorptionsverluste wird nur ein tatsächlicher Konzentrationsfaktor von **20.000** erreicht. Der Odeillo-Solarofen wird vorzugsweise zum Vakuumschmelzen von Speziallegierungen benutzt und erzielt in den **1980er** Jahren einen täglichen Ausstoß von **3 t**. **1988** soll der Odeillo-Solarofen abgerissen werden, später rückt man von diesem Plan jedoch wieder ab.

Auf dem Wasserstoffweltkongress in Lyon im Juni **2006** stellen Forscher der ETH Zürich ein neues, durchaus spektakuläres Verfahren zur Wasserstoffherstellung vor

(s.d.), bei dem ausschließlich Wasser und Hitze genutzt werden. Durch das Bündeln von Sonnenlicht mit Spiegeln werden in einem chemischen Reaktor, der mit Zinkoxid gefüllt ist, Temperaturen von 2.000°C erreicht, wodurch das Zinkoxid in Zinkmetall und Sauerstoff gespalten wird. In einem zweiten Schritt läßt man das Zink mit Wasser reagieren, wodurch der Wasserstoff entsteht – sowie Zinkoxid, das wiederverwertet wird. Als Wirkungsgrad der zwei bislang gebauten Pilotanlagen werden über 50 % angegeben (zum Vergleich: Der Wirkungsgrad der Elektrolyse mittels Solarzellenstrom erreicht höchstens 15 %). Die Forscher aus Zürich rechnen allerdings damit, daß es noch 10 - 15 Jahre dauern wird, bis industrietaugliche Anlagen gebaut werden können (s.u.).

Im März 2007 wird der Sonnenofen des DLR-Projekts HYDROSOL in Brüssel mit dem insgesamt 1,15 Millionen Euro dotierten Descartes Preis für Forschung der Europäischen Kommission ausgezeichnet. Im Sonnenofen in



*DLR Solarofen*

Köln-Porz war es den Wissenschaftlern des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik ebenfalls gelungen, Wasser in einem geschlossenen thermochemischen Kreisprozeß mit einem Wirkungsgrad von bis zu 50 % mittels Solarenergie in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten.

## Sonnenfarm (Parabolrinnen-Kollektoren)

Heutzutage werden Sonnenfarmen mit einer großen Zahl von trog- oder rinnenförmigen **Parabolspiegel-Kollektoren** errichtet, in deren Brennlinsen schwarz gefärbte Kollektorrohre verlaufen. Seit einigen Jahren werden alternativ auch **Fresnel-Kollektoren** mit flachen Spiegelfacetten eingesetzt, auf die ich weiter unten noch zu sprechen komme.

Je nach Verweilzeit und Art des Wärmemittelträgers (Wassers, Öl usw.) sind durch den Konzentrationsfaktor 80 mit dieser Methode 400°C – 600°C erreichbar. Diese Anlagenart ist einfach, preisgünstig, leicht zu handhaben und zu warten. Ihr Wirkungsgrad liegt bei etwa 10 %, wobei in Einzelfällen sogar Maximalwirkungsgrade von 15 % erreicht werden.

An die Parabol-Reflektoren werden bei diesem System hohe konstruktive Anforderungen gestellt, denn die erforderliche geometrische Präzision muß gegen alle Windlasten hinreichend



*Rinnen-Solarkraftwerk (Mojave)*

widerstandsfähig sein. Eisenarmes Glas mit rückseitiger Verspiegelung ist als Reflektor bestens geeignet.

Ende 1984 stellt die private Firma LUZ International im kalifornischen **Daggett** die erste Solarfarm mit **14 MW** (andere Quellen: **45 MW**) fertig, und 1985 geht dieses weltweit erste kommerzielle Solarfarm-Kraftwerk ans Netz. Kunde ist das Southern California Edison Electricity Network. Das in den Kollektorrohren auf 350°C – 450°C erhitzte synthetische Spezialöl treibt über einen Wärmetauscher einen Dampfturbogenerator der schweizerischen ABB an. Die SEGS



I + II genannte Anlage (Solar Electric Generating System) besitzt eine Reflektorfläche von 80.000 m<sup>2</sup> in Form von 37.000 silberbeschichteten großflächigen Parabolspiegeln, die mit einer besonderen Versiegelung und einer Sonnennachführung ausgestattet sind. Diese Spiegel werden vom größten europäischen Hersteller, der Fürther Flabeg hergestellt, einer Tochter der Flachglas-Tochter, Gelsenkirchen, sie sind 2,5 m breit und 50 m lang. Die Kollektorröhren bestehen aus schwarzem Chromstahl und sind in evakuierte Glasröhren vom Borosilikattyp eingebaut, die eine gute Transmission, Gasdichtigkeit, thermische Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit aufweisen.

Die **Kreta**-Anlage wird in ihren 300.000 m<sup>2</sup> Spiegelfläche einen Konzentrationsfaktor von 30 erreichen, die Rinnen werden einachsiger der Sonne nachgeführt, und das Thermoöl in den vakuumisolierten Kollektorröhren erreicht eine



*Solarrinnen (Mojawe)*

Temperatur von 400°C. Pilkington Solar bzw. der V o r g ä n g e r Flachglas hatte bereits **1994** den Plan für ein thermisches Solarkraftwerk auf Kreta entwickelt

– am vorgesehenen

Standort erreicht die Sonneneinstrahlung mit 2.400 kWh/m<sup>2</sup> Werte wie in der Sahara. Maßgebliche Schubkraft erhält das Projekt Ende der **1990er** Jahre durch einen Fond privater Kapitalgeber aus Deutschland, der Solar Millennium AG, die auch die Mehrheit an der Theseus S.A. hält. Theseus soll 20 % bis 30 % der Gesamtkosten von 250 Mio. DM als Eigenkapital zur Verfügung stellen, weitere 100 Mio. DM sollen die Banken aufbringen. Von der EU erwartet man 40 %.

Im Rahmen einer Zusammenarbeit der Industrie-partner Abengoa, Flabeg Solar, der DLR und dem Ingenieurbüro Schlaich, Bergermann & Partner wird Ende der 90er Jahre ein **„EuroTrough“**-Kollektor entwickelt, der in Almería



*EuroTrough Parabolrinnen*

getestet wird (s.d.).

Ab **2003** werden diese Kollektoren im Rahmen des BMU-Projektes **SKAL-ET** in einem 800 m langen Strang des kalifornischen Solarkraftwerks

**SEGS V** auf ihre

Zuverlässigkeit und ihr Optimierungspotential hin untersucht. Federführend ist die Kölner Firma Flagsol GmbH. Diese neuen Kollektoren überzeugen bei den Tests mit einer Wirkungssteigerung von 5 % – 10 % gegenüber der bestehenden Technologie.

Aufgrund der hohen Einspeisevergütung in Spanien ab **2002** (die allerdings nur für reine Solaranlagen gilt), werden **2003** neben zwei Solarturm-Projekten auch zwei große Parabolrinnen-Projekte gestartet: **AndaSol 1** und **AndaSol 2**. Die beiden **50 MW** Anlagen südöstlich von **Granada** werden mit **„EuroTrough“**-Kollektoren mit einer Solarfeld-Gesamtfläche von jeweils 510.120 m<sup>2</sup> bestückt. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit werden Flüssigsalzspeicher mit einer thermischen Kapazität von 6 Vollaststunden eingebunden.

Im Oktober **2005** erhält der Mainzer Technologiekonzern Schott den ersten Großauftrag für seinen neuen Parabolrinnen-Solar-Receiver. Für das Kraftwerk **Nevada Solar One** in Eldorado Valley nahe Boulder City und dem Hoover Staudamm im US-Bundesstaat Nevada bestellt das US-Unternehmen Solargenix über 19.000 Stück der Receiver. Im Februar **2006** wird der Grundstein für die



Im Rahmen einer Zusammenarbeit der Industrie-partner Abengoa, Flabeg Solar, der DLR und dem Ingenieurbüro Schlaich, Bergermann & Partner wird Ende der 90er Jahre ein ‚EuroTrough‘-Kollektor entwickelt, der in Almería getestet wird (s.d.). Ab **2003** werden diese Kollektoren im Rahmen des BMU-Projektes *SKAL-ET* in einem 800 m langen Strang des kalifornischen Solarkraftwerks *SEGS V*



*Acciona Parabolrinnen (AndaSol 1)*

auf ihre Zuverlässigkeit und ihr Optimierungspotential hin untersucht. Federführend ist die Kölner Firma Flagsol GmbH. Diese neuen Kollektoren überzeugen bei den Tests mit einer Wirkungssteigerung von 5 % – 10 % gegenüber der bestehenden Technologie.

Aufgrund der hohen Einspeisevergütung in Spanien ab **2002** (die allerdings nur für reine Solaranlagen gilt), werden **2003** neben zwei Solarturm-Projekten auch zwei große Parabolrinnen-Projekte gestartet: **AndaSol 1** und **AndaSol 2**. Die beiden **50 MW** Anlagen südöstlich von **Granada** werden mit ‚EuroTrough‘-Kollektoren mit einer Solarfeld-Gesamtfläche von jeweils 510.120 m<sup>2</sup> bestückt. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit werden Flüssigsalzspeicher mit einer thermischen Kapazität von 6

Vollaststunden eingebunden.

Im Oktober **2005** erhält der Mainzer Technologiekonzern Schott den ersten Großauftrag für seinen neuen Parabolrinnen-Solar-Receiver. Für das Kraftwerk **Nevada Solar One** in Eldorado Valley nahe Boulder City und dem Hoover Staudamm im US-Bundesstaat Nevada bestellt



*AndaSol 1*

das US-Unternehmen Solargenix über 19.000 Stück der Receiver. Im Februar **2006** wird der Grundstein für die Anlage gelegt. Das **64 MW** Kraftwerk soll im Juni **2007** an das Stromnetz der Nevada Power und der Sierra Pacific Power Company gehen und 40.000 Haushalte mit Strom versorgen.

Tatsächlich liefern die insgesamt 219.000 Parabol-Einzelspiegel mit einer Gesamtlänge von 76 km der **Nevada Solar One** Anlage ab Juni **2007** Energie für (nur) 14.000 Haushalte, wie es nun heißt, obwohl der Output tatsächlich **64 MW** Strom erreicht. Die Dampfturbinen liefert der Bereich Power Generation (PG) von Siemens. Das 130 ha große und 266 Mio. \$ kostende solarthermische Kraftwerk wird übrigens von der spanischen Firma Acciona Energy in Betrieb genommen, die außerdem ein weiteres, mit **200 MW** genau drei Mal so großes Parabolrinnen-Kraftwerk im Westen der USA plant, mit dessen Bau in drei Jahren begonnen werden soll. Als Standort kommen New Mexico, Arizona oder Nevada in Frage.



*AndaSol 2*

Im Juli **2006** beginnt Solar Millennium (endlich) mit dem Bau des ersten Parabolrinnen-Kraftwerkes in Europa. Das **Andasol 1** getaufte Projekt in der Sierra Nevada im spanischen Andalusien – rund eine Autostunde von den Urlaubsorten der Costa del Sol entfernt – wird mit seiner Kollektorfläche von mehr als 510.000 m<sup>2</sup> und einer elektrischen Leistung von **50 MW** nach seiner Fertigstellung **2008** das größte Solarkraftwerk der Welt sein. Mit 179 Gigawattstunden Strom pro Jahr soll es rund 200.000 Menschen versorgen.



*AndaSol 3*

Die Parabolspiegel stammen aus dem Hause des bayrischen Glasspezialisten Flabeg. In den armdicken Röhren, auf die das Sonnenlicht fokussiert wird, zirkuliert ein spezielles Öl, das sich dabei auf knapp 400°C aufheizt und seine

## Die Almería-Anlage



*Die Almería Anlage*

Die europäische Versuchsanlage Plataforma Solar de Almería (PSA) mit Gesamtleistung von anfänglich **1 MW** wird ab **1978** gemeinsam von der ERDA und der Internationalen Energie Agentur (IEA) geplant und ab **1980** in südspanischen Taberna in der ‚andalusischen Wüste‘, etwa 35 km von der Hafenstadt Almería entfernt realisiert. Geleitet wird die Anlage zuerst von der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt DFVLR (später DLR), nach einige Jahren Probetrieb wird sie ab **1985** gemeinsam von einem spanischen Träger und der DLR betrieben.

Das Besondere dieser Anlage ist, daß hier mehrere der zuvor genannten Arten der Hochtemperatur-Sonnenenergienutzung nebeneinander umgesetzt werden, jeweils als separate **500 kW**-Anlagen. Dies macht es leichter, wirklich vergleichbare Meßergebnisse zu erhalten.

Die Almería-Region wurde deshalb ausgewählt, weil sie mit ihren über 3.000 Sonnenstunden pro Jahr doppelt so viel hat, wie die meisten nordeuropäischen Länder. Bei einem erfolgreichen Versuchsverlauf plant die IEA den Bau einer zehnmal so großen Anlage in den USA. Für die Almería-Anlage rechnet man mit einer Lebensdauer von 10 Jahren. Dabei soll insbesondere untersucht werden, welches der Hochtemperatursysteme längerfristig das erfolgreichere ist.



*Almería Parabolrinnen*

Die erste Einzelanlage ist eine **500 kW Sonnenfarm** mit drei Feldern aus ein- oder zweiachsig nachgeführten Rinnenkollektoren, die mit Öl als Temperaturträger arbeiten, das sich in den Rohren der drei Hohlspiegelsysteme auf 250°C – 295°C aufheizt und einen Dampfgenerator betreibt. Die zweite Komponente ist ein **500 kW Sonnenturm** mit 90 etwa 40 m<sup>2</sup> großen computergesteuerten Spiegeln. Diese werfen ihre Strahlen auf einen Receiver mit flüssigen Natrium, der an der Spitze eines 80 m hohen Turmes befindet, wodurch das Natrium auf etwa 530°C erhitzt wird. Das Natrium-Volumen von 70 m<sup>3</sup> gewährleistet, daß das Kraftwerk nach Sonnenuntergang noch zwei Stunden lang seine volle Leistung von 500 kW abgeben kann. Etwa 70 % der Heliostaten stammen von den US-Firmen Acurex und Martin Marietta, die übrigen sind bei MAN gefertigt. Die dritte Komponente ist der zweite **Sonnenturm** Central Termosolar de Almería (**CESA-1**), der **1983** von Spanien alleine errichtet und vom Ministerium für Industrie und Energie finanziert wird. Die Anlage besteht aus 300 Spiegeln mit jeweils 39,6 m<sup>2</sup> Fläche in 16 Reihen, und einem Wasser/Dampf-Receiver, der 520°C bei 100 bar erreicht. Sie leistet **1 MW** und besitzt ebenfalls einen Wärmespeicher. Im Rahmen des Deutsch-Spanischen GAST Technologie-Programms wird **CESA-1** dann bis **1987** untersucht.

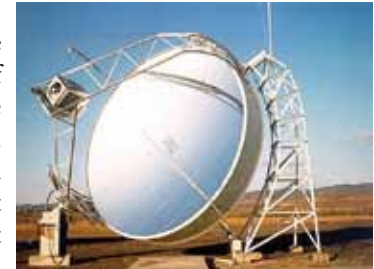


*CESA I*

Im DFVLR-Jahresbericht von **1984** wird angegeben, daß es ein großes technisches Problem mit dem Verschmutzungsgrad der Spiegel gibt, deren Reflexionsgrad täglich zwischen 0,25 % und 0,30 % sinkt. Außerdem zeigt sich, daß ein Betrieb bei einer Einstrahlung unterhalb von 300 W/m<sup>2</sup> nicht mehr sinnvoll ist. Die Solarturm-Anlage erreicht einen Wirkungsgrad von 8 % , der sich durch einen Salz-Wärmespeicher mit besonderen – bislang allerdings noch nicht entwickelten – Wärmetauschern allerdings bis auf 18 % steigern lassen soll. Bei den Rinnenkollektoren wird angegeben, daß sich dort eine Sonnennachführung nicht lohnt, selbst an einem klaren Tag konnte der Wirkungsgrad nicht über 5,4 % angehoben werden (man hatte mit 9 % – 10 % gerechnet). Durch schlechtes Wetter gibt es Betriebsunterbrechungen bis zu 10 Tagen hintereinander.

**1986** wird bei Wartungsarbeiten ein Natriumbrand ausgelöst, der die Maschinen und die Versorgungshalle zerstört. Der Sachschaden wird auf rund 10 Mio. DM beziffert, doch besonders schmerzlich wird der Verlust der Computeranlage bewertet. Da man jedoch ohnehin zu diesem Zeitpunkt einen Umbau des Natrium- zu einem Salz-Kreislauf plant, wird die Versicherungssumme gleich entsprechend eingesetzt.

**1991** wird auf dem Testgelände von Almería ein **Solarofen** für den Höchsttemperaturbereich in Betrieb genommen. Der Ofen besitzt vier rund 54 m<sup>2</sup> große ebene und sonnennachgeführte Spiegel, die ihr Licht gemeinsam auf einen sekundären Parabolspiegel richten. Dieser konzentriert die Sonnenstrahlung auf einen Fokus in der Mitte des Solarofen-Gebäudes, wo Temperaturen bis 3.000°C erreicht werden. Man testet dort u.a. hochtemperaturbeständige Keramiken.



*DISTAL I*

Ab **1992** werden drei **DISTAL I** dish-Systeme mit einem Durchmesser von jeweils 7,5 m untersucht, die mit SOLO V160 Stirlingmotoren eine thermische Leistung von **40 kW** erreichen. Bei diesen Konzentratoren wird zum Verformen der Reflektorfolien ebenfalls die oben beschriebene Vakuumtechnik eingesetzt. Der Reflektionsgrad beträgt 94 % und der Konzentrationsfaktor kann 12.000 erreichen.

**1996** und **1997** werden drei Nachfolgemodelle **DISTAL II** in Betrieb genommen. Sie haben einen Durchmesser von 8,5 m und erreichen **50 kW**, der Konzentrationsfaktor beträgt 16.000.

**1996** besteht das inzwischen weiter ausgebauten Versuchsfeld – neben den Laboren und einer Meteorologischen Station – aus folgenden Installationen:

Zwei Solartürme mit 2,7 MW und 7 MW Solarfarm mit 1,2-MW mit angeschlossenen Wärmespeicher und Wasserentsalzungs-Anlage:

- DISS Testschleife mit 1,3 MW loop
- HTF Testschleife für Ölkreisläufe
- DISTAL System aus 6 dish/Stirling-Konzentratoren
- Solarofen mit 60 kW Versuchsanlage zur solaren Entgiftung mit mehreren Rinnenkollektoren und drei Photoreaktoren
- SOLFIN-Anlage (Solar Fine Chemicals Synthesis)

Mitte **1998** beginnt man in Deutschland damit, die Forschungsgelder für die Hochtemperatur-Solarthermie bis **2000** auf Null herunterzufahren. Schließlich seien die Systeme nach Investitionen von mehr als 400 Mio. DM marktreif – und die Markteinführung müsse nun konsequenterweise die Industrie besorgen. Deutschland kündigt daher den Kooperationsvertrag mit Spanien, wodurch die Plataforma die Hälfte ihrer Basisfinanzierung verliert. Wohlgedemerk: Zur Debatte steht eine Einsparung von kaum mehr als 2,5 Mio. DM jährlich, nicht einmal 1 % des damaligen Etats für erneuerbare Energien. Weil Geld demnach nicht alleine den Ausschlag gegen Almería gegeben haben kann, spekuliert man über andere Motive.

Die Spanier sind gezwungen (und entschlossen), alleine oder mit neuen Partner weiterzumachen.

**1999** wird in Almería eine neue Versuchsanlage gebaut, die ebenfalls nach dem DISS-Verfahren arbeitet (Direct Solar Steam), bei dem Ölpumpe und Wärmetauscher überflüssig sind. Die noch immer aktive DLR führt Probeläufe mit einem neuen Heißluft-Receiver durch, der 800°C erreicht, was einem Wirkungsgrad von 60 % entspricht. Für Großanlagen mit höheren Betriebstemperaturen um 1.300°C sollen mehrere Receiver in Modulbauweise miteinander gekoppelt werden. Hierfür arbeitet man daran, das feine Drahtgeflecht innerhalb des Receivers, an dem die Luft erwärmt wird, gegen hitzbeständigere Keramikbauteile auszutauschen. Die DLR-Receiver-Module erreichen eine Leistung von **350 kW**.

Daß Solarkraftwerke auch noch anders genutzt werden können beweist das GRAAL-Projekt (Gamma-Ray Astronomy at Almería). Die derzeitige effektivste Methode zum Nachweis von Gammastrahlung mit



*CESA 3 Heliostaten in der GRAAL-Konfiguration*

Energien von 30 GeV bis zu einigen TeV ist die Messung der schwachen ‚Cherenkov‘-Lichtblitze, die beim Eindringen des hochenergetischen Photons in die Atmosphäre in einem ‚Luftschauer‘ ausgesandt werden.

GRAAL nutzt ab August **1999** hierfür einen Teil (2.500 m<sup>2</sup>) der enormen Spiegelfläche des ‚CESA-1‘ Heliostaten-Feldes, das von der spanischen CIEMAT an der ‚Plataforma Solar de Almería‘ (PSA) betrieben wird. Die Spiegel konzentrieren das Licht auf sogenannte ‚Winston Cones‘, die sich in einer von GRAAL entwickelten Plattform in einem Zentralturm nördlich des Spiegelfeldes befinden.



Ein wichtiges Argument für diesen Versuchsaufbau war die große Kostenersparnis durch die Nutzung eines bereits vorhandenen Spiegelfeldes bei Nacht, wenn es nicht solar genutzt werden kann. Dies erfordert auch einen nicht zu aufwendigen Detektoraufbau im Zentralturm und erlaubt seit dem Sommer **2000** sogar einen ferngesteuerten Betrieb. Außerdem wird Ende der **1990er** Jahre der **EuroTrough**-Kollektor getestet, der im Rahmen einer Zusammenarbeit der Industriepartner Abengoa, Flabeg Solar, der DLR und dem Ingenieurbüro Schlaich, Bergermann & Partner entwickelt wurde.



*CESA 10*

Die Hauptaktivitäten in Almería konzentrieren sich inzwischen auf fünf Hauptbereiche:

Systementwicklung in der solaren Elektrizitätserzeugung  
Industrielle Thermische Prozesse wie Meerwasserentsalzung  
Solare Chemie wie die solare Entgiftung und Wasseraufbereitung durch konzentrierte solare UV-Strahlung, sowie die chemische Feinsynthese (im Projekt SOLFIN)

Material-Untersuchungen im Solarofen

Wissenschaftliche Austauschprogramme

In der Anlage von Almería gelingt es Anfang 2003 erstmals, durch Solareinstrahlung Luft so stark aufzuheizen, daß damit eine Gasturbine angetrieben werden kann. Grundlage des Kraftwerks sind drei Solartürme, auf deren Spitzen eine Vielzahl von Spiegeln das Sonnenlicht konzentrieren. Die Spiegel werden dabei der Sonne nachgeführt und reflektieren rund das 500-fache der normalen Sonnen-Einstrahlung auf die Turmspitzen. In den Turmspitzen sitzen als Energieabsorber neu entwickelte volumetrische Receiver, die aus einer stark porösen Metall- oder Keramikstruktur bestehen, die sich durch die extreme Einstrahlung sehr hoch erhitzt. Die Luft strömt durch die Hohlräume, erhitzt sich dabei selbst und strömt dann zur Gasturbine. Während die Receiver zusammen genommen auf eine Leistung von 1 MW kommen, erzeugt die Gasturbine daraus 250 kW elektrische Leistung.

Bisherige Turm-Solarkraftwerke waren einstufig ausschließlich mit Heiß-Dampf-Turbinen ausgestattet. Die neue Technik erlaubt es dagegen, mit der die Gasturbine verlassenden, immer noch heißen Luft über einen Wärmetauscher zusätzlich Dampf zu erzeugen und mit diesem eine nachgeschaltete Dampfturbine anzutreiben. Dadurch läßt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 58 % erzielen. Das Projekt wird von deutscher Seite vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), und von spanischer Seite von der Plataforma Solar de Almería betrieben, hinter der das spanische Wissenschafts- und Technologie-Ministerium steht.

## Gemasolar, das Solarturm-Kraftwerk mit Flüssigsalz-Speicher

Ende 2010 wurde eine riesige Konstruktion in Südspanien fertig gestellt: ein 140 Meter hoher Betonturm, umgeben von einem Feld aus 2.650 großen Spiegeln, jeder etwa zehn mal zehn Meter groß, auf einer Fläche von 18 Hektar. Das Solarturm-Kraftwerk mit einer Nennleistung von 19,9 Megawatt steht auf halbtrockenem Ackerland in der spanischen Provinz Sevilla und ist das erste dieser Bauart. Es könnte zum Vorbild von solarthermischen Kraftwerken auf anderen Kontinenten werden, denn es macht diese Art Solarstrom-Erzeugung zu einer etablierten Technologie. Nicht das Spiegelfeld oder der Zentral-Receiver dieser



*Das Solarturm-Kraftwerk Gemasolar*

Anlage sind wegweisend, sondern das, was durch den Receiver läuft und die 14 Meter hohen und 36 Meter breiten Tanks am Fuß des Turms füllt.

Gemasolar ist das erste solarthermische Großkraftwerk, das Flüssigsalz als Wärmespeicher benutzt. Es wird auf 565 Grad Celsius erhitzt und hat eine Speicherkapazität von 15 Stunden. Die Auswirkungen dieser Technologie sind enorm: Gemasolar liefert nicht nur zu Sonnenzeiten Strom, sondern bei Bedarf rund um die Uhr, ohne die beträchtlichen

Kosten, die bei einer Batteriespeicherung anfallen würden. Auf Grund seines Flüssigsalzspeichers, der auch die Nächte überbrückt, ist Gemasolar das erste solarthermische Kraftwerk der Welt, das Strom rund um die Uhr flexibel nach Bedarf bereitstellen kann, vergleichbar mit einem Erdgas-Kraftwerk.

Gemasolar ist das erste Solarturm-Kraftwerk mit einem Wärmespeichersystem mit mehr als 560 Grad Celsius.

Hier kommen 8.500 Tonnen flüssiges Natrium- und Kaliumnitratsalz zum Einsatz. Dieses nimmt im zentralen Receiver 95 Prozent der Sonnenwärme auf, wird dann zum Speichertank geleitet. Mit einem Teil der Wärme wird über einen Wärmetauscher Dampf erzeugt.

Mit der direkten Erwärmung des Flüssigsalzes unterscheidet sich die Anlage von früheren Konstruktionen wie Andasol 1. Das Parabolrinnenkraftwerk Andasol

nutzt Thermalöl, das die Wärme an das Flüssigsalz abgibt. Nach Angaben von Torresol Energy haben Solarturm-Kraftwerke einige Vorteile gegenüber Parabolrinnen-Kraftwerken: Gemasolar verzichtet auf bewegliche Rohrsysteme, Drehgelenke und



*Aufbau des Werkes (Grafik)*



*Luftbild der Anlage*

Thermalöl. Daher bestehe auch keine Brandgefahr, und es könne nichts auslaufen. Außerdem führe die Konzentration der Flüssigkeit auf kleiner Fläche zu geringeren Wärmeverlusten und Wartungskosten.

Auch das Speichersystem habe technische Vorteile: Kurzzeitige Leistungseinbrüche, wie sie bei Anlagen ohne Speicher beim Vorbeiziehen von Wolken entstehen, verkürzen die Lebensdauer der Turbinen. Mit der



*140 Meter hoher Betonturm*

Speicherlösung werden somit Lastschwankungen ausgeglichen und die Turbinenleistungsfähigkeit erhöht. Da ein Großteil des Salzes zu Speicherzwecken verwendet wird, ist die Leistung der Turbine geringer, als von einer Anlage dieser Größe erwartet wird. Der Wärmereceiver hat 120 MW Wärmekapazität, die Turbine jedoch nur 19,9 MW Leistung. Die Anlage soll laut Torresol Energy jährlich 110.000 Megawattstunden Strom erzeugen.

## **Planta Solar Fuente Alamo**

Ein Photovoltaik-Kraftwerk in Fuente-Alamo, Murcia in Spanien. Es umfasst eine Fläche von 62 Hektar (150 Acres). Das Kraftwerk hat eine Leistung von 26 Megawatt und einer jährlichen Produktion liegt bei 44 GWh, das entspricht Strom für 13.000 Haushalte zu versorgen.



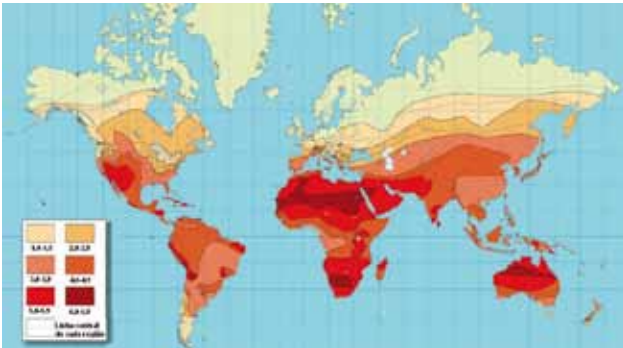
*Großer Teil Planta Solar Fuente Alamo Hanglage*



*Kleiner Teil Planta Solar Fuente Alamo Ebenenlage*

## Das Mittelmeer-Projekt (Desertec)

Die Idee, den Mittelmeerraum und besonders die Länder Nordafrikas zur Energieversorgung Europas zu nutzen, ist nicht neu. Die Wissenschaftler des Club of Rome entwickelten diesen Vorschlag schon in den **1970er** Jahren. Die hierfür benötigte Solarthermie-Technik – bei der anfänglich noch auf Wasserstoff als Energieträger gesetzt wurde – wird seit **1980** von Mitarbeitern des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) auf der ‚Plataforma Solar‘ bei Almería weiter verbessert. Doch erst in den **1990ern** wird damit begonnen, sich ernstlich über eine Umsetzung Gedanken zu machen.



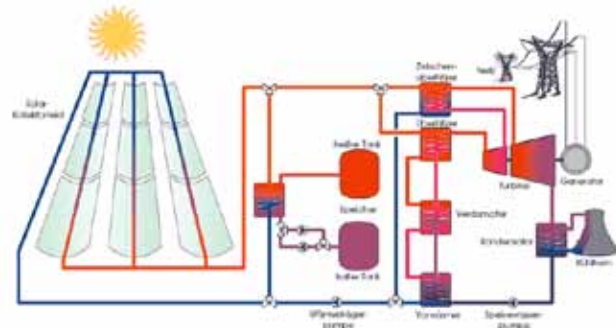
*Karte der Sonneneinstrahlung*

**1992** veröffentlicht das BMFT die Studie ‚Systemvergleich und Potential von solarthermischen Anlagen im Mittelmeerraum‘, an deren Erstellung zwischen September **1990** und September **1991** das ZSW, die DLR, Interatom/Siemens und das Ingenieurbüro Schlaich, Bergermann & Partner beteiligt waren. Untersuchungsraum sind die 19 Anrainer des Mittelmeers, sowie zusätzlich Jordanien und Portugal. Man errechnet insbesondere in Nordafrika eine potentielle Fläche von 0,51 Mio. km<sup>2</sup>, auf der die Anlagen errichtet werden können – unter Einbezug der maximalen Sonneneinstrahlung, und bei gleichzeitig ausreichender

Nähe zu bereits bestehenden oder geplanten Stromnetzen bzw. Straßen. An dieser Fläche haben die Länder Ägypten, Libyen und Marokko zusammen einen Anteil von über 75 %. Die hier prinzipiell installierbaren Kraftwerke hätten eine Leistung von 12.000 GW, was dem Vierfachen des weltweiten Stromverbrauchs entspricht (Stand **1992**).

Unter vorsichtigen Annahmen wird von einer bis **2005** erreichbaren Kapazität von 3.500 MW in den 16 Ländern des Mittelmeerraumes ausgegangen (die optimistische Variante nennt sogar 13.500 MW) – und bis **2025** könnten rund 23.000 MW (bzw. 63.000 MW) Solarstrom in die Netze eingespeist werden, was einen beachtlichen Anteil an dem für diesen Zeitpunkt in der Region erwarteten Bedarf von etwa 190.000 MW bildet. Mit einem derartigen Auf- und Ausbau solarer Kraftwerke ist bis **2005** ein Marktvolumen von 15 bis 60 Mrd. DM, und zwischen **2005** und **2015** von 90 bis 220 Mrd. DM verknüpft. Der Anstoß zum Bau derartiger solarthermischer Kraftwerke kann daher nur von den finanzstarken und technisch fortgeschrittenen Ländern kommen – so die Studie. Sollte sich ein weitreichender Stromverbund realisieren lassen, könnte auch ein Solarstromexport aus dem Süden in das Europäische Verbundnetz erfolgen.

Wie wir inzwischen wissen, verzögerte sich die Umsetzung in Wirklichkeit um weitere rund 10 – 15 Jahre.



*Geplanter Aufbau der Solarkraftwerke*



Die Grundidee lautet: Die sonnenreichen Staaten Nordafrikas und des Nahen Ostens bauen in ihren Wüsten Solarspiegel-Kraftwerke auf und produzieren Strom für den Eigenverbrauch und den Export. Mit der Restwärme der Kraftwerke sollen außerdem Meerwasser-Entsalzungsanlagen betrieben werden. Hinzu kommt der Bau eines europäischen Stromverbundnetzes aus **Hochspannungs-Gleichstromübertragungsleitungen** (HGÜ; englisch: High Voltage DC Cable, HVDC), die es erlauben, den Sahara-Solarstrom mit Windstrom aus Nordeuropa sowie Strom aus Wasserkraft aus Skandinavien und der Alpenregion zu vernetzen.

Ein bestechendes Konzept, dessen Technik auch schon erprobt ist: Die Firma ABB beispielsweise verlegt seit Jahren sowohl unterseeisch als auch an Land HGÜ-Kabel. (Beim Norned-Projekt im Jahr **2008** wird in 410 m Tiefe ein 580 km langes Kabel zwischen Norwegen und den Niederlanden gelegt. Die Aktion dauert zwei Wochen und kostet 600 Mio. €. Das 11 cm dicke Kabel verbindet seither die Stromnetze beider Länder.)

Das Ziel ist die Etablierung von Energie-, Wasser- und Klimasicherheit für die Regionen Europa, Naher Osten (Middle-East) und Nord-Afrika (daher: **EU-MENA**), sowie ihre Kooperation auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien, um diese Ziele zu erreichen. Mit Hilfe solarthermischer Kraftwerke und Windparks soll die Wasserentsalzung und Stromerzeugung vorangetrieben werden, um den Strom dann mittels Hochspannungs-Gleichstromleitungen in diesen Ländern zu verteilen und (mit nur 7 – 15 % Übertragungsverlusten) bis nach Europa zu leiten. Ein neues HGÜ-Netz in Europa könnte zu Teilen auch unterirdisch verlegt werden – ein großes Plus.

Prinz Hassan präsentiert dem EU-Parlament Ende November **2007** das Weißbuch ‚Clean Power from Deserts - The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security‘. Um das Projekt auf den Weg zu bringen, sind etwa 10 Mrd. € nötig.

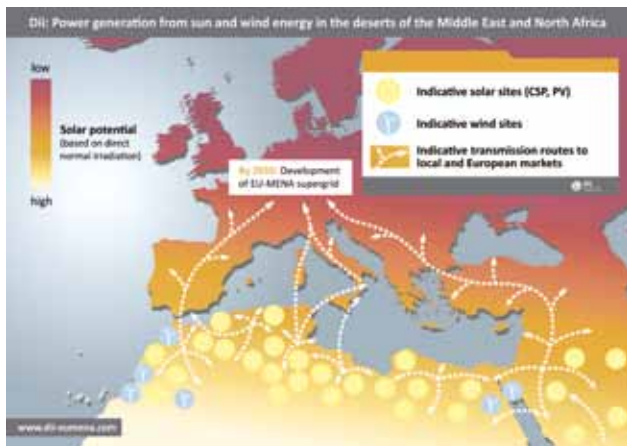


*EU-MENA Konzept*

Mitte **2008** bildet das Projekt, Strom aus der Wüste zu holen, ein wesentliches Element der **Union für das Mittelmeer** aus den EU-Staaten, den Mittelmeerrainern sowie Jordanien und Mauretanien (Union for the Mediterranean), eine Initiative des französischen Präsidenten Nicolas Sarkozy, deren Ziel es ist, die Interessen der EU und Nordafrikas einander näher zu bringen. Im gemeinsamen **Solarplan** wird verkündet, bis zum Jahr **2020** in der Region 20 GW an Kraftwerksleistung aus erneuerbaren Energien zu installieren. Davon sollen 10 – 12 GW solarthermisch erzeugt werden. Die geschätzten Kosten dieser Variante betragen gegenwärtig 82 Mrd. €.

Beim Euroscience Open Forum in Barcelona, einer jährlich stattfindenden Konferenz mit Wissenschaftlern und führenden Geschäftsleuten, schlägt eine Forschergruppe um Arnulf Jäger-Walden vom **Energieinstitut der EU** ein völlig neues Stromnetz namens **Supergrid** vor. Dieses arbeitet mit Gleichstrom und höheren Spannungen, erstreckt sich von Marokko bis Sibirien und von Ägypten bis nach Skandinavien, und wird von diversen alternativen Energieformen gespeist. Der hierfür angesetzten Summe von jährlich 1 Mrd. € bis **2050** stehen Ausgaben von

über 45 Billionen € (!) gegenüber, die der Ausbau der herkömmlichen EU-Energiesysteme nach Berechnungen der Internationalen Energie Behörde in den nächsten 30 Jahren verschlingen wird.



*EU-Mena Supergrid*

In Bezug auf das Desertec-Projekt selbst hagelt es derweil Lob und Kritik zugleich – und quer durch alle Fakultäten: Die einen sprechen von einem Meilenstein für die weltweite Nutzung von Solarkraftwerken in Wüstenregionen und von der größten privaten Ökostrom-Initiative aller Zeiten, während andere eingestandene Energieexperten das Desertec-Projekt als ‚Fata Morgana‘ bezeichnen, die politisch wie wirtschaftlich nicht ausreichend analysiert worden sei. Zum Teil sind den Kritikern aber auch die Mitglieder der Initiative nicht ganz geheuer, und E.on bzw. RWE werden verdächtigt, sich vielleicht nur deshalb beteiligt zu haben, um die Geschwindigkeit des Prozesses negativ zu beeinflussen. Schließlich bezeichnet sogar Fritz Vahrenholt, Chef der RWE-Sparte für erneuerbare Energien, die Erwartung, der Strom könne in großem Stil über die Alpen nach Deutschland transportiert werden, als ‚Wolkenschieberei‘. Das Konkurrenzunternehmen

Vattenfall hält das Projekt sogar für gänzlich unrealistisch. Noch einmal: Solarkraftwerke werden gebaut – die Frage ist nur wann, wo, von wem und für wen. Bei Desertec geht man inzwischen jedenfalls davon aus, daß 2050 bis zu 80 % des Sahara-Stroms den rasant wachsenden Bedarf in Nordafrika decken, und nur der verbleibende Rest nach Europa geleitet werden wird. Dieser Rest soll dann rund 15 % des europäischen Strombedarfs decken. Der Solar Millennium zufolge ist schon eine zunehmende Nachfrage nach solarthermischen Kraftwerken zu verzeichnen.

Bei der Gründung der **Desertec Industrial Initiative GmbH (DII)** im Oktober 2009 durch die o.g 12 Mitglieder wird beschlossen, zunächst die wirtschaftlichen, technischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen des Baus von Wüstenkraftwerken und grenzüberschreitenden Stromleitungen zu analysieren. Ein fertiges Konzept mit möglichen Standorten und den benötigten Investitionssummen soll dann im Jahr 2012 vorgelegt werden. Über die zwölf Gründungsgesellschafter hinaus werden vermutlich noch dieses Jahr weitere drei bis fünf Unternehmen aus verschiedenen Ländern als Gesellschafter oder Partner beitreten. In ihrem Koalitionsvertrag spricht sich die neue schwarz-gelbe Koalition für das Desertec-Projekt aus. Positive Signale kommen ferner aus Marokko, das in der nördlichen Sahara bereits geeignete Solarfelder identifiziert hat. Mehr auf Distanz bleibt dagegen Algerien, das mit Desertec nur dann zusammenarbeiten will, wenn auch Partnerschaften mit algerischen Firmen und ein entsprechender Technologietransfers vereinbart werden. Ganz meine Rede!

Bundeswirtschaftsminister Rainer Brüderle richtet im März 2010 eine ‚Task Force‘ für die Koordinierung zwischen der DII und der Bundesregierung ein – und sagt dem Wüstenstrom-Projekt die Unterstützung der Regierung über die Exportförderung zu.

Mitte März 2010 tritt das US-Solarunternehmen **First Solar Inc.** aus Arizona der DII als assoziiertes Mitglied

bei (Associated Partner), vorerst für drei Jahre. Es ist das erste reine Photovoltaik-Unternehmen, das bei Desertec mitmacht, da man der Meinung ist, daß die wartungsarme PV-Technologie, die schrittweise installiert und trotzdem sofort saubere Energie liefern kann, eine ideale Ergänzung zu den anderen Technologien der Initiative darstellt.



*Solartower und Solarrinnenkollektoren*

Zur gleichen Zeit steigen als feste Mitglieder vier neue Unternehmen ein: **Enel Green Power** (Italien), **Red Eléctrica de España** (Spanien), **NAREVA Holding** (Marokko) und **Saint-Gobain Solar** (Frankreich). Nach Verhandlungen mit der marokkanischen Regierung soll den Bau der ersten Sonnenkraftwerke im dortigen Teil der Sahara starten, da das Land eine bereits existierende Gleichstromleitung durch die Straße von Gibraltar besitzt, die als Teststrecke für die interkontinentale Einbindung von Solarstrom ins europäische Verbundnetz dienen kann. Marokko selbst will 9 Mrd. \$ investieren, um bis zum Jahr **2020** in fünf Solarkraftwerken 2 GW Energie produzieren zu können. Diese Kraftwerke sollen in den Regionen Ouarzazate, Ain Bni Mathar, Fom Al Oued, Boujdour und Sebkhah Tah errichtet werden, wobei die erste Station voraussichtlich **2015** in Betrieb gehen wird.

Nachdem Anfang Februar **2011** ein Presseartikel erscheint, in dem es heißt, daß die Wahrscheinlichkeit wächst, daß im Rahmen der Desertec-Initiative solarthermische Kraftwerke unter anderem in der von dem Königreich Marokko besetzten Westsahara errichtet werden sollen, erklärt die DII, daß sie definitiv kein Kraftwerk in der Westsahara planen oder errichten wird, da bei der Standort-Auswahl auch politische, kulturelle und ökologische Aspekte sorgfältig berücksichtigt werden.

Die Union für das Mittelmeer gibt im März **2011** die vier wichtigsten Ziele des **Mediterranean Solar Plan** (MSP) bekannt, der zu **20 GW** Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis zum Jahr **2020** führen soll. Da die involvierten Personen vermutlich in ihrem ganzen Leben noch nicht einmal einen einfachen Sonnenkollektor eigenhändig zusammengeschraubt haben, braucht man sich nicht darüber wundern, dass sie kaum über den Rand ihrer Schreibtische hinausblicken können. Und so hören sich die vier Ziele dann auch an:

- 1: Herausfinden, wie marktgerechte Projekte für erneuerbare Energien in großem Umfang geschaffen werden können, um in allen Partnerländern die Energiekosten zu senken und die Effizienz zu steigern.
- 2: Anstelle einer ‚road map‘ für den Frieden, solle eine für die Solarstromerzeugung erstellt werden, d.h. ein Solarplan der kurz-, mittel- und langfristig notwendigen Schritte zur Erreichung der Ziele im Energiebereich.
3. Es soll eine Plattform geschaffen werden, auf der die Vertreter der Mitgliedsstaaten - von denen viele bereits eigenen Ambitionen im Bereich der Erneuerbaren Energien folgen - ein Forum finden, um sich zu treffen und Ideen auszutauschen.
4. Schließlich soll der Solarplan als Schnittstelle und Drehscheibe für Projekte und Initiativen auf nationaler und regionaler Ebene dienen.

Im **Juni 2011**, und in Anwesenheit von König Mohammed VI, unterzeichnet die DII mit der marokkanischen

Agentur für Solare Energiesysteme (Masen) einen Kooperationsvertrag, um den Export der riesigen erneuerbaren Energiereserven Marokkos nach Europa zu unterstützen. Möglicherweise ist dies der erste Schritt, um die Initiative mit dem bislang separaten Energieplan des Landes zu vereinen. Die königliche Familie kann auf das DII-Projekt direkt Einfluß nehmen, da sie die Mehrheit an der **Nareva Holding** hält, dem marokkanischen Desertec-Mitglied.

### **Wüstenstrom, eine Fata-Morgana?**

Weil die Photovoltaik deutlich billiger geworden ist, gerät das vielversprechende Desertec-Projekt in die Bredouille.

Keine andere Errungenschaft grün inspirierter Technik erfüllt die Deutschen mit so viel Stolz wie der auf ihren Dächern erzeugte Sonnenstrom. Die meisten lieben den Strom aus den bläulich schimmernden Photovoltaik-Modulen – die einen, weil sie als Solarstromerzeuger in den Genuss staatlich organisierter Förderung kommen, die anderen, weil sie das gute Gefühl haben, sauberen Strom zu verbrauchen.

Womöglich erweist sich Desertec als großer Luxus. Einer, dem nicht nur RWE etwas abgewinnen kann, sondern der die Fantasie vieler Energiewendeanhänger beflügelt: das Vorhaben, Strom aus den menschenleeren, aber sonnenreichen Wüsten Nordafrikas, erzeugt mithilfe spektakulärer Spiegelparks, in die Steckdosen deutscher Haushalte und Betriebe fließen zu lassen. Inzwischen erweist sich diese Technik der Solarenergienutzung – Concentrated Solar Power (CSP) genannt – als reichlich teuer. Auch weil die Photovoltaik auf den Hausdächern im Vergleich dazu so billig geworden ist.

Tatsächlich sinken, anders als es die öffentliche Debatte vermuten lässt, die Kosten für den PV-Strom rapide. Der Preis für die Module ist allein seit Anfang vergangenen Jahres um rund 40 Prozent gefallen. Das macht nicht

nur die vom Bundestag beschlossenen Kürzungen bei der Solarförderung erträglicher. Obendrein bringt der Preisverfall die solare Konkurrenzenergie aus den Wüsten Nordafrikas regelrecht in die Bredouille.

Vor nicht einmal drei Jahren war die Vision namens Desertec den Anhängern der Energiewende fast so wichtig wie die Mondlandung. Wie Donnerhall war das Medienecho, als sich im Sommer 2009 zwölf Unternehmen unter Führung der Münchener Rück zusammenschlossen, darunter RWE, E.ON und Siemens, um den Solarstrom aus der Sahara marktfähig zu machen und nach Deutschland zu schaffen. Industriemanager, die Hochfinanz und selbst Greenpeace waren sich ausnahmsweise einmal einig: Desertec habe Zukunft.

Heute sagt Markus Lohr, Chefanalyst des Marktforschungsinstituts EuPD-Research in Bonn, er könne das Geschäftsmodell für die solarthermischen Wüstenkraftwerke, das technologische Rückgrat von Desertec, nicht mehr erkennen. Sven Teske, Projektmanager bei Greenpeace und Co-Autor eines Masterplans zur Rettung des Weltklimas, sagt, der Preisverfall bei der Photovoltaik habe die solarthermische Stromerzeugung »extrem unter Druck gebracht«. Das Fachblatt Erneuerbare Energien verabschiedete die CSP-Technologie bereits mit einem Artikel unter der Überschrift Abgesang auf Raten. Und Josef Auer, Energieforscher in Diensten der Deutsche Bank Research erklärt, das Rennen zwischen dem Wüstenstrom und anderem erneuerbaren Strom sei »offen und für Investoren insofern riskant«.

Die Skepsis kommt überraschend, denn die solarthermische Stromerzeugung hat sich bereits in der Praxis bewährt. Bei der Solarthermie kam es nicht zu den Kostensenkungen, die junge Technologien in wachsenden Märkten üblicherweise erfahren – während Förderprogramme den Weltmarkt für die kleinteiligen Photovoltaik-Anlagen rasch wachsen ließen. Dieses Wachstum hat die Technik so billig werden lassen, dass Solarstrom vom Dach selbst im eher schattigen



werden kann: für weniger als 20 Cent pro Kilowattstunde. Das ist weniger, als Haushalte für Strom aus der Steckdose zahlen müssen, und nicht einmal die Hälfte des Betrages, mit dem die Photovoltaik noch vor drei Jahren zu Buche schlug.

Branchenkenner gehen davon aus, dass auch in Zukunft die Erfahrung gilt: Verdoppelt sich die weltweit installierte Leistung, halbiert sich der Preis. Nicht nur der Dachstrom wird deshalb immer billiger, erst recht der PV-Strom aus mittleren oder großen Anlagen. Im Jahr 2015, meint der Marktforscher Lohr, koste die Erzeugung von Sonnenstrom aus solchen Anlagen in Deutschland nicht mehr als 9 Cent pro Kilowattstunde.

Der sagenhafte Preisverfall hat bereits dazu geführt, dass im Süden der USA reihenweise Photovoltaik-Großkraftwerke gebaut werden, wo ursprünglich solarthermische Stromfabriken geplant waren. Knapp 3.000 Megawatt Kraftwerksleistung sind umgewidmet worden, hat das amerikanische Marktforschungsunternehmen GTM Research ermittelt. Dazu gehört ein von dem deutschen Projektentwickler Solar Millennium konzipiertes Vorhaben in Blythe, Kalifornien. Das Erlanger Unternehmen, Mitglied der Desertec-Industrie-Initiative (Dii), ist inzwischen pleite.

Dennoch steht im Energiekonzept der Bundesregierung, wegen seiner Speicherbarkeit könne der Import von Strom aus solarthermischen Kraftwerken in Nordafrika »ein Baustein sein, um die künftige, bedarfsgerechte Energieerzeugung durch erneuerbare Energien auch in Deutschland sicherzustellen«. Weil CSP-Strom rund um die Uhr zur Verfügung steht und damit regelbar ist, ließen sich mit seiner Hilfe die Fluktuationen des daheim erzeugten Wind- und Sonnenstroms ausgleichen, so die CSP-Anhänger. 15 Prozent des Strombedarfs, hoffen sie, könne der Wüstenstrom beisteuern, im Jahr 2050.

Tatsächlich steht außer Zweifel, dass die Solarthermie noch deutlich billiger werden kann. Sinkende Kosten

versprechen vor allem Turmkraftwerke, die aussehen, als gehörten sie zur Kulisse eines Science-Fiction-Films. Drei solcher Anlagen stehen bereits in Andalusien.

Der Austausch des öligen Wärmeträgers durch Salz verspricht Kostensenkungen, zumal Salz ohnehin bereits als Wärmespeicher für die Nachtstunden dient. Kostensenkungen von 40 Prozent und mehr seien durchaus drin, sagt Robert Pitz-Paal, Direktor des Instituts für Solarforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Rund 10 Cent pro Kilowattstunde, teurer dürfe solarthermischer Strom am Ende nicht sein, soll er konkurrenzfähig werden, so der Experte. Heute kostet er mehr als doppelt so viel.

Immerhin, das Desertec-Konsortium hat inzwischen mit der marokkanischen Agentur für Solarenergie ein erstes Referenzprojekt vereinbart: 500 Megawatt (MW) Wüsten-Power. Über ein bereits vorhandenes Stromkabel soll Elektrizität auch nach Spanien geleitet werden, probeweise. Allerdings werden nach Lage der Dinge vorerst nur 150 MW als solarthermisches Kraftwerk geplant. Die restlichen 350 MW? Abwarten. Derweil eruiert Dii-Mitglied RWE, in Nordafrika zu investieren – in ein oder mehrere Photovoltaik-Kraftwerke.

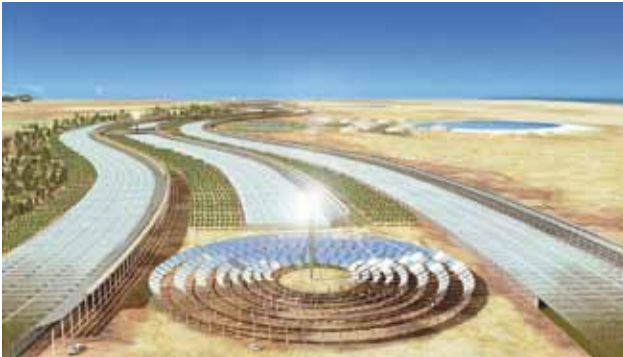
Zu allem Übel steht auch die Finanzierung des Referenzprojekts längst noch nicht. Die potenziellen Finanziers, darunter auch die Bundesregierung, seien »sehr vorsichtig, Geld auf den Tisch zu legen«, sagt Desertec-Mann Paul van Son. Ohne Darlehen, Zuschüsse oder Abnahmegarantien, so viel ist sicher, fließt aber keine Kilowattstunde Wüstenstrom.

Artikel aus der **Zeit Online vom 26.04.2012**

## Weitere Projekte

Neben Desertec gibt es noch diverse andere Vorschläge für ähnlich ambitionierte Projekte. Ein offener Wettbewerb zwischen den verschiedenen Technologielinien ist aber gut für die Sache und wird die Angelegenheit nur beschleunigen, denke ich.

Recht groß angelegt ist das **Sahara Forest Project (SFP)**, das **2008** von Charlie Paton (**Seawater Greenhouse Ltd.**), Michael Pawlyn (**Exploration Architecture**) und Bill Watts (**Max Fordham & Partners**) erdacht wird – als möglicher Weg, um Wüsten mittels Meerwasser-Gewächshäusern und Solarkraftwerken großflächig zur Lebensmittelproduktion zu nutzen. Die Energie für die Pumpen der Gewächshäuser sollen Solarturmkraftwerke liefern, deren Abwärme außerdem genutzt wird, um den Verdampfungsprozess des Meerwassers zu unterstützen.



*Sahara Forrest Projekt  
(Grafik)*

Paton, Erfinder dieser Gewächshausvariante, schätzt die Kosten einer solchen Anlage für einen 20 Hektar großen Gewächshauskomplex im Verbund mit einem 10 MW Solarkraftwerk auf 80 Mio. €, wobei eine solche Anlage deutlich mehr Strom und Trinkwasser erzeugen soll, als sie selbst benötigt. Der Überschuss soll verwendet werden, um

Obstbaum- sowie Jatropha-Pflanzungen zu bewässern, aus denen Bio-Treibstoff gewonnen werden kann.

Das SFP-Team geht von Synergien beim Zusammenspiel der beiden innovativen Technologien aus, die ihnen beiden zu einer jeweils effizienteren Funktion verhilft:

1. Die Solarkraftwerke benötigen Süßwasser zur Reinigung der Spiegel und zur Erzeugung von Dampf für die Turbinen. Dieses Wasser können die Gewächshäuser bereitstellen.
2. Die Gewächshaus-Verdampfer bilden sehr effiziente Staubfallen (wie natürlich wachsende Pflanzen), was den Solarkraftwerken zugute kommt, da die Spiegel sauber bleiben und damit effizienter arbeiten.
3. In den solarthermischen Kraftwerken wird nur etwa 25 % der gesammelten Sonnenenergie in Strom umgewandelt. In Verbindung mit Meerwasser können weitere 50 %, die sonst als Wärme an die Umgebung abgegeben werden, zur Entsalzung genutzt werden.



*Sahara Forrest Projekt  
in Jordanien (Grafik)*

Im Dezember **2009** präsentieren die Initiatoren gemeinsam mit der **Bellona Foundation**, einer internationalen Umweltschutzorganisation mit Sitz in Norwegen, ihre Vorschläge bei der UN-Klimakonferenz in Kopenhagen (COP15). Das positive Feedback führt zu weiteren Präsentationen, darunter eine in Oslo im Juni **2010**, bei der

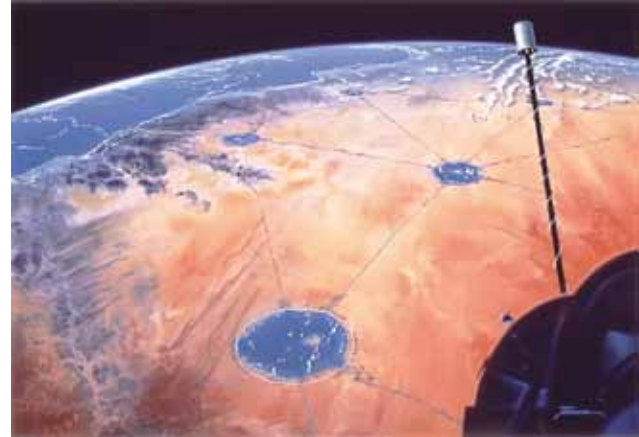
auch König Abdullah II von Jordanien anwesend ist. Dieser ist von dem Projekt so beeindruckt, dass er das SFP-Team auffordert, eine Machbarkeitsstudie zu erstellen. Immerhin gilt Jordanien als das weltweit viertärmste Land in Bezug auf die Ressource Wasser.

Anfang **2011** unterzeichnen Norwegen und Jordanien – unter Anwesenheit der Außenminister beider Länder – einen Vertrag, um die Entwicklung eines Pilotprojekts auf einem Küstengebiet in Jordanien zu ermöglichen, bei dem Gemüse angebaut und CO<sub>2</sub> absorbierende Algen gezüchtet werden sollen. Das gewählte Testgebiet ist ein 200.000 m<sup>2</sup> großes Landstück in Aqaba, der Küstenstadt im Süden von Jordanien. Die Vereinbarung umfasst zusätzliche 2 Mio. m<sup>2</sup> für eine spätere Expansion. Zu den Vertragspartnern gehören die Aqaba Special Economic Zone Authority (ASEZA) sowie die o.g. Bellona-Stiftung.

Das Projekt, bei dem statt einem Solarturm flache Fresnel-Konzentratoren eingesetzt werden sollen, sieht drei Entwicklungsstufen vor: Im Laufe des Jahres **2011** werden vertiefende Studien durchgeführt (mit 600.000 \$ von Norwegen gefördert), **2012** soll mit dem Bau eines Test- und Demonstrations-Zentrums samt einem Salzwasserkanal vom Roten Meer her begonnen werden, gefolgt von der Umsetzung in kommerziellem Maßstab ab dem Jahr **2015**.

Ein weiterer Vorschlag kommt von dem PV-Paneele-Hersteller **First Solar** in Tempe, Arizona. Karim Asali, Leiter der Abteilung Naher Osten und Afrika, betont in einem Blog der New York Times im Februar **2009**, dass alleine nur seine Firma in der Lage sei, im Laufe *nur eines Jahres* eine **Photovoltaik-Großanlage** mit einer Leistung von 1 GW zu errichten. Asali, der auch im Namen der European Photovoltaic Industry Association mit Sitz in Brüssel spricht, bestätigt, dass es technisch ohne weiteres machbar sei, in Nord-Afrika bis **2020** insgesamt 20 GW photovoltaischen Solarstrom zu erzeugen.

Zu den Projekten der **Shimizu Corp.**, die um **2009** unter dem Label Shimizu's Dream veröffentlicht werden gehört der **Desert Aqua-Net Plan**, bei dem in den Wüsten mittels Kanalnetzen



*Desert Aqua Net (Grafik)*

neue Meerwasser-Seen mit künstlichen, bewohnbaren Inseln geschaffen werden sollen.

Von den 30 km durchmessenden und 20 bis 30 m tiefen Seen wird erwartet, dass sie die extremen Temperaturen reduzieren und die Luftfeuchtigkeit steigern, um auf den künstlichen Inseln sowie in den Bereichen rund um die Seen ein angenehmes Wohnklima zu schaffen. Die 50 m breiten und 10 m tiefen Kanäle sollen genutzt werden, um Menschen und Güter zu transportieren und die rund 150 km auseinander liegenden Seen miteinander und mit dem Meer zu verbinden. Das Meerwasser in die Seen erlaubt Meeresressourcen zu kultivieren und zu nutzen, einschließlich Fischen und Biomasse-Materialien.

Die künstlichen Inseln sind als High-Tech-Oasen gedacht, in denen Technik und Natur harmonisch miteinander verbunden sind. Ihren Energiebedarf decken die Städte mittels Photovoltaik-Anlagen, welche das reichliche Sonnenlicht nutzen, oder durch die Errichtung von Energie-Empfangsanlagen für Solar-Satelliten in leeren Wüstenabschnitten.

Forscher der **Universität Tokio** um Hideomi Koinuma wiederum sind die Initiatoren des Sahara **Solar Breeder Projekts**, die Anfang **2011** in einigen Fachblogs beschrieben

wird. Die japanisch-algerische Initiative hat das Ziel, bis zum Jahr **2050** einen Anteil von 50 % des globalen Stromverbrauchs durch Sonne und Sand zu produzieren – und durch ein supraleitendes ‚Supergrid‘.



*Sahara Solar Breeder Konzept*

Im Rahmen des Projekts, das schon in diesem Jahr starten soll, werden rund um die Wüsten dieser Welt Fertigungsstätten gebaut, um aus Sand Kieselsäure (eine Sauerstoffsäure des Siliziums) zu extrahieren und daraus Solarzellen herzustellen. Aus diesen werden dann riesige Solaranlagen in der Wüste errichtet. Die grundlegende Idee dabei ist, dass die Energie, welche die erste Welle von Anlagen erzeugt, dazu verwendet wird, um in einem sich selbst reproduzierenden System weitere Silizium-Fertigungs- und Solaranlagen zu bauen usw. Dass dies machbar ist, weiß man spätestens seit **1977**, als J. Lindmayer auf der PV-Solarenergie Konferenz in Luxemburg seinen Vortrag **The solar breeder** hielt.

Unter der Schirmherrschaft des International Research Project on Global Issues (s.u. SATREPS) wird die offiziell **Sahara Solar Energy Research Center** (SSERC) genannte Initiative vom japanischen Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie sowie der Japan International Cooperation Agency (JICA) fünf Jahre lang mit jährlich 1,2 Mio. \$ gefördert.

Da dem Team aus Wissenschaftlern verschiedener Universitäten (die Universität Tokio, das National Institute for Material Science, die Universität Hirosaki, das Tokyo Institute of Technology, die Chubu University, das National Institute of Informatics und die Université des Sciences et de la Technologie d'Oran in Algerien) klar ist, dass diese Summe nicht annähernd ausreicht, um das Projekt zu verwirklichen, werden für diese erste Fünf-Jahres-Phase zwei Ziele gesetzt. Zum einen, die Möglichkeit der Herstellung von qualitativ hochwertigen Silizium aus Wüstensand, und zum anderen, den Aufbau eines Hochtemperatur-Supraleiter Langstrecken-Gleichstrom-Netzes zu demonstrieren.

Ende August **2011** findet im japanischen Nagoya das erste Asiatisch-Arabische Forum für nachhaltige Energie statt, bei dem das Sahara Solar Breeder Projekt samt Supraleitung wichtigstes Thema ist.

Fachleute gehen zu diesem Zeitpunkt davon aus, dass es noch mindestens 20 Jahre dauern wird, bis verlustfreie Hochtemperatur-Supraleiter für die Stromübertragung wirtschaftlich werden. Sofort einsetzbar sind dagegen Gleichstrom-Hochspannungsleitungen, die wesentlich geringere Leistungsverluste aufweisen als die bekannten Überlandleitungen. Es gibt auch schon genügend erfolgreiche Umsetzungen dieser Technologie. Zwischen den indischen Bundesstaaten Orissa und Karnataka fließen etwa 2 GW über eine 1.450 km lange Stromleitung, wobei sich der Verlust pro 1.000 km auf 1 – 3 % beläuft. Weitere Gleichstromkabel über mittlere Entfernungen liegen zwischen Dänemark und Schweden (Konti-Skan) und zwischen Norwegen und Dänemark (Cross-Skagerrak). Eine weitere Direktverbindung, die im Bau ist, ist das 260 km lange BritNed zwischen Großbritannien und den Niederlanden.



## Windkraft



*Windmühlen bei La Mancha - Spanien*

Mit der Sesshaftigkeit der Menschen in Europa hielten Ackerbau und Viehzucht Einzug und damit begann gleichzeitig die Suche nach stationären Energiequellen zur Erleichterung der neu entstehenden Arbeiten. Anfangs zerstiess man das Getreide mühevoll mit Mörsern, doch schon bald suchte man nach Erleichterungen mit weniger Arbeitsaufwand. Die ersten „Arbeitsmaschinen“ waren die Mühlsteine, die zunächst durch tierische Kraft in Bewegung gesetzt wurden und dann aber auch bald durch die gebotenen Kräfte der Natur. So entstanden Wassermühlen in der Nähe von Flüssen und Seen und Windmühlen im flachen Landesinneren. Die ersten Windmühlen mit waagerechter Achse für die Windmühlenflügel sind ab 1180 in Nordfrankreich, Belgien und Südostengland bekannt.

Der Windflügel als Antrieb für die ersten „Maschinen“ war geboren und leitete für immer mehr Menschen ein neues Zeitalter in der Arbeitsproduktivität ein. Nach der Erfindung des Rades war dies ein zweiter großer Quantensprung in der technologischen Entwicklung für die Menschen.

Das Naturelement Wind zur stationären Energiegewinnung beschäftigt uns heute mehr denn je. Unglaubliche Fortschritte konnten seit dem Ende der klassischen Windmühlen im 19. Jahrhundert erreicht werden.

Aber auch andere Entwicklungen, die die Möglichkeit der „Mühlentechnik“ für die Verwendung in Fahrzeugen aller Art betreffen, werden beschrieben. So hat der Einsatz der Windkraft zu den verschiedensten und zum Teil skurrilen Fahrzeugtypen geführt.



*Schwedischer Offshore-Windpark Lillgrund*

## **Mühlen: Standorte und Einsatzgebiete**

Im Mittelalter nahmen die Mühlen einen immer bedeutsameren Platz ein und wurden deshalb auch häufig auf die Stadtmauern gebaut, um sie vor feindlichen Übergriffen zu schützen. Später wurden sie aufgrund des von ihr zu nutzenden Windes außerhalb der Orte auf Bergrücken und auf freiem Feld gebaut. Da der Windmüller meist in der Nähe seiner Mühle sein Haus hatte, lagen Betriebsstätte und Wohnung des Müllers zumeist außerhalb der Dorfgemeinschaft. Dazu kam, dass Windmüller keine geregelten Arbeitszeiten kannten, sie mussten mahlen, wenn der Wind wehte, also zu allen Tages- und Nachtzeiten, unter der Woche und am Wochenende. Das machte sie für die Dorfgemeinschaft manchmal etwas suspekt.

Wenn man dazu bedenkt wie sich die Verwendungsmöglichkeiten von ursprünglich Mahlen und Schrotten von Getreide, Schälen (Pelden) von Gerste (Graupen) und Reis hin zu immer mehr Anwendungen erweiterte, kann man verstehen, dass die Handwerksgilden 1581 in den Niederlanden behaupteten, die Mühlen würden zur Arbeitslosigkeit führen. 1768 zerstörte eine aufgebrachte Menschenmenge im Osten Londons eine windgetriebene Sägemühle. Windmühlen wurden nicht überall gut aufgenommen. Als es im 18. Jahrhundert zur Gründung von Zünften kam, gelang es den Windmüllern erst sehr spät, diese Vorurteile zu überwinden und eine eigene Zunftgemeinschaft zu begründen.

Besonders das tägliche Mahlen und Schälen, war eine kräftezehrende Arbeit auf dem Reibstein in Kleinmengen, die mit Hilfe der Windmühlen nun effektiver und kräfteschonender gestaltet werden konnte. Später wurde das Mahlen und Zerkleinern auf andere Stoffe ausgedehnt – es entstanden Öl-, Senf-, Gewürz-, Farb- (Zerkleinern und Mischen von Mineralien und Erde), Steinschrot-, Pulver-, Gips-, Kreide- und Schnupftabakmühlen, weiterhin Dreschmühlen, Häckselmühlen und Lohmühlen,

in denen Eichenrinde zur Gerbsäuregewinnung für die Lederindustrie gestampft wurde. Hinzu kamen weitere Werkstoff verarbeitende Anwendungen als Schleifmühlen, Säge- und Hammermühlen für Holz und Metall, seit dem 14. Jahrhundert Drehbankmühlen, später Bohrmühlen (Rohre), Drahtziehmühlen, Walz- und Schneidemühlen zur Blechverarbeitung. Im 16. Jahrhundert waren in Europa mehr als 40 mühlenbetriebene Fertigungsprozesse bekannt. Auch zur Bergwerksbelüftung wurden Mühlen genutzt. In den küstennahen Gebieten der Niederlande kamen Windmühlen als Schöpf- und Pumpmühlen ab dem Jahre 1394 zur Entwässerung zum Einsatz und nutzten das lange bekannte Prinzip der Archimedischen Schraube. Eine weitere Pump-anwendung war das Anheben von Sole zur Berieselung in Gradierwerken zur Solekonzentrierung für die Salzgewinnung. Die Deutsche Gesellschaft für Mühlenkunde und Mühlenerhaltung (DGM) hat in einer Zusammenstellung über die Nutzung von Windmühlen 150 verschiedene mechanische Tätigkeiten, von A wie Abpumpmühle bis Z wie Zwirnmühle ermittelt.



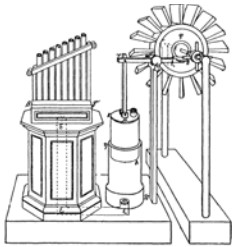
*Farbpigmentmühle „De Kat“  
im Freilichtmuseum „Zaanse Schans“ in Zaandam/(NL)*

## Chronologie ausgewählter Erfindungen zur Windenergienutzung

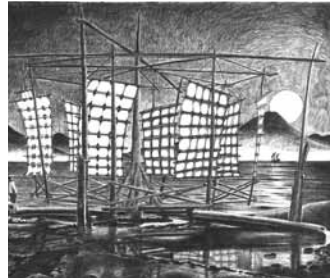
Zeit	Ereignis/Erfindung	Land	Bemerkung
1750 v. Chr.	Älteste Mühlen erwähnt	Babylon	werden auf Grund eines Gesetzes von Hamurabi vermutet.
60 n. Chr.	beschreibt Heron von Alexandria ein „Windrad“ mit waagrechter Welle zum Antrieb einer Wasserorgel.	Ägypten	Die Zeichnungen dazu stammen alle aus dem Mittelalter. Es sind keine weiteren Anwendungen aus der Antike bekannt.
943	beschreibt Ali al-Mas'udi die nützlichen Windmühlen im Gebiet von Seistan.	Iran	Die Winde wehen dort ca. 120 Tage gleichmässig stark (ca. 80 km/h), aus einer Hauptrichtung.
1180	Mühle mit leicht schräggestellter horizontal liegender Achse	F	Die Mühle ist durch die Kreuzzüge nach Europa gelangt.
1222	wird eine Windmühle auf der Stadtmauer von Köln erwähnt.	D	Wahrscheinlich Bockwindmühle und älteste Nennung für Deutschland.
Um 1300	stehen die ersten Turmwindmühlen.	Mittelmeer	Diese Angabe trifft vielleicht für Frankreich zu, da Vigevano solche Windmühlen voraussetzt.
1414	wird die Wippmühle in den Niederlanden erfunden.	NL	Wippmühlen dienten zum Anheben des Wassers mittels Archimedischer Schraube oder Schöpfrad.
1519	zeichnet J. Knobloch ein Aufwindkraftwerk.	D	Die Anlage betreibt einen Grill, welcher durch den Rauchabzug angetrieben wird.
1561	zeichnet Georg Agricola den Einsatz von Windkraftanlagen zur Belüftung im Bergbau.	D	Später werden Windmühlen zum Pumpen von Salzsole in Gradierwerken eingesetzt.
1586	beginnt der Betrieb von Papierwindmühlen	NL	Genua wird als Papierproduzent verdrängt.
1594	beginnt der Bau einer windgetriebenen Gattersäge durch Cornelisz van Uytgeest als Korkmühle.	NL	Jetzt können die Hölzer für die Schiffe, Häuser und Mühlen schneller gesägt werden, siehe Paltrockmühle.
1607	konstruiert Jan Leeghwater in Achtkant-ständerbauweise Poldermühlen, die „Holländermühle“, zur Entwässerung.	NL	Das Fundament war gemauert, damit es eine gleichmäßige Bodenbelastung auf dem weichen Boden ergibt.
1622	wird die Papiermühle „De Schulmeester“ gebaut, diese existiert heute noch.	NL	Importpapier war teuer, so lag es nahe dieses vor Ort rationell herzustellen.
Im 18. Jh.	- sind jeweils ca. 10 000 Windmühlen in England und den Niederlanden in Betrieb.	UK NL	Der Wohlstand der beiden Länder kann auch am Schiffbau gut abgelesen werden.

## Die Entwicklung der Mühlenformen in Laufe der Zeit

Älteste Windmühlen werden auf Grund eines Gesetzbuches des Königs Hamurabi um 1750 v. Chr. in Babylon vermutet. Die Beschreibung einer Orgel, die von einem Windrad angetrieben wird, ist die erste dokumentierte Nutzung des Windes für einen Antriebsmechanismus mit einer Windmühle. Sie stammt von dem griechischen Erfinder Heron von Alexandria, der im 1. Jahrhundert nach Christus lebte.



*Heron-Orgel*



*Chinesische Mühle  
ca. 25-220 n. Chr*

Die ersten Windmühlen bestanden aus einer senkrechten Achse, an deren Spitze zwölf Segel befestigt waren. Die Achse trieb den oberen von zwei Mühlsteinen an. Die Technik der chinesischen Windmühle weicht dabei von der persischen Windmühle deutlich ab, weil sie ohne jede Ummauerung freistehende, selbsttätig zum Wind ausrichtende Segel nutzt. Die Segel sind als Djunkensegel bekannt. Die persische Mühle mit Matten oder Latten am Rotor, welche wie die Schaufeln auf dem Rad eines Raddampfers angeordnet sind, muss in offenem Halbkreis ummauert sein, weil dort die Segelflächen unmittelbar starr mit der Drehachse verbunden sind und sich auf ihrer Kreisbahn nicht zum Wind optimal ausrichten können. Deshalb deckt hier eine halboffene Ummauerung den Teil des Rotors ab, bei dem sich die Flügel sonst mit abbremsender Wirkung gegen den Wind drehen müssen.

Als die Windmühlen, vermutlich im Verlauf der Kreuzzüge, Europa erreichten - 1180 wurde die erste in Frankreich gebaut - hatten diese frühen europäischen Mühlen eine völlig horizontale Achse, aber bald stellte man fest, dass sich das Lager unmittelbar hinter den Flügeln zu rasch abnutzte. Dies ließ sich vermeiden, wenn man die Achse am Hinterende leicht senkte und so das Gewicht mehr dorthin verlagerte. Gleichzeitig wurden damit die Flügel in eine günstigere Stellung zum Wind gebracht. Dadurch erzielte man eine größere Leistung; aber es galt nun, eine Antwort auf die Frage zu finden, wie man die Mühle stets so ausrichten konnte, dass der Wind am wirkungsvollsten genutzt wurde.

Der älteste Windmühlentyp in Europa ist die Bockwindmühle. Sie lässt sich seit dem 12. Jahrhundert in Europa nachweisen. Zunächst in der Region Belgien und Nordfrankreich bekannt, verbreitete sie sich im Laufe der Zeit über ganz Nordeuropa bis ins Baltikum, wobei sie vor allem im windreichen Norddeutschland anzutreffen war. Daher bekam sie dort auch den Namen Deutsche Windmühle. Bei diesem Typ Mühle ist das ganze Gebäude samt seinen teilweise schweren Maschinen drehbar auf einem Bock gelagert. Dieser stützt den senkrecht stehenden, meist rund ausgeführten Mühl- oder Hausbaum, der bis in die Mitte des Mühlengebäudes ragt und auf dessen oberem Ende der quer verlaufende vierkantige Mehlbalken, auch Hammer genannt, drehbar gelagert ist. Die Last wird über den Zapfen und den Sattel unter dem Gebäude auf den Hausbaum abgeleitet. Beide sind in Holz ausgeführt und brauchen ständige Wartung (Schmierung, Stabilitätskontrolle). An dieser drehbaren Konstruktion ist der gesamte ausgesteifte Mühlenkasten aufgehängt. Zur Unterstützung der Drehung ist unter dem Gebäude an der Rückseite der stabile Steert (plattdeutsch für „Sterz“, Steuerbalken an der Mühlenkastenrückseite) angebracht, der als Hebel die Drehbewegung unterstützt. Das Drehlager



ist demnach unter dem Mühlengebäude. Damit muss immer das gesamte Gebäude mit den Maschinen dem Wind nachgeführt werden. Zur Unterstützung wurden hier häufig Pflöcke um die Mühle in den Boden gerammt und die Mühle mithilfe eines Flasenzuges, der zwischen den Pfählen und dem Steert eingespannt wurde, herumgezogen.



*alte Bockwindmühle in Hannover*

Neue Typen entstanden, so ist eine **Turmwindmühle** ein aus Ziegel- oder Naturstein aufgemauerter Turm mit in die Dachkappe eingebautem Getriebe, Mahlwerk im Turmgebäude und angesetztem Flügelkreuz, wie sie seit dem 13. und 14. Jahrhundert auf Burgmauern, Festungsbauten und Stadtbefestigungen errichtet wurde. Die Flügel waren bei diesen frühen Exemplaren nicht in

eine andere Windrichtung drehbar und mussten so beim Bau in der Hauptwindrichtung am Mühlenturm angebracht werden. In Europa ist dieser Typ seit dem 14. Jahrhundert hauptsächlich in der Region um das Mittelmeer als dort eigener Typ bekannt. Einfache Getriebe, später auch Königswellen, übertrugen die Energie ins Gebäudeinnere



*Turmwindmühlen Geismühle, Krefeld*

zum Mahlwerk. In den Niederlanden haben zwei funktionsfähige Turmwindmühlen als Kornmühlen, aus der Anfangszeit dieses Mühlentyps, überlebt, in Zeddam (1441) und Zevenaar (1408).

Eine Sonderform einer Windmühle ist die **Westernmill**, welche zum Beginn des 20. Jahrhunderts in den Vereinigten Staaten von Amerika millionenfach verbreitet war und meist im Inselbetrieb auf Farmen wohl seltener zum Kornmahlen als vielmehr zum Wasserpumpen oder auch schon zur Stromerzeugung genutzt wurde. Bei dieser Bauweise ist der Name Windmühle weniger gebräuchlich, wohl wegen des unterschiedlichen Hauptverwendungszweckes und der Bauweise, bei der das Mühlengebäude durch eine einfache Gitterkonstruktion ersetzt wurde. Wegen der typischen Erscheinung mit einer Vielzahl von Flügeln wird diese Form auch amerikanische Windrose oder einfach nur Windrad genannt.



*Rotorkopf einer Westernmill*



*Westernmill bei Sonnenaufgang*

## Strom aus Wind - Die neuere Entwicklung der Windnutzung

Zeit	Ereignis/Erfindung	Land	Kommentar
<b>1841</b>	schlägt Floris Nollet die Nutzung der Windenergie für die Erzeugung von elektrischem Strom vor.	B	Sein Generator wird später zu einem wichtigen Baustein für die Beleuchtung von Leuchttürmen.
<b>1859</b>	werden in Dresden die Deutschen Windturbinenwerke Brauns GmbH gegründet.	D	Diese fertigt später Windmotorpumpen. Weitere Firmengründungen folgen.
<b>ab 1880</b>	entwickeln Thomas O. Perry und später mit LaVerne Noyes (1887) den Aermotor.	USA	Dies ist ein Windmotor mit Stahlurm, Blechflügeln und ohne Wartung.
<b>1885</b>	Wird die „Eolienne Bollée“ patentiert, eine Wasserpumpe des Franzosen Auguste Bollée	F	<b>1887</b> beginnt in Langenau eine Windmotorpumpe mit der Wasserförderung
<b>1887</b>	baut Charles Francis Brush die erste vollautomatische 12 kW WEA in Cleveland.	USA	Der Elektroingenieur ist zu Reichtum gekommen und baute sich eine eigene elektrische Energiestation auf. Weitere ca. 75 Anlagen folgen.
<b>1890</b>	arbeitet der Meteorologe Poul la Cour um 1890 an der elektrischen Umwandlung der Windenergie.	DK	Er gilt als der europäische Pionier in Sachen Windenergie. Unter anderem produziert er mit dem Windstrom Wasserstoff für Beleuchtungszwecke.
<b>1893-96</b>	nutzte der Polarforscher Fridjof Nansen eine WEA zur Energiegewinnung an Bord des Forschungsschiffs Fram.	N	Es handelt sich um einen Windflügelantrieb mit Gleichstromgenerator und Batterien.
<b>1918</b>	sind in Dänemark ca. 3 MW Leistung mit 120 WEA installiert. (Leistungsaufnahme zwischen 10 und 35 kW)	DK	Dies wird mit umgebauten Windmühlen geleistet. WEA sind teilweise bis 1940 in Betrieb. Ein Erfolg der beständigen Arbeit von la Cour.
<b>1932</b>	tritt Hermann Honnef mit seinen „Großwindkraftwerken“ an die Öffentlichkeit.	D	Hermann Honnef war Stahlbauingenieur und kannte die Windverhältnisse in 200 m Höhe.
<b>1968</b>	wird die Windenergieforschung in der BRD eingestellt.	D	Andere Energieträger werden kostengünstiger angeboten. Ökologie besitzt noch keinen Einfluss.
<b>1982</b>	baut das Ingenieurbüro Schlaich eine 50 kW-Aufwindenergieanlage in Spanien.	E	Die Anlage zeigt die Machbarkeit dieser Technologie.
<b>1985</b>	geht der erste dänische Prototyp eines Offshore-Windenergieparks in Betrieb.	DK	Steht bei Ebeltoft in Dänemark, von der Regierung gefördert. Die Anlagen haben zusammen 880 kW.
<b>2001</b>	geht der WEA-Park Walla Walla mit 300 MW ans Netz.	USA	399 WEA sorgen für diese große Leistung.
<b>2004</b>	hat die Windenergie die Wasserenergie als Anführer der erneuerbaren Energieträger abgelöst.	D	Wasserenergie war seit Jahrhunderten die dominante regenerative Energiequelle, seit der Römerzeit wurde sie mechanisch genutzt und ausgebaut.

## Technik des Rotorbaues

Erst in den **1920er** Jahren gewinnt man ein tieferes Verständnis der Rotorblatt-Aerodynamik, als u.a. der deutsche Physiker Albert Betz 1920 die aerodynamischen Grundkenntnisse verbessert und nachweist, dass die maximale Ausbeute von Windkraftanlagen aus physikalischen Gründen auf 59,3 % (16/27) limitiert ist (Betz'sches Gesetz).

Obwohl es diesen theoretisch maximal erreichbaren Wirkungsgrad von 59,3 % bei Windflügeln gibt, werden in der Praxis lange Zeit nur 33 % – 45 % erreicht. Als Gesamtanlage betrachtet, d.h. zusammen mit Getriebe, Generator und Steuerung erreichen Windenergieanlagen zur Stromerzeugung Wirkungsgrade zwischen 30 % und 35 %. Durch den windabhängigen Betrieb entstehen zudem Ausfallzeiten, so dass die durchschnittliche Arbeitsverfügbarkeit von Windkraftwerken 35 % – 45 % beträgt. Offshore-Anlagen auf offener See erreichen durch die dort vorhandenen höheren Windgeschwindigkeiten eine um 30 % – 70 % bessere Ausbeute als auf dem Festland. Der Techniker unterscheidet unter den Rotoren zwischen Langsam-, Mittel- und Schnellläufern. Während die ersten 7 und mehr Flügel besitzen und dafür eine geringe Umlaufgeschwindigkeit erreichen, haben die letzteren drei, zwei oder sogar nur einen Flügel (in diesem Fall mit Gegengewicht), womit sie sehr hohe Umdrehungszahlen erreichen und desto effizienter arbeiten, je stärker der Wind bläst. Mittelläufer liegen dazwischen und sind besonders für Gebiete durchschnittlicher aber konstanter Windtätigkeit geeignet. Im Verlauf der neueren Forschungen zeigt sich, dass Anlagen mit wenigen und schmalen Flügeln die höchste Energieausbeute erreichen. Der Typ, der sich fast weltweit als Standard durchsetzt, ist die dreiflügelige Windkraftanlage. Inzwischen zeichnen sich aber auch Entwicklungen ab, die den **Vertikalachssystemen** (s.d.) den Vorzug geben.

## Zeit der Wiederentdeckung und Potenzial

Das Windpotenzial der Erde wird auf über 4 Billionen kW geschätzt – eigentlich genug, um alle benötigte Energie alleine aus dieser Quelle zu schöpfen. Tatsächlich liegt der globale Anteil des Windes an der Energiebilanz aber unter 1 %, weil die kräftigsten Winde in den höheren Luftschichten bzw. weit draußen über den Ozeanen wehen.

Doch die Windenergie ist umweltfreundlich und selbsterneuend, zum einen durch die unterschiedlichen Temperaturen innerhalb der Biosphäre, welche zumeist sonnenbedingt sind, und zum anderen durch die Erdrotation, die den Auftriebskräften der erwärmten Luftmassen ihre Richtung gibt. Energietransformatoren auf Windbasis sind deshalb so interessant, weil besonders im Winter, also zu Zeiten des höchsten Energiebedarfs, der meiste Wind geht. Die lokalen Schwankungen in der Energieabgabe – oftmals das größte und schwierigste Problem bei der Windnutzung zu Energiezwecken – lassen sich durch ein weitverzweigtes Verbundsystem ausgleichen. Und der bei den Windmühlen oft so gefürchtete hohe Lärmpegel läßt sich durch die Anwendung besserer Materialien und durch eine hochentwickelte Rotortechnik stark senken.



*Windpark Havelland*

Im Folgenden sind die Ergebnisse einiger Potenzialstudien im Hinblick auf den europäischen Raum skizziert:

- 1982 - baut das Ingenieurbüro Schlaich eine 50 kW-Aufwindenergieanlage in Spanien. Die Anlage zeigt die Machbarkeit dieser Technologie.
- 1984 – erscheint eine Studie von MBB im Auftrag der EG: In den Ländern der EG können 150.000 kleine Windanlagen errichtet werden, außerdem gibt es 170.000 Standorte für Großwindanlagen mit mehr als 100 m Durchmesser.
- 1985 - geht der erste dänische Prototyp eines Offshore-Windenergieparks in Betrieb, steht bei Ebeltoft in Dänemark, von der Regierung gefördert. Die Anlagen haben zusammen 880 kW.
- 1993 – Der Europäische Windenergieverband (EWEA): Bis 2030 sollen 100.000 MW aus der Windenergie stammen, das wären ca. 10 % der europäischen Energieerzeugung.
- 1997 – Studie im Auftrag deutscher Industrieverbände: Durch den Ausbau der Windenergie bis 2005 auf 10.000 MW ließe sich knapp ein Viertel der geplanten Reduzierung des Kohlendioxid-Ausstoßes erzielen.
- 1999 – Der Bundesverband Windenergie (BWE): Ab 2003 wird sich die Zahl der Windkraftanlagen auf dem Land nicht weiter erhöhen, sondern von da an werden nur noch bereits bestehende Anlagen durch leistungsfähigere ersetzt. 2010 könnten auf dem Land 12.000 MW und durch Offshore-Anlagen 17.000 MW Leistung erzielt werden.
- 2001 - geht der WEA-Park Walla Walla / USA mit 300 MW ans Netz, 399 WEA sorgen für diese große Leistung.
- 2004 - hat die Windenergie die Wasserenergie als Anführer der erneuerbaren Energieträger abgelöst. Wasserenergie war seit Jahrhunderten die dominante regenerative Energiequelle, seit der Römerzeit wurde

sie mechanisch genutzt und ausgebaut

- 2006 – Der Präsident des Bundesverbands Windenergie gibt im Juli bekannt, dass im vergangenen Jahr 2005 weltweit neue Windkraftanlagen mit einer Leistung von 11.800 MW ans Netz gegangen sind, was der Jahresstromproduktion von drei Kernkraftwerken entspricht. Den Prognosen für den Windenergie-Weltmarkt zufolge werden ab 2020 pro Jahr weltweit Windkraftanlagen mit einer Leistung von rund 160.000 MW errichtet, was der tatsächlichen Leistung von 40 Kernreaktoren entspräche!
- 2007 - Der Weltmarkt für Windenergieanlagen nähert sich 2006 der Marke von 15 Mrd. €, 2005 waren es 10,6 Mrd.
- Anfang 2008 zeigt sich, dass die Windkraft weltweit „Aufwind“ hat. Der Global Wind Energy Council (GWEC) berichtet, daß 2007 weltweit rund 20 GW neu installiert wurden. Der Umfang der Neuinstallationen liegt damit um 30 % höher als 2006, und die weltweit installierte Leistung wächst um 27 %.
- Die Märkte wachsen in Asien rapide, 2007 werden immerhin schon mehr als ein Viertel aller Windräder in Fernost bzw. in Südasien installiert. Allein in der Volksrepublik China nimmt die Kapazität um 156 % zu, so dass sich dort bereits Windmühlen mit einer Leistung von 6 GW drehen, in Wettbewerb mit Indien, wo inzwischen 8 GW installiert sind.

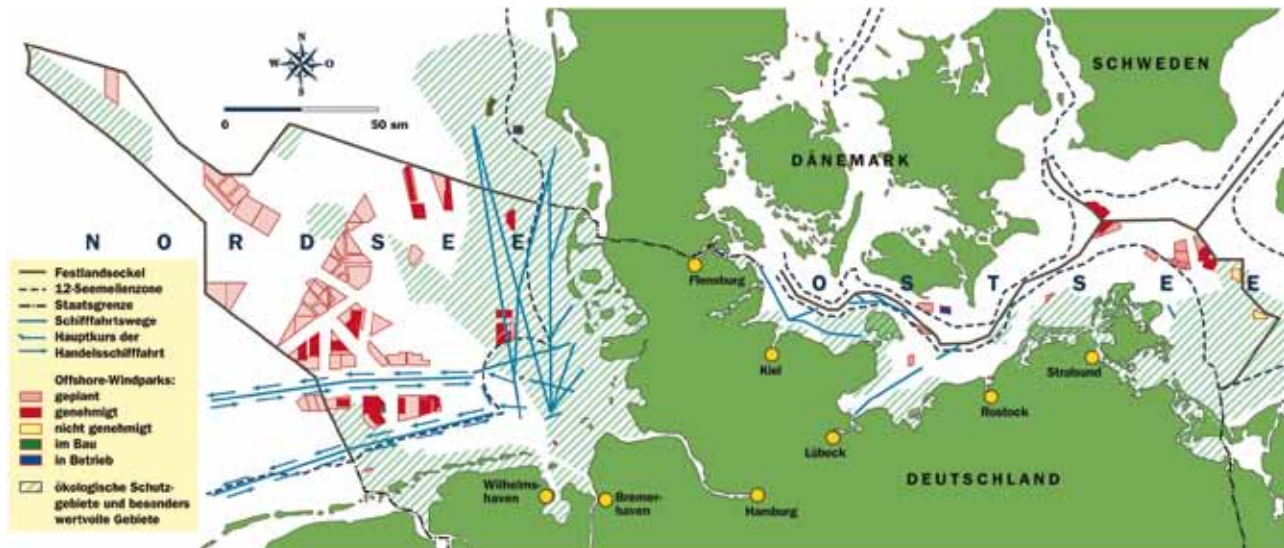


## Offshore-Windparks

In Deutschland ist die Errichtung großer Hochsee-Windparks (engl. Offshore-Windpark) in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) Deutschlands (außerhalb der 12-Meilen-Zone) geplant. 40 Offshore-Windparks sollen in der Nord- und Ostsee entstehen. Die deutsche Bundesregierung beschloss im Spätsommer 2009 einen Raumordnungsplan, wonach bis 2030 bis zu 25.000 Megawatt über Offshore-Windkraft erzeugt werden könnten. Laut Verkehrsministerium sollen 30 Windparks in der Nord- und 10 in der Ostsee gebaut werden. Bereits seit mehreren Jahren sind Windparks in Planung, doch deren Bau hatte sich immer wieder wegen technischer und finanzieller Probleme verzögert. Neben einer 6-MW-E-112-Anlage, die sich nur wenige Meter vom Ufer entfernt in der Ems an der Nordsee befindet, gibt es in der Ostsee noch eine 2,5-MW-Anlage, die sich in 500 Metern Entfernung von Warnemünde befindet. Das erste Hochsee-Windrad

wurde im Herbst 2005 im Breitling (Rostock) in Betrieb genommen. Der erste deutsche Offshore-Windpark in der AWZ „alpha ventus“ ging im April 2010 offiziell ans Netz. „BARD Offshore 1“ befindet sich derzeit in Bau. In anderen Staaten, beispielsweise in Dänemark, den Niederlanden oder England, sind bereits einige Offshore-Windparks errichtet worden und in Betrieb.

Bisher sind in der deutschen AWZ vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) 26 Offshore-Windpark-Projektemit insgesamt 1850 Windenergieanlagen (WEA) genehmigt worden, davon 23 in der Nordsee und drei in der Ostsee; zwei Anträge für die Ostsee wurden abgelehnt. Das entspricht nach Fertigstellung der Anlagen einer potenziellen Energieleistung von ca. 9 GW. Insgesamt laufen in der AWZ von Nord- und Ostsee Planungen für 95 Vorhaben.



*Karte der in der Nord- und Ostsee geplanten Offshore-Windparkgebiete und ihre Nähe zu Schiffsrouten*

Die langfristige Standsicherheit solcher Offshorebauwerke erhöht sich, je größer die Wassertiefe am Standort ist. Die Windenergieanlagen müssen sicher auf dem Boden gegründet werden. Es gibt dazu verschiedene Gründungsmöglichkeiten: Flachgründung mit und ohne Schürzen für flachere Gebiete, Monopile- (1 Pfahl), Tripod- (3 Pfähle) und Jacket-Gründungen (4 Pfähle) für tiefere Bereiche. Auf die Gründung der Bauwerke wirken neben dem eigenen Gewicht sowohl sehr starke Winde als auch die Strömung des Wassers und die Kraft der Wellen. Diese unterschiedlichen Kräfte wirken zyklisch und können sich addieren. In der Nordsee ist der Grund meistens sandig und damit relativ nachgiebig. Damit besteht die Gefahr von Langzeitverformungen, die die Standsicherheit der Anlagen gefährden.

Das Bremerhavener Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) koordiniert das HiPRWind-Projekt (High Power, High Reliability Offshore Wind Technology) mit einem Gesamtbudget von 20 Mio. Euro. Dabei sollen auch kosteneffiziente Ansätze für schwimmende Windenergieanlagen zum Einsatz in Offshore-Windparks entwickelt und getestet werden.

Hochseewindparks liefern ihre Energie über Seekabel an die Küste. Dort wird die Energie in das allgemeine Stromnetz eingespeist. Der weitere Ausbau der Windenergie an der Küste macht dort eine Verstärkung des Netzes erforderlich, um diese Energie vom Norden Deutschlands weiter in den Süden, wo sie benötigt wird, zu transportieren. Es spricht alles dafür, dass dieses über Hochspannungs-Überlandleitungen geschehen wird, da das isolierende Medium Luft sich im Falle eines Durchschlages selbst „heilt“ und Überlandleitungen somit billiger im Betrieb sind als bodenverlegte Kabel.

Bei längeren Übertragungsstrecken wird zur Energieübertragung von See zu Land die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) in Betracht gezogen. Aufgrund der Gleichstromübertragung fallen weniger Verluste an, da bei Gleichstrom keine induktiven Spannungsabfälle auftreten. Diese sind bei Erdkabeln besonders hoch, da die Kabelkapazitäten zu hohen Blindleistungsverlusten führen. Bei HGÜ fallen somit wesentlich geringere Verluste (nur ohmsche Spannungsabfälle) an als bei Wechselstromübertragung.

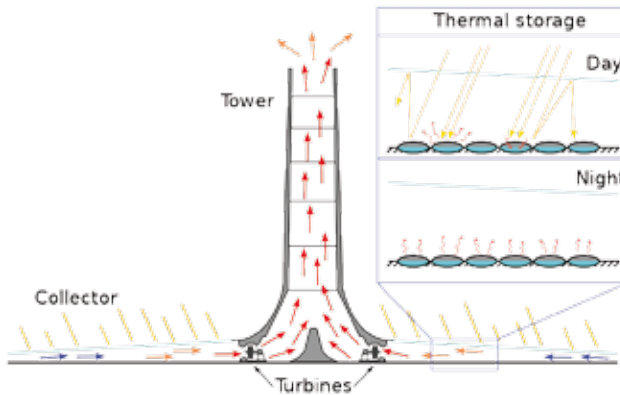


*Offshore-Windpark Middelgrunden, Øresund / Dänemark*

## Aufwindkraftwerk

Im Gegensatz zu vielen anderen Technologien ist das atmosphärenthermische Aufwindkraftwerk (auch ‚**Thermikkraftwerk**‘ oder ‚**Sonnenkamin**‘ genannt und oftmals dem Bereich der Sonnenenergie zugeordnet), interessant da es drei physikalische Prinzipien miteinander kombiniert: der Treibhauseffekt, der Kaminzug und der Windantrieb.

Die einfallende Sonnenstrahlung erwärmt die Luft unter einem mit Glas oder Folie gedeckten Kollektordach, das sich kreisförmig um den in der Mitte stehenden Kamin ausbreitet. Die um  $10^{\circ}$  bis  $20^{\circ}\text{C}$  (andere Quellen sprechen von  $15^{\circ}$  bis  $30^{\circ}\text{C}$ ) zusätzlich erwärmte Luft strömt zum Kamin und steigt in diesem auf. Verantwortlich dafür ist die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der aufgeheizten Luft unter dem Dach.



*Aufwindkraftwerk (Prinzip)*

Solche Aufwindkraftwerke benötigen sehr große Flächen. Sie eignen sich deshalb besonders für Wüsten und ähnliches sonnenreiches Ödland. Ihr Wirkungsgrad erhöht sich mit der Höhe des Kamins, und zwar nicht geradlinig, sondern überproportional. Mit der Höhe des Kamins steigt nämlich die Temperatur- und Druckdifferenz zur

Treibhausluft am Boden. Daraus resultiert wiederum ein zunehmendes Druckgefälle im Kamin, wodurch die erwärmte Luft angesaugt und in kinetische Energie, den Aufwind verwandelt wird. Windturbinen am unteren Ende des Kamins wandeln diesen Aufwind in elektrische Energie um. Die theoretischen Grundlagen dafür erst im Jahr **2000** durch **T. von Backstrom** and **A. Cannon** erarbeitet und veröffentlicht worden.

Bereits **1980** entsteht eine **100 kW** Versuchsanlage mit 200 m Höhe, 10 m Durchmesser und einem 45.000 Quadratmeter großen Glasdach (250 m Durchmesser – Höhe 1,85 cm, zur Mitte hin zunehmend) im spanischen **Manzanares**, etwa 150 km südlich von Madrid, die am **07.06.1982** ihren Betrieb aufnimmt.

Der Wirkungsgrad wird mit 1 – 2 % angegeben, die innenliegende vierflügelige Windturbine hat einen Durchmesser von 10 m und der heiße Wind erreicht die Stärke 6 (= 12 m/s).

Die Anlage funktioniert bis **1989**

zufriedenstellend und zeigt eine

hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit. Insgesamt erzielt die Anlage eine Durchschnittsleistung von rund 54 kW. Bei einem Orkan im Februar **1989** stürzt die inzwischen von Rost geschwächte Kaminröhre jedoch um und beendet damit den Versuchsbetrieb.



*Aufwindkraftwerk Manzanares*



*Aufwindkraftwerk Manzanares  
Schornstein und Blick durch das Plasiikdach*

Große Chancen werden einem Projekt bei Buronga, 23 km nördlich des Städtchens **Mildura / Australien** eingeräumt, in der südwestlichen Ecke des australischen Bundesstaates New South Wales. In **Tapio Station**, einem früheren Umschlagplatz für Getreide und Rinder, soll das erste kommerzielle Aufwindkraftwerk der Welt Australiens Bilanz in Sachen Klimaschutz aufbessern.

Die Firma EnviroMission Ltd. in Melbourne – Lizenznehmer der Stuttgarter Firma Schlaich Bergermann und Partner – arbeitet seit **2001** an diesem Projekt und will ab **2008** mittels 32 Turbinen mit einer Leistung von insgesamt **200 MW** elektrischen Strom produzieren, der die Stromversorgung von 200.000 Haushalten sichern soll.

Bei der Mildura-Anlage mit Stahlbetonturmrohre und Stahl/Glas-Luftsolkollektor (alternativ mit Kunststoffeindeckung) wird es sich um den weltweit höchsten Ingenieurbau handeln. Statt einer großen Windturbine im Schacht selbst sollen hier 32 Rotoren mit jeweils 6,25 MW Leistung ringförmig um den Kamin installiert werden. Rund 30 km<sup>2</sup> Glas oder transparentes Plastik und 400.000 Kubikmeter Beton muß die Firma verbauen, um den 1.000 m hohen und 130 m durchmessenden Schlot (damit wäre dieses gigantische Bauwerk das höchste auf unseres Planeten) sowie die dazugehörige Dachkonstruktion – Durchmesser 6 bis 7 km – zu errichten. Die Anlage wird damit eine Grundfläche von bis zu 38 km<sup>2</sup> bedecken. Durch Auslegen

von geschlossenen Wasserschläuchen unter dem Kollektordach wird ein kontinuierlicher 24-Stunden-Betrieb garantiert. Die Wasserschläuche geben die tagsüber gespeicherte Wärme in der Nacht wieder ab.

Auf bis zu 35°C über Umgebungstemperatur soll die Luft unter dem leicht zur Mitte ansteigenden Treibhausdach von der einstrahlenden Sonne aufgeheizt werden und mit bis zu 55 km/h (= Windstärke 7) im Kamin nach oben jagen. Beim dortigen Lufteintritt wird mit einer Temperatur von



*Aufwindkraftwerk Mildura  
(Grafik)*

70°C gerechnet. Nach 15 Jahren Amortisations-Laufzeit könnte das auf 80 Betriebsjahre ausgelegte Projekt zur Goldgrube für die Investoren werden. Zusätzlich erhofft sich das Unternehmen Einnahmen aus dem Tourismus und will die äußeren 500 m unter dem Treibhausdach an Gemüsebauern verpachten. EnviroMission schätzt die Kosten für das geplante Kraftwerk auf rund 400 Mio. €.

Anfang **2009** befindet sich das Mildura-Projekt weiterhin mit seinen ursprünglichen Abmessungen in Planung. Im April **2009** startet EnviroMission die erste Finanzierungsrunde, und ein Monat später wird in Phoenix, Arizona, die US-Tochterfirma EnviroMission (USA) Inc. gegründet, die anschließend unter dem Label SolarMission agiert.

Da die Finanzierung auch **2012** noch nicht steht ist das Projekt immer noch in der Planung.



Im Februar **2006** wird ein europäisches 40 MW Projekt unter dem Namen **Ciudad Real Torre Solar** bekannt. Der 750 m hohe Stahlbeton-Turm nahe dem spanischen Dorf Fresno Fuente auf halbem Wege zwischen Toledo und Ciudad Real soll eine Kollektorfläche von 250 Hektar bekommen und die Stromversorgung von 25.000 Haushalten sichern. Das Projekt wird von dem Ingenieurbüro Camp 3 in Zusammenarbeit mit der Universität von Castilla - La Mancha (UCLM) durchgeführt. Der Baubeginn des 240 Mio. € teuren Aufwindkraftwerks soll im Frühjahr **2007** sein, drei Jahre später könnte es in Betrieb gehen. Ein interessantes Detail am Rande: An der Spitze des Turmes soll ein Aussichtspunkt eingerichtet werden. Der Bau ist **2012** noch nicht begonnen.



*Ciudad Real Aufwindkraftwerk (Grafik)*

Im August **2008** wird der Plan bekannt, in **Namibia** für gut 900 Mio. \$ ein 1.500 m hohes und 280 m durchmessendes 400 MW Aufwindkraftwerk zu errichten. Damit könnte der gesamte Elektrizitätsverbrauch der Hauptstadt Windhoek gedeckt werden. Immerhin scheint dort an 300 Tagen im Jahr die Sonne. Der Greentower soll aus Stahlbeton errichtet werden, den eine 37 km<sup>2</sup> große landwirtschaftlich genutzte Kollektorfläche umgibt. Der Nachtbetrieb wird durch die tagsüber erfolgende Wärmespeicherung in jenem Wasser gesichert, das nachts zur Bewässerung der Anbaupflanzen eingesetzt wird.

Über den genauen Standort oder die Terminplanung ist bislang noch nichts Näheres bekannt. Die Namibische Regierung hat allerdings zugesagt, die Hälfte der Gesamtkosten

für eine aktuelle Machbarkeitsstudie von 780.000 \$ zu übernehmen. Der Bau ist **2012** noch nicht begonnen.



*Namibia Aufwindkraftwerk (Grafik)*

Ende **2008** stellt Michael Pesochinsky sein (bislang theoretisches) Konzept **Superchimney** vor. Ein derartiger Gigant von 5 km Höhe und mit 1 km Durchmesser soll etwa 330 GW (!) Strom erzeugen können – und aufgrund der Kondensation der oben austretenden Warmluft auch noch als Regenmaschine funktionieren.

Interessant ist auch der Vorschlag von **Christos Papageorgiou**, der den Turm nicht aus Metallrohren oder gar Stahlbeton, sondern aus beweglichen ‚Leichter-als-Luft‘-Strukturen gestalten möchte – daher der Name **‚Floating Solar Chimney‘**, der sich später zu **‚Solar Aero-Electric Power Plant‘** (SAEPP) wandelt.



*Kupplungssegment*

Der Kamin ist von heliumbefüllten Ringen umgeben, die ihm den nötigen Auftrieb verschaffen, während eine mit Druckluft gefüllte Trägerstruktur für seine Stabilität sorgt. Am Boden befindet sich eine blasebalgartige, flexible Kupplung, die dem Turm erlaubt, sich dem Wind anzupassen. Eine 100 MW Anlage mit einem beweglichen Kamin von 2 – 3 km Höhe und 50 – 85 m Durchmesser soll nur 35 – 70 Mio. € kosten. Der umgebende Kollektor würde einen Durchmesser von ebenfalls 2 – 3 km haben.



## Vertikalachsen-Rotoren

Vertikalachsen-Rotoren haben gegenüber konventionellen Systemen mit waagrechten Achsen folgende Vorteile:

Der Wind wird aus allen Richtungen aufgenommen, ohne dass eine Windnachführung benötigt wird.

Starke Windböen werden problemlos „geschluckt“, aufwendige Rotorblätter-Verstelleinrichtungen entfallen.

Auch bei Sturm muss die Anlage nicht stillgelegt werden (Horizontalachsenrotoren werden bei 24 – 27 m/s gestoppt).

Sie sind robuster, zeigen kaum Verschleiß, sind nahezu wartungsfrei und auch betriebskostengünstig, da der mechanische Aufbau weit weniger komplex ist.

Sie sind für längere Betriebszeiten ausgelegt.

Sie sind fast geräuschfrei.

Es sind keine besonderen Fundamente notwendig, eine Abspannung genügt in den meisten Fällen.

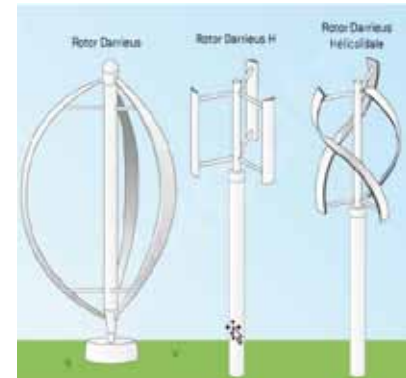
Ein wesentlicher Vorteil von Windrädern mit senkrechter Drehachse ist die Möglichkeit, sie in kleinerem Abstand zueinander aufzustellen, wie Forscher vom California Institute of Technology um John Dabiri im September 2009 feststellen. In Simulationen zeigen sie, dass derartige Windrad-Konstruktionen im Vergleich zu den heute üblichen Windpark-Anlagen sogar hundertmal mehr Energie pro Flächeneinheit erzeugen können. Das Manko heutiger Windräder ist nämlich, dass sie aufgrund der Luftverwirbelungen in großem Abstand voneinander aufgestellt werden müssen - bei Rotorblättern von 100 m Länge muss dieser mindestens 1 km betragen.

Die Computersimulation bestätigt eine besonders hohe Effizienz, sobald im und gegen den Uhrzeigersinn laufende Turbine dieser Art abwechselnd aufgestellt wurden. Die höhere Effizienz wird durch die Bewegung des jeweiligen Rotors nebenan erklärbar, die eine größere Luftströmung

bewirkt. Im Gegensatz zu den eher störenden Effekten bei Vertikalachs-Anlagen werden die Wirbel im vorliegenden Fall synergetisch genutzt.

Man unterscheidet hauptsächlich zwischen 3 Typen von Vertikalachsen-Rotoren:

- **Flettner-Rotor**
- **Darius-Rotor**
- **Savonius-Rotor**



*Savonius-Rotor*



*Savinius-Helix*



*Maglev-Rotor*

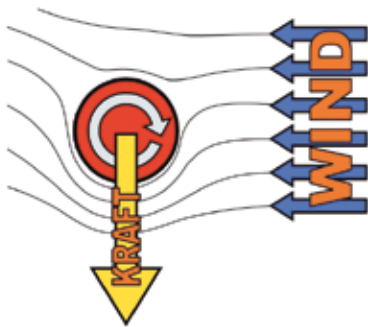
## Flettner-Rotor

Die Wirkungsweise dieses Rotors basiert auf einem Effekt, den der Berliner Physiker Heinrich Gustav Magnus 1852 entdeckt: An einem rotierenden und senkrecht zur Achse angeströmten Zylinder entsteht senkrecht zur Achse und zur Anströmrichtung eine Querkraft. Während so auf der einen

Seite des rotierenden Zylinders ein Unterdruck entsteht, ergibt sich für die gegenüberliegende Seite ein Überdruck.

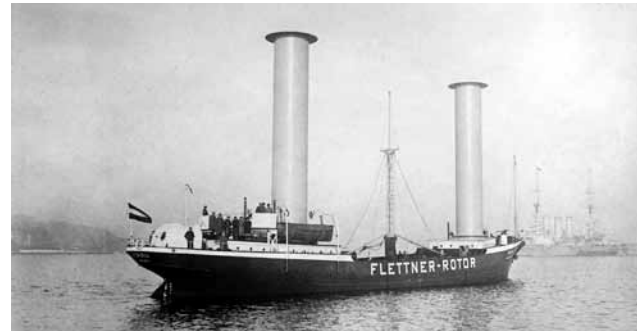
Der 1885 in Eddersheim bei Frankfurt am Main geborene Anton Flettner, der um 1920 mit seinen Experimenten be-

ginnt, will den Magnus-Effekt zum Antrieb von Schiffen nutzen. Im Juli 1923 lässt er auf dem Berliner Wannsee ein 50 cm Modellboot zu Wasser, das einen Papierzylinder als Aufbau hat, der von einem Federuhrwerk angetrieben wird. Bereits 1924 setzt er den Versuch maßstabsgetreu um und rüstet den dreimastigen Segelschoner „Buckau“ zu einem Rotorschiff um. Die „Buckau“ war in der Wasserlinie etwa 51 m lang und hatte als Segler 889 m<sup>2</sup> Segelfläche getragen. Das Schiff wird nun seiner Takelage beraubt und mit zwei Rotoren von jeweils 15,6 m Höhe und 2,8 m Durchmesser ausgerüstet. Zum Antrieb der Rotoren dienen zwei 11 kW Gleichstrommotoren. Die maximale Drehzahl ist 125 U/min. Beide Rotoren zusammen besitzen eine projizierte Fläche von 88 m<sup>2</sup>. Flettner geht davon aus, dass der Kraftbeiwert der Rotoren zehnmal so groß ist wie die der Gaffelbesegelung. Um einen solchen Wert zu erreichen, werden die Rotoren mit Endscheiben versehen, die den 1,5 fachen Rotordurchmesser haben.



*Magnus Effekt*

Im Herbst 1925 durchgeführte Versuchsfahrten ergeben, dass der Rotor ein in jeder Beziehung zuverlässiges und vollwertiges Antriebsmittel auch für Yachten darstellt. Außerdem ist die Handhabung der Rotoren wesentlich einfacher als das Setzen oder Raffen von Segeln. Die erzielten Geschwindigkeiten bis 7 m/s entsprechen denen normaler Segeljachten ähnlicher Größe, während bei mehr als 7 m/s die Segeljacht dem Rotor unterlegen ist. Eine Segeljacht muss nämlich, wenn der Wind eine größere Geschwindigkeit als 7 m erreicht, bereits die Segel wegnehmen und sie reffen. Bei der Rotorjacht können die Böen dagegen nicht so gefährlich werden. Die Rotoren haben kein „Vollzeug“, die Geschwindigkeit wird lediglich durch die Verringerung der Drehzahl vermindert. Besonders wenn der Wind von achtern kommt kann der Winddruck auf den Rotor für die Fahrt voll ausgenutzt werden, woraus sich sehr hohe Geschwindigkeiten ergeben. So werden während der Probefahrten bei 8 bis



*Die „Buckau“*

10 m Wind in der Sekunde Fahrtgeschwindigkeiten von 20 bis 22 km/h gemessen. Später wird die „Buckau“ in „Baden-Baden“ umgetauft. Die Nachteile dieser Methode sind das Auftreten störender Kreiselkräfte, die wiederum mit lästigen Fliehkräften verbunden sind, und Unwuchten (Vibrationen) erzeugen, die ihrerseits Festigkeitsprobleme aufwerfen. Außerdem ist kein schnelles Anlaufen und Drehrichtungsumsteuern des Rotors möglich.

Der weltbekannte Meeresforscher Jacques-Yves Cousteau testet im Oktober 1983 eine modifizierte 13,5 m hohe, tragflächenartige ovale Röhre, bei welcher der Unterdruck statt durch Rotation durch einen innen liegenden 12 PS Ventilator und siebartige Öffnungen in den Seiten erzeugt wird, als bei Windstärke 9 sein „Turbosail“ herunterkommt. Auf dem 22 m langen Katamaran „Moulin à Vent I“ sollte damit die gleiche Leistung wie durch einen konventionellen 150 PS Motor erbracht werden. Cousteau macht weiter, assistiert von den Professoren der Pierre et Marie Curie-Universität in Paris Lucien Malavard und Bertrand Charvier: Bis Mitte 1985 wird die „Alcyone“, ein verbessertes Modell mit zwei der inzwischen auch als Cousteau-Pechiney „Turbosails“ bekannten Systeme, von der Firma Pourprix in Lyon konstruiert. Gebaut wird es anschließend in der Werft Societe Nouvelle des Ateliers et Chantiers de la Rochelle-Pallice.

Noch im Laufe des Jahres 1985 überquert Cousteau mit der „Alcyone“ den Atlantik ohne Zwischenfall und setzt seine Erprobungsfahrt in den Pazifik fort. Das Schiff ist 2006 immer noch für die Cousteau Society unterwegs.



Die „Alcyone“

Im Sommer 2006 wird bekannt, dass der Auricher Windrad-Hersteller Enercon bei der Kieler Lindenu-Werft ein Frachtschiff mit 29.000 BRT bestellt hat, das mit vier Flettner-Rotoren ausgerüstet werden soll.

Das für den Transport von Windkraftanlagen konzipierte „E-Ship“ ist 130 m lang und 22,5 m breit ist. Es besitzt einen dieselektrischen Hauptantrieb und dazu vier von Enercon entwickelte stählerne Flettner-Rotoren von jeweils 25 m Höhe und 4 m Durchmesser. Bei Windstärke 7 kann der dieselektrische Hauptantrieb (2 x 3.500 kW) komplett ausgeschaltet werden, denn dann reicht bereits die Kraft der Rotoren, um die Höchstgeschwindigkeit von 17,5 kn zu erreichen. Das Schiff soll 30 bis 40 % weniger Kraftstoff verbrauchen, was beträchtlich ist, denn ein derartiger Frachter benötigt an 320 Tagen im Jahr auf See Dieselöl für rund drei Millionen Euro. Man rechnet daher damit, dass sich der neue Antrieb in weniger als fünf Jahren amortisiert haben wird.

Das Schiff unternimmt im Sommer 2010 mehrere Erprobungsfahrten. Die ersten beiden Fahrten mit Ladung erfolgen im August 2010, wobei Windenergieanlagen nach Dublin verschifft werden. Die Fahrten verlaufen zumeist mit 13 bis 16 Knoten.



Enercon E-Ship

Es ist inzwischen jedoch fraglich, ob die überzeugenden Erfolge der Technologie nicht gleichzeitig auch das Ende der relativ komplizierten und technisch aufwendigen Flettner-Rotoren bedeutet...

Eine sehr interessante Optimierungsform des Flettner-Rotors scheint allerdings fast völlig in Vergessenheit geraten zu sein, denn der schottische Ingenieur Alexander Thom berichtet schon 1934 in dem Aeronautical Research Committee Report and Memoranda No. 1623 der Cranfield University, dass viele große Scheiben an einem Flettner-Rotor dessen Leistung beträchtlich anheben.

Aus einem maximalen Auftriebsbeiwert des Flettner-Rotors von ca. 12 wird mit Thom-Scheiben ein Auftriebsbeiwert von 20 bis 28 errechnet - bei einem Sechstel des Widerstands. Dies entspricht einer Verzehnfachung der Gesamtleistung.

Aufgenommen wurde diese Idee erst wieder in einem im März 2007 veröffentlichten Bericht von Stephen Salter und Graham Sortino der Universität Edinburgh, in welchem ein Konzept untersucht wird, bei dem u.a. auch seebasierte Anlagen die Wolkenalbedo steigern sollen - d.h. mehr Sonnenlicht zurückwerfen, um die Globaltemperatur zu senken. Unter Albedo versteht man das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden, also nicht selbst leuchtenden Oberflächen. Die Idee bildet ein Geengineering-Projekt, das auf fernsteuerbaren Roboterschiffen basiert, die die Meere durchkreuzen und dabei Wasserdampf in die Luft sprühen. Die winzigen salzhaltigen Tröpfchen steigen auf, werden zum großen Teil von den existierenden Wolken aufgenommen und vergrößern so die weiße Wolkenfläche, welche die Sonnenstrahlen reflektiert. Die hierfür konzipierten Trimarane mit einer

Wasserverdrängung von 300 t sollen mit mehreren 20 m hohen Thom/Flettner-Rotoren von 2,4 m Durchmesser ausgestattet werden. Der erzeugte Schub bewegt die 45 m langen Schiffe, deren Bewegung wiederum unter der Meeresoberfläche montierte Turbinen antreibt.

Der produzierte Strom pumpt das Wasser aus dem Meer und filtert winzige Wassertröpfchen heraus, die nicht größer als ein Mikron sein dürfen, um diese dann in die Luft zu sprühen. Um die gewünschte Wirkung zu erzielen, müssen pro Sekunde 30 kg aufwendig gefilterten Meerwassers als feine Tröpfchen in die Luft gepustet werden.

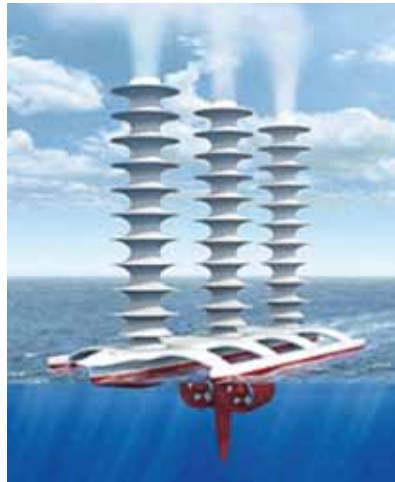
In Deutschland kommt die Sache erst im September 2008 in die Presse, nachdem in den USA in zweiter Artikel gemeinsam mit John Latham vom National Center for Atmospheric Research in Boulder erscheint. Mit ausreichender Finanzierung könnten die ersten funktionsfähigen Prototypen innerhalb von 5 Jahren gebaut werden, die Weiterentwicklung bis zur Serienreife würde etwa 20 Mio. € kosten.

Um die Temperatur konstant zu halten, wenn die CO<sub>2</sub>-Werte in der Atmosphäre nicht reduziert werden, wären dann bis zu 2.000 solcher Schiffe notwendig, rechnen die Wissenschaftler, während

die Kosten des laufenden Betriebs mit weniger als 100 Mio. € im Jahr kalkuliert werden.

Der Klimatologe Alan Gadian ist laut Presse im September 2009 dabei, die notwendigen Fördergelder zu beschaffen um einen funktionierenden Prototypen der Klima-Schiffe zu bauen.

Eine Wiedergeburt - in umgesetzter Form - hat die Universität von Edinburgh mit der „Cloudia“ geschafft.



*Klima-Trimaran (Grafik)*

Ein Trimaran, der zur Erprobung des Flettner/Thomantriebs mit je einem 5 m und einem 6 m hohen Flettner/Thom-Rotor bestückt ist.

Eine neue Weiterentwicklung ist der **WL-PowerCane**.  
Herkömmliche Windkraftanlagen werden bei hohen



„Cloudia“

Windgeschwindigkeiten erreicht er 100% Energieeffizienz. Es werden keine Anwohner durch den Windschatten, bzw. Rotorblattgeräusche gestört. Die Funktionsweise ist zugleich einfacher, da sie auf Bodenniveau gewartet werden, wodurch sich geringere Servicekosten ergeben. Durch den Magnus-Effekt wird auf den Flettner-Rotor eine Kraft und damit Biegung auf den Rotor ausgeübt.

Die hier beschriebene Erfindung basiert darauf, den Rotor durch die Windkraft, einen geringen Winkel kippen zu lassen und die Kippbewegung über ein H. Zylinder mit erf. Komponenten + Speicher, oder aber über eine Kurbelwelle und Getriebe auf einen Generator zu übertragen. Denkbar ist auch die Möglichkeit direkt über eine Pleuelstange auf einen Lineargenerator zu gehen.

Windgeschwindigkeiten auf ca. 13m/sec heruntergeregelt und bei ca 25m/sec wird die Anlage abgeschaltet. Bei einer POWERCANE-Anlage dagegen sind hohe Windgeschwindigkeiten völlig problemlos. Im Gegenteil, bei hohen



Schiff mit PowerCane Rotoren (Grafik)

Durch das Abdecken und Öffnen des Rotors mittels einer Windsperre d.h.einem Programm gesteuerten-intergrierten Lamellenturm - LT, oder alternativ über einen ebenfalls intergriert gesteuert Oszillationsturm - OT, wiederholt sich der Vorgang mit einer gewissen Frequenz ,wodurch sich die Drehzahl und die Leistung ergibt.

**Technologie der Hochsteifigkeits-Leichtturmbauweise.**  
Extrem leichte Türme aus Kunststoff mit hochwertiger - Festigkeitslegierung, sowie kontinuierlich-empirisch ermittelten-Querschnitts-veränderung über die gesamte Höhe [bis 100m und 5m ø] der Türme von Kopf bis Fusswurzel bis Windgeschwindigkeit  $V=50\text{m/s}$  statisch, sind Berechnungsstandard.

Dies gilt für den Leistungsturm, der bis  $V_u=40\text{m/s}$  = Turm-Umfangsgeschw.konst.dreht. Sowie für den Statorturm [Lamellen.-Oszillation.-Turm ], welche für die gleiche Wind-belastungen statisch/dynamisch ausgelegt sind.



PowerCane  
OffShore-Anlage



## Darrieus-Rotoren

Der Darrieus-Rotor ist eine Windenergieanlagenbauart mit vertikaler Rotationsachse. Er wurde von dem Franzosen Georges Darrieus erfunden und 1931 in den USA patentiert. Wegen seines Aussehens wird der Rotor scherzhaft auch eggbeater, zu deutsch Schneebesen, genannt. Die Rotorblätter sind am oberen und unteren Ende der Achse befestigt und ragen bogenförmig nach außen. Die Bogenform der Rotorblätter entspricht ungefähr einer Kettenlinie, damit sie unter der Zentrifugalkraft im Betrieb keinem oder wenig Biegemoment ausgesetzt sind.

Darrieus' erstes Modell von 1929 erzielt 10 kW, hat zwei Flügel und eine Höhe von 20 m. Der Stromgenerator befindet sich am unteren, leicht zugänglichen Ende der Drehachse. Das Konzept gerät danach lange in Vergessenheit, erweist sich aber in den vergangenen Jahren zunehmend als entwicklungssträchtiger Typ.

## Wirkungsweise

Der Wind über Grund zusammen mit dem Fahrtwind aus der Drehbewegung addieren sich nach Betrag und Richtung zum scheinbaren Wind, mit dem die Rotorblätter angeströmt werden. Eine genügend große Schnellaufzahl vorausgesetzt, kommt dieser scheinbare Wind bezüglich des Blattprofils stets ungefähr und zweimal während eines Umlaufes sogar genau von vorne. Dadurch ist gewährleistet, dass der Anstellwinkel nirgends zu groß wird und die Strömung

nicht abreißt. Der Auftrieb an den Blättern wirkt senkrecht zur Anströmrichtung, so dass ein kleiner Teil des Auftriebs als Vortrieb wirksam wird. Der größere, radiale gerichtete Teil des Auftriebs wirkt dagegen als Wechsellast, welche nur die Konstruktion beansprucht und keine Arbeit leistet.

Je größer der Anstellwinkel ist, desto größer ist die Vortriebskomponente des Auftriebs, so dass das maximale

Drehmoment ungefähr an den Stellen entsteht, wo der Wind über Grund senkrecht zur Umfangsgeschwindigkeit gerichtet ist. Wo beide Komponenten parallel sind, entsteht gar kein Vortrieb, weil der Anstellwinkel null ist. In diesen Bereichen wird ein realer Darrieus-Rotor sogar abgebremst, weil die Reibung den Vortrieb überwiegt. Daher können ein- und zweiblättrige Rotoren nicht selbst anfahren. Erst der dreiblättrige Rotor weist bei geeigneter Drehzahl in jeder Phase der Umdrehung ein positives Drehmoment auf. Im Stand allerdings reißt gerade dort, wo im Betrieb der Vortrieb am größten ist, die Strömung ab, so dass das Drehmoment insgesamt nicht ausreicht, den Reibungswiderstand des Generators zu überwinden. Man benötigt dazu

eine noch größere Anzahl von Flügeln oder eine Anfahrhilfe durch den Generator oder durch einen in die Konstruktion integrierten Savonius-Rotor.



*Typischer Darrieus-Rotor*

Es gibt bei Darrieus-Rotoren zwar mehr Probleme als bei Horizontalachssystemen zu lösen – besonders bei einer Anlagengröße über 100 kW –, doch erregt dieser Typ andererseits die Gemüter der Umweltschützer weitaus weniger, als dies bei konventionellen Systemen der Fall ist.

### Vorteile

Da der Darrieusrotor eine senkrechte Achse hat, ist seine Funktion von der Windrichtung unabhängig, so dass auf eine Windnachführung verzichtet werden kann. Außerdem kann der turbulente Wind nah am Boden genutzt werden, für den konventionelle Windkraftanlage mit horizontaler Drehachse ungeeignet sind, weil sie nicht schnell genug nach dem Wind ausgerichtet werden können.



*Eine andere Form, in der Antarktis*

Der Generator und das Getriebe sind bodennah, was die Wartung und das Auswechseln von Bauteilen erleichtert. Im Gegensatz zu Horizontalläufern gibt es keine Generatorgondel, die auf Nabenhöhe emporgehoben werden muss. Somit entfällt der teure Einsatz von Schwerlastkränen. Der Darrieus-Rotor kann ohne Turm errichtet werden. Sofern der Rotor höher stehen soll, ist die Turmkonstruktion statisch weniger anspruchsvoll. Die Beherrschung der Lasten, die von den Rotorblättern ausgehend über die Drehachse weitergeleitet von der

Lagerung aufgefangen werden müssen, ist hier auch gut zu bewältigen, weil der Darrieus-Rotor eine weit auseinanderliegende Zweipunktelagerung hat, je nach Bauart in verschiedenen Versionen.

Da die Blätter der Darrieus-Rotoren überall den gleichen Querschnitt aufweisen, können Strangpressprofile eingesetzt werden, die sich kostengünstig endlos oder als Meterware fertigen lassen. Auch die Herstellung extrem leichter Darrieus-Flügelprofile aus Aluminium erlaubt, das deren Hohlräume mit Schaumstoff ausgeschäumt sind.

Die Schnelllaufzahl „Völligkeit“ (= Blattzahl  $\times$  Tiefe/Rotorradius) kann in relativ weiten Grenzen variiert werden, ohne  $c_P$ -max zu verändern. Hohe Schnelllaufzahlen

bedingen jedoch eine Unfähigkeit zum eigenständigen Anlaufen, weshalb einige Anlagen den Generator auch als Anlaufhilfe nutzen müssen. Das Lastkollektiv der Betriebsfestigkeit ist im Allgemeinen schwieriger zu bestimmen, da bei jedem Umlauf die Blätter in die turbulente Leeseite gelangen und weil die Last des Winddrucks einmal in die Richtung der Fliehkraft verläuft und auf der anderen Hälfte des Drehkreises dagegen.



*Darrieus-Rotor im Münsterland*

Last des Winddrucks einmal in die Richtung der Fliehkraft verläuft und auf der anderen Hälfte des Drehkreises dagegen.

Ein weiterer Vorteil gegenüber Horizontalläufern liegt darin, dass seine Blätter im Umlauf um ihre Drehkreisebene nicht durch von der Schwerkraft verursachte Lastwechsel in Mitleidenschaft gezogen werden.

### **Nachteile**

Darrieus-Rotoren erreichen bisher nur Erntegrade von bis zu 40 %, das liegt daran, dass seine Flügel auf ihrer Kreisbahn um die Rotationsachse auf einem Teil ihres Umlaufes vom Wind nicht optimal angeströmt werden.

Durch die Lastwechsel und deren Wechselwirkung auf die Fliehkraft an den Blättern wird das Material des Darrieus-Rotors stark belastet.

Gerade im Bereich des Darrieus-Rotors gibt es viele Varianten und Mischformen mit hauptsächlich Savonius-Rotoren, aber auch anderen.

Die englische Firma Quietrevolution baut diese Variante und plant auch den Einstieg in den deutschen Markt.

Die stille Revolution (QR) ist konzipiert als Reaktion auf steigende Nachfrage nach Windenergieanlagen, die gut in die Umgebung des Menschen passen.

Die elegante, spiralförmige (twisted) Gestaltung der QR sorgt für eine stabile Performance auch bei turbulenten Winden. Sie ist auch verantwortlich für nahezu eliminierte Geräusche und Vibrationen.

Auf einer 5 m x 3 m großen Grundfläche ist der Rotor kompakt und leicht zu integrieren und mit nur einem beweglichen Teil kann die Wartung auf jährliche Inspektionen beschränkt werden.

Diese Art von Windenergieanlagen ist für große Energieversorger weniger interessant. Deshalb zählen große Einzelhändler, Entwickler, Ministerien, Schulen und Universitäten zu den Kunden.



*Quiet Revolution*

Die **Windspire-Windenergieanlage** von Mariah Power ist eine kostengünstige, geräuscharme, attraktive Windkraftanlage zur Verwendung an städtischen, vorstädtischen, ländlichen und abgelegenen Standorten. Die in den USA gefertigten Windenergieanlagen verfügen über eine Bauweise ohne Propeller, mit vertikaler Achse und patentierter Technologie, die die Energieumwandlung von Wind in elektrische Energie unabhängig von Änderungen der Windgeschwindigkeit und -richtung maximiert. Die Windspire-Windenergieanlage erzeugt etwa 2000 kWh pro Jahr bei einem durchschnittlichen Wind von 5,4 m/s was mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs eines europäischen Haushalts ausmacht..

Mit einer Höhe von nur 9,1 Meter verfügt die Windspire über eine Plug 'n Produce™-Bauweise, die sich direkt an die Energieversorgung des Gebäudes anschließen lässt, den Energieverbrauch ausgleicht und die Energiekosten reduziert. Die in den USA von Mariah Power in einer ehemaligen Fahrzeugfabrik gefertigten Windenergieanlagen verfügen über eine Bauweise ohne Propeller, die die Energieumwandlung von Wind in elektrische Energie unabhängig von Änderungen der Windgeschwindigkeit und -richtung maximiert. Das Windspire-Produktprogramm umfasst eine Version mit 1,2 kW, eine spezielle High-Wind-Version, die darauf ausgerichtet ist, Windgeschwindigkeiten von bis zu 270 km/h standzuhalten, und einen 230-V-Stromrichter für den internationalen Markt.



*Windspire*

Der in der Schweiz lebende polnische Designer Oskar Zieta präsentiert Mitte 2009 auf dem DMY International Design Festival in Berlin seinen **'Fidu Rotor - Coeus'**, den er gemeinsam mit Philipp Dohmen und Studenten der Fakultät für Computer-Aided Architectural Design (CAAD) an der ETH Zürich entwickelt hat.

Der H-Darrieus des Projektes besteht aus aufgeblasenen



*Fidu Rotor - Komponenten*

Blechkörpern (daher Fidu = free inner pressure deformation oder Freie InnenDruck Umformung), die aus der Stanzpresse vorgefertigt und Laser-geschweißt leicht hergestellt, transportiert und montiert werden können.



*Fidu Rotor*

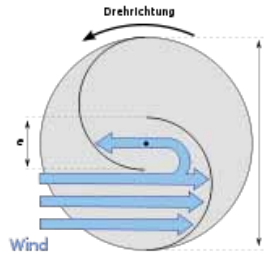
Produziert wird der Rotor bei der Firma Trumpf Maschinen AG in Baar.

Bei dieser Technologie wird die dreidimensionale Form durch den zweidimensionalen Zuschnitt des Blechs gesteuert. Das zugeschnittene und verschweißte Blech kann anschließend ortsunabhängig aufgeblasen werden. Für die Herstellung benötigt man nur die Matrize und einen Schweißroboter.

Im Zuge der Entwicklung werden drei verschiedene Flügel designs weiterentwickelt – gebogenen Einkammer- und Dreikammerflügel sowie ein Wellenformflügel. Die Belastbarkeit der Bleche im Verhältnis zum geringen Eigengewicht und Materialverbrauch erweist sich dabei als kostengünstige und nachhaltige Innovation mit hohem Entwicklungspotential. Zwei dieser Rotoren sollen den Bedarf einer 4-Personen-Familie decken können.

## Savonius-Rotor

Diese Erfindung geht auf den finnischen Schiffsoffizier S. J. Savonius im Jahr **1924** zurück. Der Savonius-Rotor hat eine vertikal angeordnete Achse, er besitzt allerdings keine Rotorblätter, sondern nur zwei (oder mehr) gegeneinander versetzte Zylinderhälften, die zusammen mit der Achse verschweißt sind. Savonius-Rotoren arbeiten schon bei Windstärken von 2 bis 3; sie sind mit kleinen Durchmessern vermehrt in den **1930er** Jahren hergestellt worden, mit einer Leistung von 6.000 kWh im Jahr.



*Grafik des Prinzips*

Im Gegensatz zu allen anderen windnutzenden Systemen wirkt die Abluft aus der ersten halbkreisförmigen Schale in der zweiten wieder antreibend, sofern die Schalen nach innen hin offen zueinander sind, wodurch sich relativ gute Wirkungsgrade erreichen lassen – trotz der augenscheinlichen „Primitivität“ des Systems. Im Laufe der Jahre werden besonders in der Dritten Welt viele ähnliche kleine Rotoren aufgestellt, da sie leicht selbst herstellbar sind. Wissenschaftliche Optimierungsmaßnahmen gibt es aber kaum, und erst Jahrzehnte später werden einige neue bzw. modifizierte Systeme vorgeschlagen.

Absolut genial ist der Transportbehälter für Reisen und Expeditionen „**Back-Pack**“, der von Berliner Designern entworfen wurde. Wenn die Expedition über Nacht lagert, muss er nur entleert und aufgestellt werden - alle notwendigen Teile sind innen verstaut, um zum Produzieren von Strom eingesetzt zu werden. Der Umbau der Tonne zu einem Savonius-Rotor erfordert nur wenige Handgriffe.



*Back-Pack*

Das US-Unternehmen Helix Wind baut so einen weiter entwickelten Rotor. Die Firma besitzt **2006** bereits



*Helix Wind Savonius*

Herstellungsanlagen in San Diego, Kalifornien und in Las Vegas, Nevada.

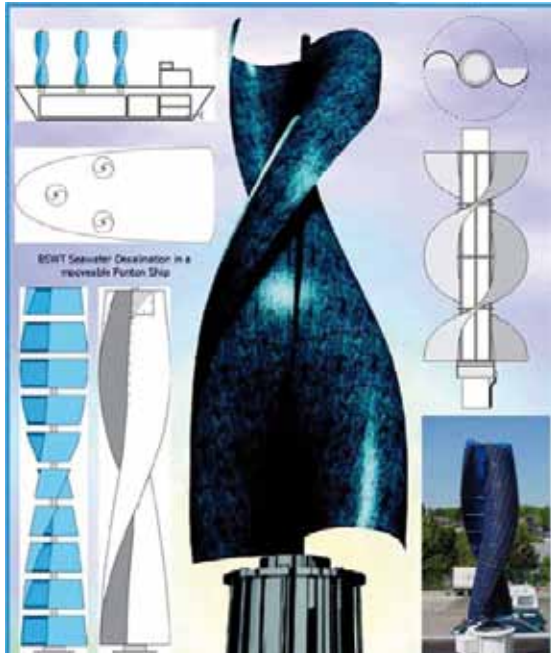
Der „**Helix Wind Savonius 2.0**“ soll Eigenheime leise und effizient mit Strom versorgen. Im Gegensatz zu den konventionellen Modellen haben die Rotoren von Helix Wind ein gewelltes Schaufelprofil, das als besonders leistungsstark gilt – außerdem sind sie spiralförmig aufgebaut, so dass auch bei Turbulenzen der Wind bei jedem Winkel während der Rotation eine Angriffsfläche findet.

Die aus Aluminium und Edelstahl hergestellten Helix Windkraftanlagen kosten in etwa dasselbe

wie Solaranlagen vergleichbarer Leistung: Die 3 m hohe 2,5 kW Turbine schlägt einschließlich einem 3 m Turm, Wechselrichter, Schaltkasten und Installationskomponenten mit etwa 15.000 \$ zu Buche, während eine netzgekoppelte 5 kW Anlage von 6 m Höhe komplett installiert zwischen 20.000 \$ und 25.000 \$ kostet.



Einen Schritt weiter geht **Bluenergy Solarwind Inc.**, sie beschäftigen sich neben der Entwicklung effektiver Solarmodule auch mit einem verdrehten Savonius-Rotor. Im Gegensatz zu den vielen ähnlichen Systemen zeichnet sich die Entwicklung des Erfinders und Unternehmensgründers Bernd Melchior dadurch aus, dass die Rotorflächen gleichzeitig mit einer Schicht Solarzellen bestückt sind, die mit einem transparenten Fluorpolymer-Film laminiert werden, der die Sonnenstrahlen aus unterschiedlichen Winkeln einfängt.



Die Doppel-Helix soll bei Windgeschwindigkeiten zwischen 6,5 km/h und 145 km/h Strom produzieren können. Das Unternehmen produziert in Santa Fe, New Mexico, drei Modellgrößen: 2 kW, 5 kW und 8 kW. Die 5 kW Anlage ist 5,5 m hoch, sie hat einen Durchmesser von 1,8 m und soll 35.000 \$ kosten. Der unten liegende Generator macht die Anlage wartungsfreundlich, da ein Kran nicht notwendig ist.

Auch die Firma **Re-Gen-Energy GmbH & Co. KG** aus Haiger kommt 2009 mit einem Senkrechtachser auf den Markt. Ihr Energieturm ist eine weitere Adaption des spiraltypischen Savonius, wie er inzwischen von Dutzenden Firmen weltweit hergestellt und angeboten wird – allerdings um Solarpaneele ergänzt und als Werbeträger konzipiert.

Ein Energieturm vom Type ‚DE 1-3,5G-5W‘ hat eine Konstruktionshöhe bis zu 25 m, wobei der ca. 2,0 m durchmessende Rotor mit seiner Gesamtfläche von rund 11,2 m<sup>2</sup> etwa 10 m hoch ist und 3,5 kW leisten soll. Sein Gewicht ohne Mast beträgt 920 Kg.



*Energieturm von Re-Gen-Energy*

## MagLev-Rotor



*1 GW MagLev Windturbine*

Das chinesische Konzept eines riesigen Senkrechtachlers mit 1 GW Leistung, der in der Lage sein soll, alleine bis zu 750.000 Haushalte mit Strom zu versorgen, wird im Juni 2006 auf der Wind Power Asia Exhibition in Peking vorgestellt. Über 50 Länder zeigen Interesse an dieser Entwicklung. Es handelt sich um die gigantischste Vision im Windenergiebereich, von der ich bislang gehört habe. Andererseits haben bislang aber auch noch über 70 Millionen Haushalte in China keinen Stromanschluß... Eine Besonderheit der MagLev Windturbine sind magnetische und daher so gut wie vollständig reibungsfreie Lager – was ein schnelles Anlaufen und die Nutzung von

Windgeschwindigkeiten bereits ab 1,5 m/s erlauben soll. Man rechnet daher mit einem Stromabgabepreis von unter 5 US-Cent pro kWh. Eine 1 GW Anlage soll sich dadurch bereits innerhalb nur eines einzigen Jahres amortisieren. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen magnetischer Lagerungen werden hier keine elektrischen Spulen eingesetzt sondern Permanentmagnete, was die Betriebskosten signifikant senkt. Für die Herstellung dieser Magnete werden große Mengen an Neodym benötigt, das zu den seltenen Erden gehört – allerdings beherrscht China schon heute 90 % des Weltmarktes für Magnete aus seltenen Erden.



*Magnetlager*

Die Technik selbst wurde von der Firma in Zusammenarbeit mit dem Energy Research Institute der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Guangzhou entwickelt, geleitet wird das Projekt vom Firmenchef Guokun Li. Es sollte an dieser Stelle auch noch darauf hingewiesen werden, daß die ersten Patente für magnetische Levitation (z.B. durch Linearmotoren angetriebene Züge wie der heutige Transrapid) auf den deutschen Ingenieur Hermann Kemper in den Jahren 1937 bis 1941 zurückgehen. In den USA soll die in Sierra Vista, Arizona, beheimatete Firma MagLev Wind Turbine Technologies Inc. unter der Leitung des Energieforschers Ed Mazur die neuen

Turbinen herstellen. Dieser geht davon aus, daß mit der neuen Technologie ein kWh-Preis unterhalb von 1 US-Cent erreichbar wird. Die Baukosten für eine 1 GW-Anlage veranschlagt er auf nur 53 Mio. US-\$, was wesentlich günstiger wäre als konventionelle Windparks gleicher Leistung.



*Regenedyne-Konzept (Grafik)*

Im Februar 2009 gibt es auf der Homepage des Unternehmens einen animierten 4-Minuten Clip, der die Großversion („... leistet so viel wie 500 Standard-Windrotoren!“) unter dem Namen ‚Regenedyne‘ vermarkten soll. Diese gewaltige Anlage, die stark an das obige chinesische Konzept erinnert, soll 2 GW leisten. Neben den zentralen Rotor, der aus riesigen Halbschalen besteht und auf einem magnetischen Feld gelagert ist, gibt es drei große, segelähnliche Leitflächen, die auf Kreisschienen laufen und den Wind auf die Schaufeln lenken sollen. Der Flächenbedarf einer derartigen Anlage wird auf 40 ha beziffert.

Im Januar 2010 soll das inzwischen als Regenedyne firmierende Unternehmen ein Joint-Venture mit der Gazoo Energy Group Inc. aus Irvine, Kalifornien, eingegangen sein, um die Finanzierung einer ersten Anlage zu ermöglichen.

Ein ähnliches, aber wesentlich kleineres System für Hausdächer, wurde bereits vor einigen Jahren von Thomas Priest-Brown und Jim Rowan in Kanada erfunden. Ihre

ebenfalls magnetische gelagerte ‚MagWind VAWT‘ Windturbine ist um 2006 von der Mag-Wind Company LLC in Texas zur Produktreife weiterentwickelt worden und soll von der ebenfalls texanischen Firma Vector Systems Inc. in Richardson produziert werden. Dieser Senkrechtachser läuft in den USA unter dem Namen ‚Magnetically-Levitated Axial Flux Alternator with Programmable Variable Coil Resistance‘. Als erstes will man das Modell ‚MagWind MW1100‘ auf den Markt bringen, das etwa 1,2 m hoch ist und einen größten Durchmesser von ebenfalls 1,2 m besitzt. Bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 21 km/h soll es 1.100 kW/h im Monat produzieren. Der Preis scheint allerdings über 10.000 \$ zu liegen.



*MagWind MW1100*

Anfang 2007 teilt das Unternehmen mit, daß der Rotor 1,8 hoch wird – doch danach gibt es lange keine neuen Informationen mehr über das Projekt. Erst 2009 erscheint Rowan mit einem stark abgewandelten Design, bei dem sich nur noch drei, dafür aber wesentlich größere Flügel drehen. Das System ähnelt damit wieder stärker seinem Ahnen, dem Savonius-Rotor.

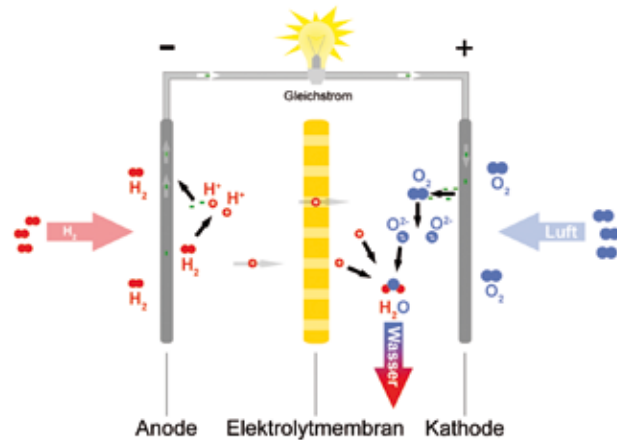
## Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, die die chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie wandelt. Im Sprachgebrauch steht Brennstoffzelle meist für die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle.

Eine Brennstoffzelle ist kein Energiespeicher, sondern ein Wandler. Die Energie zur Stromproduktion wird in chemisch gebundener Form mit den Brennstoffen zugeführt.

Die Gewinnung von elektrischer Energie aus chemischen Energieträgern erfolgt zumeist durch Verbrennung und Nutzung der entstehenden heißen Gase in einer Wärmekraftmaschine mit nachgeschaltetem Generator. So wird thermische Energie in mechanische Arbeit umgewandelt. Eine Brennstoffzelle ist jedoch geeignet, die Umformung ohne die Umwandlung in Wärme und Kraft zu erreichen, und dadurch potenziell effizienter. Unter thermodynamischem Aspekt stellt sie somit eine Verbrennungskraftmaschine (VKM) dar, die chemische Energie in elektrische Energie umwandelt. Die theoretisch erreichbare Nutzarbeit ist allein durch die freie Enthalpie der chemischen Reaktion beschränkt und kann damit höher sein als die einer Wärmekraftmaschine (Carnot-Wirkungsgrad). Praktisch sind die von Brennstoffzellen erzielten Wirkungsgrade höher als die von Otto- oder Dieselmotoren. Gut erforscht ist die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle.

Eine einfache Brennstoffzelle wurde 1838 von Christian Friedrich Schönbein erstellt, indem er zwei Platindrähte in Salzsäure mit Wasserstoff bzw. Sauerstoff umspülte und zwischen den Drähten eine elektrische Spannung bemerkte. Ein Jahr später veröffentlichte Schönbein diese Ergebnisse. Sir William Grove schrieb noch im selben Jahr eine Notiz über das sogenannte „batterisierte Knallgas“. Zusammen



*Schematische Darstellung der Funktion einer PEMFC / DMFC / (PAFC) Brennstoffzelle*

mit Schönbein erkannte er die Umkehrung der Elektrolyse und das Erzeugen von Strom in diesem Phänomen und wandte diese Erkenntnisse in mehreren Versuchen an. Eine Brennstoffzelle besteht aus Elektroden, die durch eine Membran oder ein Elektrolyt (Ionenleiter) voneinander getrennt sind.

Die Elektrodenplatten/Bipolarplatten bestehen meist aus Metall oder Kohlenstoffnanoröhren. Sie sind mit einem Katalysator beschichtet, zum Beispiel mit Platin oder mit Palladium. Als Elektrolyten können beispielsweise gelöste Laugen oder Säuren, Alkalicarbonatschmelzen, Keramiken oder Membranen dienen.

1870 schrieb Jules Verne über die Brennstoffzelle:

„Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern.“

Brennstoffzellen werden seit langem als Energiewandler in der Raumfahrt (Apollo, Space Shuttle) und für U-Boot-Antriebe verwendet.

## Verschiedene Typen der Brennstoffzelle

Bezeichnung	Elektrolyt	Mobiles Ion	Brennstoff (Anode)	Gas der Kathode	Leistung (kW)	Temperatur (°C)	el. Wirkungsgrad (%)	Stand
Alkalische Brennstoffzelle (AFC)	KOH	OH <sup>-</sup>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	10–100	< 80	45–60	kommerzielle Entwicklung
Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEMFC)	Polymer-Membran	H <sup>+</sup>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	0,1–500	10–100	35-60	kommerzielle Entwicklung
Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC)	Polymer-Membran	H <sup>+</sup>	CH <sub>3</sub> OH	O <sub>2</sub>	< 0,001–100	60–130	40	kommerzielle Entwicklung
Ameisensäure-Brennstoffzelle, div. Katalysatoren (Platin, Palladium, Ruthenium)	Polymer-Membran	H <sup>+</sup>	HCOOH	O <sub>2</sub>	< 0,001–100	30, 40 (RuCl <sub>2</sub> (PPh <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )		Forschung und Entwicklung
Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	< 10.000	200	38	kommerzielle Entwicklung
Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)	Alkali-Carbonat-Schmelzen	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , Kohlegas	O <sub>2</sub>	100.000	650	48	kommerzielle Entwicklung
Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)	oxid-keramischer Elektrolyt	O <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , Kohlegas	O <sub>2</sub> (Luft)	< 100.000	800–1000	47	Entwicklung
Direktkohlenstoffbrennstoffzelle (SOFC, MCFC)		O <sup>2-</sup>	C	O <sub>2</sub> (Luft)		650	< 60	Entwicklung MTU Friedrichshafen

### Reversible Brennstoffzelle

Eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Polymer-elektrolytbrennstoffzellen auf Wasserstoff-Sauerstoff-Basis ist die Reversible Brennstoffzelle (en. reversible fuel cell, RFC), die ursprünglich aus der Kombination einer Wasserstoff-Brennstoffzelle mit einem Elektrolyseur

bestand. Neuere Modelle kombinieren den Verbrennungs- und den Elektrolyse-Prozess, um Gewicht zu sparen und die Komplexität zu vermindern. Damit eignen sich reversible Brennstoffzellen als Energiewandler für Energiespeicher und zum Einsatz etwa in Akkumulator-Systemen.



## Micro Energy Harvesting

Den Ausspruch „alles ist Energie“ hat wohl jeder Mensch schon einmal gehört – sei es in Verbindung mit physikalischen Theorien von atomaren Strukturen bis hin zu Quantenzuständen, oder sei es in Bezug auf kosmische oder esoterische Sichtweisen der Realität(en)...

Von einer Umsetzung dieser Erkenntnis war jahrzehntelang aber nichts zu bemerken. Jedenfalls nicht in der akademischen Welt der Wissenschaft. Und Außenseiter hatten kaum eine Chance angehört zu werden – geschweige denn, dass sich jemand ernstlich mit ihren Vorschlägen befasst hätte, neuartige Energiewandler zu untersuchen die sich aus bislang nicht definierten Quellen speisen. Und so dauerte es lange Jahre bis endlich anerkannt wurde, dass es tatsächlich noch viele neue Reservoirs gibt, von denen bisher niemand etwas geahnt hatte. Und das sogar immer noch weitere entdeckt werden... Als Initialzündung für ein Forschungsgebiet, das blumig als Energy-Harvesting (Energie-Ernten) bezeichnet wird, gilt die Entwicklung des inzwischen legendären Joggingschuhs von Joe Paradiso, einem Forscher am Massachusetts Institute of Technology (MIT) im amerikanischen Cambridge.

Ende der 1990er präsentiert Paradiso ein gewöhnliches Laufmodell, das bei jedem Schritt einen schwachen elektrischen Puls durch die Sohle jagt. Die ins Gummi eingearbeiteten piezoelektrischen Keramiken geben, wenn man sie verformt, genügend Energie ab um z.B. einen kleinen GPS-Navigationssender zu betreiben.

In der Industrie und in der Gebäudetechnik spricht man dagegen nicht von Energy-Harvesting, sondern etwas nüchterner von **energieautarken Systemen**.

Und natürlich gibt es auch hier Vorläufer: Diverse Umsetzungen von verblüffender Nachhaltigkeit beweisen, dass unsere Vorfahren anscheinend intelligenter waren als die nachfolgenden Generationen, die sich vom ‚billigen Öl‘, ‚sauberen Atomstrom‘ und ähnlichen Märchen haben blenden lassen...

Der **Piezo-Effekt** wird beispielsweise schon **1880** entdeckt: Bei bestimmten Materialien – zumeist Kristallen – bildet sich eine elektrische Spannung wenn man sie verformt. Inzwischen wird dieser Effekt in zahlreichen Geräten genutzt, z.B. in Tintenstrahldruckern, Quarzuhren oder elektrischen Feuerzeugen.

Es gibt jedoch zahlreiche noch weitere Effekte, die eine Energieausbeute erlauben. Dazu eine kleine Geschichte zur Nutzung des **atmosphärischen Luftdrucks** zum Betrieb von Uhrwerken.

Der englische Automatenbauer James Cox nutzt zusammen mit Jean-Joseph Merlin ab **1770** die **Luftdruckschwankungen** als Antrieb für eine Bodenstanduhr.

Die erste rein durch den **Luftdruck** betriebene Uhr gelingt rund einhundert Jahre später dem österreichischen Ingenieur Friedrich Ritter von Lössl. **1880** wird die erste von Lössl angefertigte autodynamische Uhr im Wiener Cottagegarten aufgestellt. Die Werke und Aufzugsvorrichtungen seiner Uhren sind bald so ausgefeilt, dass er über Jahrzehnte hinweg ihre Betriebssicherheit garantiert.

Der Schweizer Ingenieur Jean-Léon Reutter entwickelt **1928** die ersten Prototypen einer Tischuhr, die ihre Energie aus kleinsten



*Autodynamische Uhr  
von Lössl*

atmosphärischen Veränderungen schöpft, und erhält bereits ein Jahr später ein französisches Patent darauf. Im Gegensatz zu den rein mit Umgebungsluft funktionierenden Lössl-Uhr verwendet Reutter als Arbeitsmittel für seine Uhr ein Flüssigkeitsgemisch, das ebenso auf Temperatur- wie auch auf Luftdruckschwankungen reagiert.

Antoine LeCoultre eröffnete seinen ersten Uhrenladen in Le Sentier im Jahr **1833** - doch mit der genialen Erfindung Reutters, schon minimale **Temperaturunterschiede** dienstbar zu machen, profiliert sich die Genfer Uhrenmanufaktur Jaeger Le Coultre noch heute - beispielsweise mit der Tischuhr Atmos. Diese Technik kann als eine der ersten Umsetzungen auf dem Feld des **Energy-Harvesting** betrachtet werden.

Die Technologie ist an sich recht einfach: In einer Druckdose befindet sich ein Gasmisch, das sich bei steigender Temperatur ausdehnt und bei sinkenden Temperaturen zusammenzieht. Diese Bewegung wird ausgenutzt, um die Antriebsfeder der Uhr aufzuziehen. Da es diese Schwankung schon zwischen Tag und Nacht gibt, kommt die Uhr ohne jede Batterie und ohne jedes Aufziehen aus. Ihr genügt ein Temperaturunterschied von nur  $1^{\circ}\text{C}$  um 48 Stunden lang zu funktionieren.

Das wirklich geniale an der **Atmos-Uhr** ist aber, dass man sie kaufen kann, dass sie funktioniert und dass sie außerdem noch zwei gemeinhin als gültig erscheinende Annahmen widerlegt, erstens, dass die Umwandelbarkeit der Wärme in Arbeit unabhängig von Stoffeigenschaften sein soll, und zweitens, dass eine Maschine, die aus der



*Atmos Classique*

Wärme der Umgebung Arbeit gewinnt – also ein Perpetuum mobile *zweiter Art* – unmöglich sei.

Thermodynamisch gesehen ist zwar nur ein Perpetuum mobile *erster Art* unmöglich, aber die langjährige Existenz eines Perpetuum mobile *zweiter Art* erstaunt zumindest. In dem Moment jedoch, in welchem das **Reservoir** der genutzten Energie bekannt ist, kann man auch getrost auf derart irreführende Bezeichnungen verzichten – denn die Energiequelle der **Atmos-Uhren** liegt ja im wahrsten Sinne des Wortes in der Luft.

Inzwischen gibt es schon eine ganze Reihe von *Produkten* aus der Sparte des **Energy-Harvesting**. Hierzu ein Beispiel:

Im Jahr **2001** wird als Spin-off der Siemens AG die EnOcean GmbH gegründet, mit Sitz in Oberhaching bei München, die eine wartungsfreie und flexible ‚batterielose Funksensorik‘ entwickelt und vermarktet. Die Grundidee beruht auf einer einfachen Beobachtung: Wenn Sensoren Messwerte erfassen, ändert sich dabei auch immer der Energiezustand. Wird ein Schalter gedrückt, oder ändert sich die Temperatur oder variiert die Beleuchtungsstärke, dann wird dadurch stets genug Energie erzeugt, um Funksignale über eine Entfernung von bis zu 300 m zu senden.

Diese Technologien werden inzwischen auch unter dem Stichwort ‚**Low-power design**‘ vermarktet.

Über das immense Energiereservoir der Umgebungswärme, welche oftmals als Anergie bezeichnet wird – im Sinne von Abfallenergie oder (bislang!) nicht nutzbarer Energie –, wird der aktuelle Stand der Technik weiter unten vorgestellt. Mit Förderung der DFG und Industriepartnern nimmt am 1. Oktober 2006 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg das neue Graduiertenkolleg Micro Energy Harvesting seine Tätigkeit auf, als deutschlandweit erstes großes Forschungsvorhaben zum Thema Energy Harvesting. Sein Ziel ist die systematische Erforschung, Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Energiewandlung, Energiespeicherung und -verteilung für autonome Mikrosysteme.

Neun Professoren und vier Nachwuchswissenschaftler aus dem Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) und dem Freiburger Materialforschungszentrum (FMF) werden gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (FhG-ISE), als assoziierter Partner, zukünftig Forschungsarbeit leisten.

Für die Wissenschaftler stellt das ‚Ernten‘ von thermischer, mechanischer, optischer oder chemischer Energie aus der Umgebung eines Mikrosystems ein neues, hochinnovatives und aussichtsreiches Konzept dar, um verteilte Systeme ohne Stromkabel oder Batterien mit Energie zu versorgen. Diese dezentralisierten Mikrosysteme verbreiten sich im Moment in rasch wachsender Zahl in unterschiedlichen Bereichen. Im Kraftfahrzeug z.B. erfasst eine große Zahl von Sensoren den Reifendruck, die Öltemperatur und wichtige Motorkennzahlen. In der Medizintechnik sind portable und implantierte Messsysteme für Blutdruck, Puls oder Blutzuckergehalt im Einsatz. Verteilte Sensor- und Aktorsysteme der Gebäudetechnik bestimmen Temperatur, Feuchte, CO<sub>2</sub>-Gehalt und Beleuchtungsstärke, sie steuern Licht-, Heizungs- und Klimatechnik. In der Produktionstechnik kontrollieren Netzwerke von Sensoren und Aktoren den Ablauf der Fertigungsverfahren.

Der Einsatz von Mikrosystemen erfordert zuverlässige, technisch einfache und langlebige Energieversorgungsmethoden, die außerdem eine vollständige Wartungsfreiheit aufweisen müssen.

Auf den nächsten Seiten folgen Forschungen auf diesem zukunftssträchtigen Sektor samt ihren verschiedenen Umsetzungsformen.

### **Biomasse**

Im Oktober 2009 meldet die Presse, dass ein Team der Universität Harvard eine **mikrobielle Brennstoffzellenbatterie** entwickelt hat, die ausschließlich mit Bodenbakterien betrieben wird. Die seit 2008 laufenden Tests in Tanzania haben bewiesen, dass die Energieausbeute

hoch genug ist um ein Handy zu laden oder LED's zu betreiben. Die microbial fuel cell (MFC) besteht aus einem Plastik-Eimer, einer Anode aus Graphit-Stoff, einer Hühnerdraht-Kathode, mit Gülle vermischtem Schlamm, einer Sandschicht als Ionen-Barriere sowie Salzwasser als Elektrolyt.

Im Sommer 2009 ein Pilotprojekt in Namibia, wo 100 MFCs im Boden eingegraben werden, um mehrere Monate lang Strom an Familien zu liefern, die keinen Zugang zum Elektrizitätsnetz haben. Das System ist für die Entwicklungsländer ideal, weil die MFCs billig zu produzieren, einfach gemacht und umweltfreundlich sind.

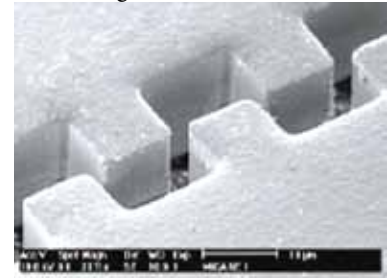


*MFC*

### **Elektrostatik**

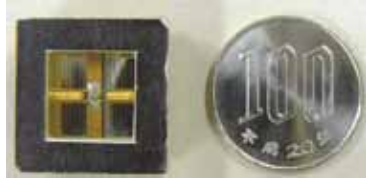
Der Aufbau **elektrostatischer Wandler** ist sehr einfach: Vor einer festen Elektrode liegt eine dünne leitende isolierte Folie als Gegenelektrode. Als schwingende Membran bestimmt sie die Eigenfrequenz, die sich wegen ihrer geringen Masse relativ hoch auslegen lässt.

Eine bekannte Umsetzung dieses Prinzips ist das Kondensatormikrofon, ein elektroakustischer Wandler, der Schalldruckimpulse in entsprechende elektrische Spannungsimpulse wandelt.



*DePesse-Wandler*

Im November 2008 präsentiert die japanische Firma Omron Corp. den Prototyp eines winzigen Generators, der aus Schwingungen Strom erzeugt. Aufgrund seiner einfachen Struktur soll der Vibrations-Ernter für einen Preis um 10 \$ auf den Markt kommen. Bei einer Input-Frequenz von 20 Hz sollen 10  $\mu$ W Strom erzeugt werden, die über eine Zeitspanne von einigen Dutzend Sekunden bis einigen Minuten in einem Kondensator kulminiert werden, der anschließend drahtlose Sensoren und Kommunikationsgeräte betreibt.



*Omron-Generator*

Der Omron-Generator arbeitet mit einem **Elektret-Stromerzeugungssystem**, dessen Kapazität sich in Abhängigkeit von der relativen Position der sich gegenüberliegenden Elektroden verändert, wobei jede Änderung einen elektrischen Stromfluß erzeugt. Ein Elektret kann als elektrostatisches Analogon zum Permanentmagneten betrachtet werden. Bei Omron wird der Elektret CYTOP eingesetzt, ein flüssiges Polymer.

### **Funkwellen**

Francis C. Jenkins, ein berühmter amerikanischer Film-, Rundfunk- und Fernseherfinder baut bereits **1926** einen winzigen ‚**Radio-Motor**‘ von fast mikroskopischer Größe. Die Trägerwelle eines lokalen Senders reicht aus, um ihn in rege Rotation zu versetzen.

Eine fast vergessene Technik, die ebenfalls die Energie der Trägerwelle von Rundfunksignalen zu ihrem Betrieb nutzt, bildet der seit 100 Jahre bekannte, batterie lose **Detektorempfänger** (auch: Kristall-Detektor).

Im Oktober 2006 beginnt man am Oak Ridge National Laboratory, die Nutzung von Funkwellen für den autonomen Betrieb elektronischer Kleingeräte zu untersuchen. Die Tests bestätigen, dass die Energie der Radio- und Fernsehsignale

erlaubt, zwischen einigen Hundert Mikrowatt und einigen Hundert Milliwatt drahtlosen Strom zu ‚ernten‘, je nach Entfernung und Stärke des Senders.

Inzwischen involvieren sich auch die großen Unternehmen. Anfang **2009** erklärt der Chip-Hersteller Intel, dass man künftig Handys, Notebooks und andere Mobilgeräte mit quasi unendlicher Akkulaufzeit ausstatten will, indem man sie



*Intel-Harvester*

mit Chips bestückt, die Energie aus ihrer Umwelt beziehen. Als Beispiele für die unterschiedlichen Energiequellen werden Körperwärme und Bewegungsenergie des Nutzers, Solarzellen, die gleichzeitig als Display dienen und/oder **elektromagnetische Wellen**, wie sie etwa TV-Sender erzeugen, genannt.

Die Forscher des Unternehmens stellen gemeinsam mit der Universität von Washington in Seattle eine markttypische, kleine Wetterstation für Haushalte vor, die samt LCD-Display komplett durch die Energie der Funksignale des 4,1 km entfernten KING-TV Fernsehturms betrieben wird. Die Station sendet ihr Signal auf Kanal 48 zwischen 674 und 680 MHz mit einer effektiven Sendeleistung (ERP) von 960 KW. Die einfache UHF-Fernsehantenne ‚zapft‘ davon eine Leistung von 60 Mikrowatt ab.

Auch Nokia arbeitet an einem Zusatzgerät für Handys, das Radiowellen aus der Umgebung in Strom umwandelt und ins Mobiltelefon einspeist. Der Prototyp aus dem Nokia Research Center im britischen Cambridge kann aus den Radiowellen von WLANs, Mobilfunkantennen, TV-Sendern und anderen Quellen eine Stromleistung von 50 Milliwatt erzeugen, was bereits einen unbegrenzten Standby-Betrieb möglich macht.

Wie beim o.g. Kristalldetektor lassen die schwingenden Magnetfeldkomponenten des einlaufenden Radiosignals in der Antennenspule Elektronen oszillieren, wodurch ein schwacher Induktionswechselstrom entsteht, der in Gleichstrom umgewandelt werden kann. Um die Leistung zu erhöhen, soll das Nokia-Gerät einen größeren Ausschnitt aus dem Radiofrequenzspektrum umwandeln.

Der dazu erforderliche Breitband-Empfänger kann Signale mit einer Frequenz zwischen 500 MHz und 10 GHz abzapfen, ein Bereich in dem sich viele mit Radiowellen arbeitende Kommunikationskanäle befinden. Die Technologie soll in drei bis vier Jahren marktreif sein.

Fraglich ist, ob derartige Technologien in Deutschland überhaupt erlaubt sind. Laut §248c des Strafgesetzbuchs ist das Anzapfen fremder Stromquellen nämlich eine Straftat, die mit einer Freiheitsstrafe von bis zu 5 Jahren geahndet werden kann!

Die **elektromagnetische Induktion** in direkter Nachbarschaft zum Verursacher nutzt der Prototyp einer Überwachungskamera, die von der NEC Engineering



*Autonome Kamera von NEC*

Ltd. auf der iExpo **2007** im Dezember in Tokyo vorgestellt wird. Dabei wird ein von der Firma Sharp entwickelter ringförmiger Adapter, der im Januar **2006** erstmals präsentiert wurde, über eine Leuchtstoffröhre gezogen. Der Adapter nutzt die elektromagnetische Induktion im Bereich von 45 – 100 kHz um 120 mW Strom zu erzeugen, was zur Versorgung der VGA-Kamera und eines Wi-Fi Chips ausreicht, der die in 10 Sekunden Abstand aufgenommenen Bilder an einen PC sendet.

## Licht und Infrarot

Direkt mit **Bakterien**, welche Licht in Strom umwandeln, beschäftigt sich Prof. Ed Delong vom MIT. Im März **2007** präsentiert er seine mit Seewasser-Mikroorganismen erzielten Ergebnisse, bei denen ein Teil der Gene dazu dient, aus Licht Energie zu erzeugen.

Die Bakterien setzen ein Licht-aktivierendes Protein namens **Proteorhodopsin** ein, das den Proteinen in der Retina des menschlichen Auges ähnelt. Im Verbund mit einem Licht-sensitiven Molekül namens Retinal pumpt das Protein bei Lichteinfall positiv geladene Protonen durch die Zellmembran. Dadurch entsteht ein **elektrischer Potentialunterschied**, der als Energiequelle genutzt werden kann.

Die Forscher setzen den betreffenden DNA-Abschnitt in Escherichia coli Bakterien ein und stellen fest, dass dieser dort innerhalb der Zellmembran das gesamte notwendige System zur Energieerzeugung herstellt und zusammensetzt.

Ein Team des Tokyo Institute of Technology um Prof. Tomiki Ikeda präsentiert nach fünfjähriger Forschung im Juli **2008** einen **Plastik-Motor**, der ausschließlich von Licht angetrieben wird.



*Plastik-Motor*

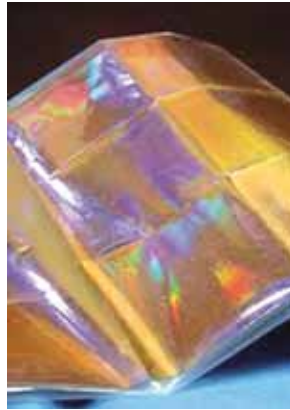
Ohne den Umweg über die

Elektrizitätserzeugung wird die Lichtstrahlung direkt in mechanische Energie umgewandelt. Dabei wird ein Band aus einem speziellen **lichtempfindlichen Elastomer** genutzt, dessen molekulare Struktur sich ausdehnt oder zusammenzieht, wenn sie beleuchtet wird - abhängig von der Wellenlänge des Lichts. Bei Ultraviolett-Licht zieht sich das Band zusammen, im sichtbaren Spektrum expandiert es wieder in seinen ursprünglichen Zustand.



Die Forscher können ein Paar Räder mit 10 mm und 3 mm Durchmesser zum Drehen bringen, indem sie Ultraviolett-Licht auf ein 0,08 mm dickes, Elastomer-beschichtetes Band richteten, das sich um die Räder windet, wobei das UV-Licht das Band in der Nähe des kleinen Rades, und das sichtbare Licht das Band in der Nähe des größeren Rades bescheint. Das 10 mm Rad erreicht dabei eine ‚Höchstgeschwindigkeit‘ von einer Umdrehung pro Minute.

Über das Auffangen von **Infrarot-Strahlung** berichten Wissenschaftler des Idaho National Laboratory im August **2008**, die daran gemeinsam mit der University of Missouri und der Firma MicroContinuum aus Cambridge, Massachusetts, arbeiten. Sie stellen ein flexible Folie aus Kunststoff mit eingebetteten **Nano-Antennen** vor, die in der Lage sind die Strahlungsenergie im mittleren Infrarotbereich zu absorbieren.



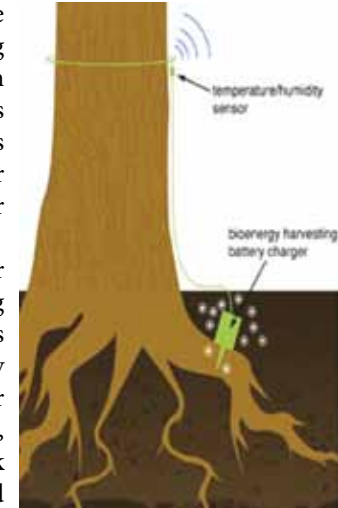
*Nano-Antennen-Folie*

Im Gegensatz zu sonnenabhängigen Solarzellen funktionieren diese Nanoabsorber Tag und Nacht gleichermaßen, wobei sie nachts die Wärmerückstrahlung der Erdoberfläche nutzen.

Die Nano-Antennen selbst sind kleine goldene Spiralen, die in eine speziell behandelte Form von Polyethylen eingelassen werden, um von Silizium-Wafern und starren Substraten wegzukommen. Messungen an Prototypen zeigen, dass die Nano-Antennen mehr als 80 % der Energie der Photonen von der Sonne einsammeln, das Endprodukt könnte daher leicht einen Wirkungsgrad von rund 50 % erreichen, und damit sogar alle derzeitigen Laborrekordhalter überholen. Pro Quadratmeter könnten dann etwa 75 W erwirtschaftet werden. MicroContinuum arbeitet bereits an einem roll-to-roll Produktionsverfahren.

## Ph-Wert

Die Forstverwaltung der USA nutzt eine große Zahl automatischer Wetterstationen, um damit unter anderem auch Vorhersagen über die Entwicklung und den Weg von Waldbränden machen zu können. Aufgrund des hohen Preises und des Wartungsaufwands dieser Wetterstationen ist ihr Einsatz jedoch beschränkt. Wissenschaftler des Center for Biomedical Engineering (CBE) am Massachusetts Institute of Technology (MIT) untersuchen daher Mitte **2008** die Möglichkeit, ob nicht ein **Netzwerk aus Bäumen** genügend Elektrizität produzieren könnte um entsprechende Funksensoren mit Strom zu versorgen. Mittels sich langsam aufladender Pufferbatterien gelingt es, genügend Energie zu ernten um die Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren viermal am Tag ihre Daten absenden zu lassen – oder sofort, falls es brennt. Dabei springt das Signal von einem Sensor zum nächsten, bis es eine Funk-Wetterstation erreicht, von wo aus die Daten über Satellit an das



*Baum-Energie (Grafik)*



*Voltree Power Test*

Kontrollzentrum in Boise, Idaho, gesendet werden.

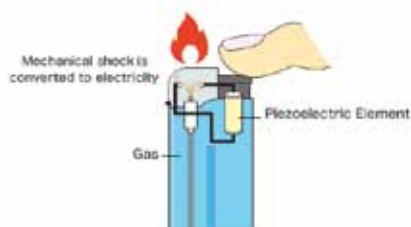
Es stellt sich heraus, dass die Stromproduktion aufgrund eines relativ simplen Phänomens erfolgt – dem **Ungleichgewicht des Ph-Wertes** zwischen dem Baum und dem Erdreich, in dem dieser steht.

Die ersten Feldtests des drahtlosen Netzwerkes und der Batterie-ladenden ‚Bioenergie-Ernter‘, welche von dem **2005** gegründeten Unternehmen Voltree Power aus Canton, Massachusetts, entwickelt werden, beginnen im Frühjahr **2009** und zeigen schon Ende Juni zufriedenstellende Ergebnisse, es werden bis zu 200 Millivolt erreicht.

Vermarktet wird das Gesamtsystem unter dem Namen Early Wildfire Alert Network (EWAN).

### Piezoelektrizität

Fast jedermann kennt den **piezoelektrischen Effekt** von elektronischen Feuerzeugen oder Anzündern her: Durch die Ausübung von Druck auf einen Kristall wird eine elektrische Entladung erzeugt.



*Piezo-Feuerzeug (Grafik)*

**Piezoelektrizität** (auch **Piezoeffekt** oder **piezoelektrischer Effekt**, von griech: piézín – pressen, drücken) bedeutet die Änderung der elektrischen Polarisierung und somit das Auftreten einer elektrischen Spannung an Festkörpern, wenn diese elastisch verformt werden (direkter Piezoeffekt). Umgekehrt verformen sich Materialien bei Anlegen einer elektrischen Spannung (inverser Piezoeffekt). Heute werden für Piezoelemente meist PZT-Keramiken (Blei-Zirkonat-Titanat) benutzt. Die Piezoelektrizität bildet einen der wichtigsten physikalischen Effekte, die im Bereich des Micro Energy Harvesting genutzt werden.

Entdeckt wird der Piezoeffekt im Jahre **1880** von den

Brüdern Jacques und Pierre Curie. Bei Versuchen mit Turmalinkristallen finden sie heraus, dass bei einer mechanischen Verformung der Kristalle auf deren Oberfläche elektrische Ladungen entstehen, deren Menge sich proportional zur Beanspruchung verhält.

Ende **2005** berichtet das Wissenschaftsmagazin Nature über eine Innovation von Shashank Priya an der University of Texas in Arlington, bei der eine taschengroße Miniatur-Windmühle



*Piezo-Kristalle*

zur Stromversorgung eines Sensoren-Funknetzwerkes in abgelegenen Gegenden zum Einsatz kommt. Die Energieumsetzung des nur 10 cm durchmessenden Rotors erfolgt durch das Verbiegen **piezoelektrischer Kristalle**. Schon bei einer geringen Windgeschwindigkeit von 16 km/h werden 7,5 mW erzeugt.

**Seit 2006** besteht das Unternehmen Advanced Cerametrics Inc. (ACI) in Lambertville, New Jersey, dessen Produktlinie aus **piezoelektrischen Fasern** und Verbundwerkstoffen in Textilien eingebettete Mikro-Energiewandler möglich machen. Die patentierten PZT-Fasern sollen aus mechanischer Energie wie Vibration, Druck oder Biegen einen zehn Mal so großen Stromertrag ernten wie andere flexible piezoelektrische Materialien.

Erstes Einsatzgebiet der Technologie sind Tennisschläger und Skier der internationalen Sport-Firma HEAD. Hier werden durch die Umsetzung der geernteten Energie in Form einer aktiven Strukturkontrolle Erschütterungen gedämpft und die Stabilität gegenüber Verwindungen erhöht, wenn beispielsweise ein Ball auftrifft oder



*HEAD-Racket*



HEAD-Ski mit aktiver Strukturkontrolle

der Ski in eine Kurve fährt. Das Resultat sind im Fall der Tennisschläger um bis zu 15 % kräftigere Ballabschläge. Eine Würdigung der Technologie bildet die Auszeichnung ‚Tennis Racket of the Year‘ sowie mehrere Goldmedaillen bei der Olympiade **2008**.

Im November **2009** kommt die Firma NEC Electronics in die Presse, die in Zusammenarbeit mit der japanischen Soundpower Corporation ebenfalls eine Fernbedienung entwickelt hat, die gänzlich ohne Batterien auskommt. Mittels eines **piezoelektrischen Generators** werden die beim Tastendruck entstehenden schwachen Vibrationen zur Energieversorgung des Geräts genutzt. Bereits mit dem Prototyp ist es möglich, die elementarsten Funktionen eines TV-Geräts zu steuern. Der Fernseher kann ein- und ausgeschaltet, die Lautstärke geregelt und der Kanal gewechselt werden.



Fernsteuerungs-Prototyp (NEC)

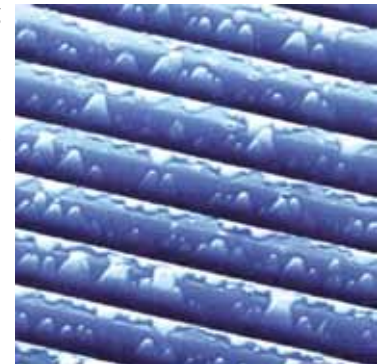
Zum Einsatz kommt ein vibrationsbasierter Generator von Soundpower, einem Piezoelektrik-Spezialist, der diverse Anwendungen dieser Energiegewinnung mittels mechanischer Spannungen untersucht. Unter anderem werden in Tokio Bodenplatten getestet, die in Bahnhöfen die Schritte der Fahrgäste zur Energiegewinnung nutzen. Die Entdeckung eines neuen, Blei-freien piezoelektrischen Material durch Forscher der University of California

in Berkeley und dem Lawrence Berkeley Lab des U.S. Department of Energy (DOE) kommt im November 2009 in die Fachpresse. Die Wissenschaftler finden heraus, dass dünne Schichten von Wismut-Ferrit, einem anorganischen kristallinen Material, das magnetisch-elektrische Phänomene aufweist, auch einen piezoelektrischen Effekt erzeugt, wenn es einem starken und richtig fokussierten Druck ausgesetzt wird. Durch die Beseitigung der Blei-Gefährdung könnte die Berkeley-Entdeckung zu einer vermehrten Anwendung piezoelektrischer Materialien führen, nicht nur in Infrastruktur und Gebäude, sondern auch bei Verbraucherprodukten wie Schuhen oder T-Shirts.

### Piezoelektrische Zinkoxid-Nanodrähte

Eine besondere Wichtigkeit scheinen derzeit piezoelektrische Zinkoxid-Nanodrähte zu erlangen, daher soll diese Technologie im Folgenden gesondert behandelt werden.

Prof. Zhong Lin Wang, Direktor des Center for Nanostructure Characterization am Georgia Institute of Technology (Georgia Tech) in Atlanta, stellt **2006** erstmals **piezoelektrische Zinkoxid-Nanodrähte** (ZnO) vor, die durch zyklisches Dehnen und Entspannen piezoelektrische Potentiale auf- und abbauen. Dadurch entsteht ein wachsender Elektronenfluß mit einer oszillierenden Ausgangsspannung von bis zu 50 Millivolt, von dem bis zu 6,8 % der aufgewendeten mechanischen Energie in Wechselstrom umgewandelt wird. Zur Erprobung des Konzepts nutzen die Forscher einen Generator mit 200 bis 300 Mikrometer langen Drähten.



Zinkoxid-Nanodrähte

Im April 2007 meldet die Presse, dass es Forschern in Atlanta inzwischen gelungen sei, auf der Nano-Ebene mechanische in elektrische Energie umzuwandeln. Hierfür haben sie einen Gleichstromgenerator aus piezoelektrischen Zinkoxid-Nanodrähten konstruiert, der mit **Ultraschall** betrieben wird. Die Drähte sind 40 nm dick und 1 µm lang, und die Stromerzeugung erfolgt, indem die Felder aus Nanodrähten mit einer platinbeschichteten Zick-Zack-Elektrode aus Silizium abgelenkt werden. Drückt diese Zick-Zack-Elektrode auf einen Draht, so wird dieser seitlich ausgelenkt. Dadurch entstehen auf den beiden Seiten des Drahtes mechanische Zug- und Druckspannungen, wodurch sich positive beziehungsweise negative elektrische Potentiale aufbauen.

Im Februar 2008 berichten die Wissenschaftler des Georgia Tech dann über die Entwicklung eines energieerzeugenden Stoffes, der sich für Kleidungen oder Zeltplanen eignet. Die hybride Struktur, die im vorliegenden Fall aus Kevlar-Fasern besteht, auf denen radial Zinkoxid-Nanodrähte gezüchtet wurden, sei besonders gut geeignet um **Vibrationen** und **Reibungsenergie** niedriger Frequenzen (also unter 10 Hz) in elektrische Energie umzuwandeln. Die Forscher kombinierten dazu den piezoelektrischen mit dem Halbleitereffekt. Die Zinkoxid-Beschichtung des Mikrofiber-Nanogenerator-Gewebes verliert allerdings stark an Wirksamkeit, sobald sie naß wird.

Die Forscher schätzen, dass sich aus 1 m<sup>2</sup> des derart aufgebauten textilen Materials zwischen 20 mW und 80 mW gewinnen lassen. Während bei den Laborversuchen die Fäden absichtlich gegeneinander gedreht wurden, könnte in der Natur etwa der **Wind** diese Aufgabe übernehmen.

Für die entsprechend ausgerüstete Kleidung ist auch schnell ein neuer Begriff gefunden: das **Power-Shirt**. Wenn ein Quadratmeter dieses Stoffes bis zu 80 mW Strom erzeugen kann, dann reicht dies vollkommen aus um elektronische Kleingeräte wie Handys oder Sensoren zu versorgen. Denkbar sind ferner Gardinen, die allein durch ein leichtes Bewegen im Wind zum Stromerzeuger werden – oder Zelte, deren

Außenhaut die tragbare Elektronik im Inneren versorgt.

Die Forscher hoffen nun, das Stromerzeugungspotential innerhalb der nächsten drei Jahre soweit zu steigern, dass der Generator in Gewebe eingenäht werden kann, aus dem man Kleidungsstücke fertigt. Dann könnte ein Mensch alleine durch seine Bewegungen tragbare, elektronische Geräte aufladen.

### Regentropfen

Anfang 2008 stellen Französische Forscher um Jean-Jacques Chaillout vom Minatec-Innovationszentrum der Atomenergiebehörde CEA in Grenoble einen Mikro-Generator vor, der aus der Wucht aufprallender **Regentropfen** Strom erzeugen kann. Hauptkomponente ist eine nur 25 µm dünne Oberfläche aus dem piezoelektrischen Kunststoff **Polyvinylidenfluorid** (PVDF), der auf Druck



*Regentropfen-Einschlag*

hin eine elektrische Spannung aufbaut.

Die nur wenige Quadratzentimeter großen Versuchsmodule erbringen bereits eine Leistung bis zu einigen Tausendstel Watt, was beispielsweise ausreicht um autonome Sensoren mit Energie zu versorgen. Durch Simulationen wird ermittelt, dass ein einziger großer Regentropfen eine potentielle Ausbeute von bis zu 12 mW besitzt.



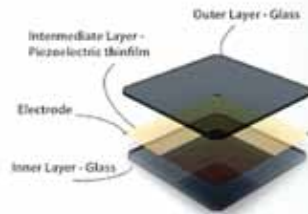


*Lightdrops*

Diese Idee wird Ende **2008** von dem Designer Sang-Kyun Park aufgegriffen, der aus der PVDF-Folie (logischerweise) einen Regenschirm herstellt, dessen Stromertrag auch gleich in eingebaute LEDs fließt, um den Schirmträger und seinen Weg nachts zu beleuchten. Interessanter Effekt: Je stärker es regnet desto heller leuchtet der ‚**Lightdrops**‘-Schirm auf.

## Schall

Im April **2006** berichtet der ZDF Infokanal über eine Entwicklung von Prof. Elmar Breitenbach, Leiter des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik im DLR, bei der ein Piezokristall **Lärm** absorbiert – der ja nichts anderes als eine Vibration in Form von Schallwellen darstellt.



*Farshi (Grafik)*

An dem ‚Create the future contest‘ der NASA beteiligt sich **2008** auch der Inder Devavrat Madhavi aus Bangalore

mit dem Konzept einer verglasten, Schall-absorbierenden Fliese namens ‚Farshi‘ welche die eingefangene Energie mittels einer piezoelektrischen Folie in Strom umwandelt. Insbesondere auf Flughäfen, wo in 100 m Entfernung von startenden Maschinen noch ein Schalldruck von bis zu 120 db (entsprechend ca. 25 Pascal) gemessen werden kann, ließe sich das System gut nutzen.

Die Designer Jihoon Kim, Boyeon Kim, Myung-Suk Kim und Da-Woon Chung aus Korea beteiligen sich mit ihrem ‚**Sonic Energy Absorber**‘ (SONEA) an der International Design Competition **2008** in Japan. Das bereits ausgereift wirkende System besteht aus einzelnen Elementen in den Maßen 45 x 45 x 8 cm, die jeweils 7 kg wiegen.

Ich weiß nicht, ob die Rechnung schon experimentell überprüft worden ist – sie liest sich jedenfalls recht eindrucksvoll: Pro startendem Flugzeug mit rund 140 db



*SONEA (Grafik)*

soll ein SONEA-Element 240 kW produzieren. Bei einer Kalkulation mit 500 Flugzeugen pro Tag ergibt das immerhin einen Tagesertrag von rund 120 MW pro Element!

Im Dezember **2008** macht ein weiteres interessantes Konzept von sich reden. Der auf Nanotechnologie spezialisierte Chemieprofessor Tahir Cagin von der Texas A&M University entdeckt gemeinsam mit seinen Kollegen an der University of Houston ein piezoelektrisches Material, das die Energie der beim Sprechen ausgesendeten **Schallwellen** so effektiv in Strom umwandeln kann, dass damit elektrische Geräte wie beispielsweise Mobiltelefone betrieben werden können. Der Schall des ins Mikro Sprechenden wird als mechanischer Impuls genutzt, der die Spannung erzeugt.



## Straßengeneratoren

Der Erfinder Peter Hughes aus Dorset stellt nach zwölfjähriger Entwicklungszeit Ende **2005** eine Art Straßerampe vor, die darüberfahrende Autos benutzt um Strom zu erzeugen. Jedes Mal, wenn ein Auto über die Metallplatten fährt, soll die ‚**Electro-Kinetic Road Ramp**‘ durchschnittlich 10 kW produzieren. Die Bewegung der Platten wird auf ein speziell entwickeltes **Schwungrad** übertragen, das einen Generator zur Stromerzeugung antreibt.



*Kinetic Plates vor Sainsbury's*

In England ist es die Großhandelskette Sainsbury's, die Mitte **2009** als erste auf einem ihrer Parkplätze in Gloucester kinetische Platten von Highway Energy Systems installieren läßt, welche sich innerhalb von zwei Jahren amortisieren sollen. Die darüber hinweg fahrenden Pkw erzeugen pro Stunde etwa 30 kW. Wenn der Testlauf erfolgreich ist, will das Unternehmen die Platten in allen seinen Filialen einführen.

Im April **2008** erscheint ein Bericht über eine weitere Umsetzung durch Terry Kenney, der acht Jahre dafür brauchte, um einen funktionierenden Prototyp auf, bzw. in die Straße zu bekommen. Bei seiner im Hafen von Oakland liegende ‚Dragon Power Station‘ komprimieren

breite und robuste Stahlplatten eine **Hydraulikflüssigkeit**, sobald ein großer Lkw darüber fährt (pro Tag fahren rund 2.500 von ihnen in den Hafen), was wiederum eine Reihe von Pumpen in Aktion setzt, die einen Generator zur Stromerzeugung antreiben. Der Erfinder schätzt, dass er im Juni 5.000 – 7.000 kWh Strom pro Tag erwirtschaften wird, was ausreichen sollte um etwa 1.750 Wohnungen zu versorgen – für einen Prototyp eine beachtliche Leistung.

Mit einer anderen technologischen Lösung, um die mechanische Energie von Fahrzeugen anzuzapfen, tritt Ende **2008** die israelische Firma Innowattech auf den Plan. Hier werden die Schwingungen, die durch die Fahrzeuge auf Straßen, Schienen oder Landebahnen verursacht werden, von piezoelektrischen Generatoren aufgenommen. Im Oktober 2009 kam das System auf einem zehn Meter langen Autobahnabschnitt nahe der Kleinstadt Hadera erstmals unter realen Bedingungen zum Einsatz. Das Experiment zeigte: 600 Fahrzeuge erzeugen pro Kilometer auf jeder Fahrspur 200 Kilowatt Strom. „Das reicht aus, um 200 Haushalte mit Elektrizität zu versorgen“.

Letztendlich darf man bei all diesen Systemen aber nicht vergessen, dass die derart ‚gewonnene‘ Energie tatsächlich aus den fossilen Brennstoffen der Fahrzeuge stammt, die ja erst für deren Bewegung sorgen.

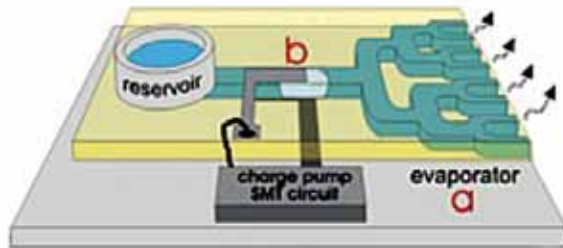
Ein weiteres Design für diese Technologie stammt von dem Designer Jaeyong Park und wird im November **2009** in den Blogs unter dem Namen ‚Carbon Zero‘ vorgestellt. Hierbei handelt es sich um eine Art markierter Straßen-Pflastersteine, unter denen Schichten aus **n-Typ Silizium** und **P-Typ Silizium** (diese werden auch bei der Herstellung von Solarzellen verwendet) zusammenwirken, sobald sie dem Druck eines darüberfahrenden Autos ausgesetzt werden. Dabei wird ein Gleichstrom erzeugt, der anschließend in Wechselstrom umgewandelt wird, um elektrische Geräte in Häusern und Geschäften in Nähe der Straße zu versorgen.

## Verdunstungsgenerator



*Mikro-Aktor*

Im August **2009** berichtet die Presse wieder über die Arbeiten von Maharbiz, nachdem es dem Team an der UC Berkeley gelungen ist, eine Art ‚künstliches‘ **Pflanzenblatt aus Glas** herzustellen, das mittels der Verdunstung einen konstanten Energiefluß abgeben kann. Die Blätter sind aus Glas-Wafern hergestellt und besitzen eine Reihe kleiner, mit Wasser gefüllter Kanäle. Die Flüssigkeit fließt durch die Kanäle, bis sie den Rand des Blattes erreicht wo sie verdunstet.



*Glas-Blatt Konzept (Grafik)*

Die eigentliche Stromerzeugung erfolgt in zentral gelegenen Blattstiel, der mit Metallflächen ausgekleidet ist, die an einen Stromkreis angeschlossen sind. Die durch eine Wasserschicht getrennten, geladenen Metallplatten stellen im Grunde einen Kondensator dar. Da das Wasser, das mit einer Geschwindigkeit von 1,5 cm pro Sekunde

durch das Blatt fließt, in regelmäßigen Abständen durch kleine Luftblasen unterbrochen wird, und weil Luft und Wasser unterschiedliche elektrische Eigenschaften haben, wird jedes Mal wenn eine Luftblase zwischen den Platten hindurchstreicht, ein elektrischer Strom erzeugt, der dann geerntet und zur Stromversorgung von Geräten, Wohnungen oder anderen Energieverbrauchern verwendet werden kann.

Jede Blase produziert von 2 bis 5 Mikrovolt, während die Leistungsdichte des gesamten Gerätes 2 Mikrowatt pro Kubikzentimeter beträgt. Maharbiz ist der Auffassung, dass durch eine weitere Optimierung eine Leistungsdichte von mehreren Hundert Mikrowatt pro Kubikzentimeter erreicht werden kann.

## Vibration

Als Spin-off der Southampton University wird 2004 das Unternehmen Perpetuum Ltd. gegründet, das sich schon bald als das weltweit führende Unternehmen für das Ernten von Vibrationsenergie bezeichnet. Ab 2006 werden die Mikrogeneratoren in drei Größen und verschiedenen Versionen angeboten. Der speziell für den Einsatz in Hubschraubern entwickelte PMG 27 beispielsweise wiegt 400 g, hat die Maße 53 x 53 mm und liefert 7,5 V/2 mW.

Ähnliche elektromechanische Sensoren, die ihre Energie aus den Vibrationen einer Maschine gewinnen, werden direkt am Gehäuse dieser Maschine befestigt und schlagen über Funk Alarm, wenn diese nicht rund läuft.

Im Mai **2005** stellt das Centre for Energy & Greenhouse Technologies im australischen Churchill, Victoria, unter dem Namen **Kinetic Energy Cell (KEC)** eine



*PMG von Perpetuum*

Technologie vor, mit der jegliche Form von Vibration in Elektrizität umgewandelt werden kann. Entwickelt wird diese in Zusammenarbeit mit dem Research Centre for Microtechnology in Melbourne. Zu diesem Zeitpunkt hat die KEC die Größe einer 9 V Batterie – Ziel ist es, auf die Größe einer AA-Batterie zu kommen.

Im Kern besteht das System aus einer Reihe sehr kleiner Spulen und einigen Magneten. Technisch ist eine Anpassung der nur 7 Bauelemente an unterschiedliche Frequenzen möglich, womit sich ein sehr breites Einsatzfeld auftut, angefangen von der Lauffrequenz von Fußgängern bis hin zu Vibrationsfrequenzen des Straßenverkehrs, von Brücken oder sogar von Gebäuden. Als Speichermedium zur Kulminierung der vielen kleinen Energieimpulse bieten sich Superkondensatoren an.

Das Unternehmen arbeitet auch an einem LED-Licht mit eigenem Mikrogenerator. Die Umwandlung der Vibrationen vorbeifahrender Züge, Lastwagen usw. erlaubt eine dauerhaft nutzbare Lichtquelle, ohnedass hierfür Kabel verlegt werden müssten.

Ende **2005** stellt ein gewisser Timothy Mijal das Konzept eines Reifens vor, der mit einer Reihe von Spulen und Neodym-Magneten ausgestattet ist, welche die beim Fahren entstehenden Vibrationen in Strom umwandeln. Sie sollen einen Beitrag zum Nachladen von Elektromobilen während der Fahrt leisten.

An der Southampton University wird im Juli **2007** ein weiterer **Vibrationsgenerator** vorgestellt, der in Zukunft Herzschrittmacher mit Strom versorgen soll. Der



*Vibrationsgenerator von Beeby*

ab Januar **2004** und eigentlich für den Einsatz innerhalb von Luftkompressoren entwickelte Generator ist kleiner als ein Kubikzentimeter. Sein Erschaffer Dr. Steve Beeby

behauptet, dass er außerdem 10 Mal effizienter sei als alle bislang bekannten Modelle.

Der Generator nutzt die in der Umwelt vorhandenen Vibrationen, um Magnete, die auf einem Träger im Zentrum des Gerätes liegen, in Schwingung zu versetzen und Strom im Mikrowattmaßstab zu erzeugen. In einem Herzschrittmacher ist der menschliche Herzschlag stark genug, um die Magneten im Gerät in Schwingung zu halten. Eine künstlerische Auseinandersetzung mit dem Thema Micro Energy Harvesting bilden die pilzartigen Strukturen, die der Künstler Peter Dalton im September **2009** unter dem etwas langen Titel ‚Touch Powered By Intrigue Concept‘ in einem stark frequentierten Fußgängerbereich aufstellt. Die durch Berührung entstehende Bewegung wird von einem piezokeramischen Kern in Strom umgesetzt, welcher die Leuchtfasern im Kopf des ‚Pilzes‘ zum Strahlen bringt.



*Intrigue*

## Wärme

Im Zusammenhang mit dem **Micro Energy Harvesting** sollen hier die aktuellen Entwicklungen der vergangenen Jahre präsentiert werden, wobei es primär um die Ausnutzung sehr geringer Temperaturunterschiede geht.

2006 erscheint in den Blogs das Konzept eines Ringes mit dem (vermutlich Wortspiel-inspirierten) schönen Namen ,Remember Ring', der seinen Energiespeicher ebenfalls durch die Körpertemperatur auflädt. Er ist mit

REMEMBER RING™  
NEVER FORGET AN ANNIVERSARY!



*Remember Ring (Grafik)*

einer Kalenderfunktion ausgestattet, die sich bemerkbar macht, indem sich der Ring 24 Stunden vor dem eingestellten Datum (Hochzeitstag!) jede Stunde für rund 10 Sekunden auf 50°C aufheizt. Allerdings hat der Spaß mit dieser ‚Hot Spot‘-Technologie auch seinen Preis: 760 \$. Und leider scheint sich dieses intelligente Konzept bislang noch nicht zu einem **Produkt entwickelt zu haben**.

Auch am Heinz-Nixdorf-Institut an der Universität Paderborn arbeitet man 2008 an energieautarken Systemen. Neben den bekannten Piezokeramiken und elektromechanischen Generatoren werden hier ebenfalls thermoelektrische Elemente untersucht. In diesen werden in einem Halbleitermaterial durch den Temperaturunterschied zwischen einer kalten und einer warmen Seite Elektronen zum Fließen gebracht – ähnlich wie in einer Photovoltaik-Zelle durch Sonnenenergie. Die ersten thermoelektrischen Elemente wurden übrigens

schon vor mehr als zwanzig Jahren in Satelliten eingesetzt, wo sie das extrem starke Temperaturgefälle zwischen deren sonnenbeschienener und deren dunkler Seite nutzen.

Im Februar 2007 meldet der Forscher Arun Majumdar von der University of California in Berkeley einen Erfolg bei der Direktumwandlung von Wärme in Strom, in dem organische Moleküle wie Benzenedithiol, Dibenzenedithiol oder Tribenzenedithiol zwischen metallischen Nanopartikeln aus Gold plziert und damit ein organisches thermoelektrisches Material hergestellt wird. Diese Technik gilt als erstmalige Umsetzung des Seebeck-Effekts bei organischen Molekülen und eröffnet die Möglichkeit völlig neuartiger Kühlgeräte und Energiewandler.

Besonderes Interesse besteht daran, die menschliche **Körperwärme** als Energiequelle zu nutzen. Entsprechende thermoelektrische Generatoren (TEG) aus Halbleiterelementen werden 2007 auch von Forschern des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen in Erlangen entwickelt – gemeinsam mit Kollegen von den Fraunhofer-Instituten für Physikalische Meßtechnik IPM und für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM.



*TEG des Fraunhofer-Instituts*

Bislang erreichen die Geräte aufgrund der relativ geringen Temperaturdifferenz zwischen der Körperwärme und der Umgebungstemperatur erst etwa 200 mV. Ziel ist es jedoch, mindestens 1 – 2 V zu erzielen, um elektronische Geräte versorgen zu können. Hierfür wird eine sogenannte ‚Ladungspumpe‘ entwickelt, welche die geernteten Millivolt so lange speichert, bis ein Output von 1,8 V erreicht wird.



Insbesondere für den Einsatz in ländlichen Gebieten Afrikas und Asiens wird das thermoakustische Prinzip im Rahmen des im Februar 2007 gestarteten multinationalen Projektes SCORE (Stove for cooking, refrigeration und electricity) umgesetzt, das hierfür mit einer Summe von 2 Mio. britischen Pfund ausgestattet ist. Dabei geht es um die Entwicklung eines holzbefeuerten Generators, der außer zum Kochen auch zum Kühlen von Nahrung geeignet ist. Immerhin nutzen noch heute rund 2 Milliarden Menschen offene Feuer, bei dem etwa 93 % der entstehenden Hitze ungenutzt bleibt!

Beim SCORE-Ofen wird die Wärme nicht nur zum Kochen verwendet, sondern auch zu einem Rijke-Rohr geleitet, das sie in einen Ton umwandelt. Dessen Transformation in Elektrizität bewerkstelligen jedoch keine piezoelektrischen Elemente, sondern ein **linearer Alternator**. Durch die Schallwellen wird ein Magnet innerhalb einer Spule hin und her bewegt und so ein Strom induziert.

Die Zielvorgaben für den 3.-Welt-Generator lauten: Gewicht 10 – 20 kg, Verbrauch 2 Holzscheite/h, Leistung 1,6 kW thermisch und 100 W elektrisch (über Pufferbatterie), Preis rund 30 €.

SCORE beabsichtigt, lokale Kräfte auszubilden, um die Herstellung der meisten Komponenten in Werkstätten vor Ort durchzuführen. Die Großproduktion soll ab 2012 beginnen – ins Auge gefaßt sind 1 Mio. Stück pro Jahr. Bis dahin wird auch untersucht, ob Versionen für Brennstoffe wie Dung oder Gas sinnvoll sind.

Grundlegend für die SCORE-Entwicklung sind die thermoakustischen Stirlingmotoren und Kühlgeräte, die im Laufe der vergangenen Jahre am Los Alamos

Forschungsinstitut, von der NASA und vom US-Militär entwickelt worden sind. Im Juni 2008 erhält das SCORE-Konsortium sein erstes Patent (Nr. 0811686.5) über ein einfaches und preisgünstiges Herstellungsverfahren mit teilweise sehr dünnen und leichten Materialien. Anfang 2010 sollen in Nepal Feldversuche mit dem SCORE-Konzept beginnen.



*SCORE-System in Nepal*

Das Unternehmen Solar Botanic Ltd. aus London präsentiert 2008 das Konzept eines künstlichen Baumes, der sowie die Lichtstrahlung als auch Wind und Regen zur Stromerzeugung nutzt. Die ‚Nanoleaf‘ genannten Blätter des Baumes sind photoaktiv, beinhalten **thermoelektrische Elemente** und sitzen an piezoelektrischen Stengeln. Über die Effizienz liegen noch keine genauen Angaben vor, das Unternehmen schätzt jedoch, dass ein mittelgroßer Baum ausreichend Strom für einen 1-Personen-Haushalt erzeugen kann.

Zu den Finalisten des James Dyson Award 2009 gehört ein Armband des französischen Designerteams Mathieu Servais, Camille Lefer, Clément Faydi und

Mickaël Denié, das den Peltier-Element bzw. den Seebeck-Effekt nutzt um aus der Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der anderen Oberfläche, die in Berührung mit der Haut bleibt, Strom zu erzeugen. Dieser wird in einem integrierten Li-Po Akku gespeichert um später dazu benutzt zu werden ein Mobiltelefon aufzuladen. Ein winziges Display in Form mehrerer Kleinst-LEDs zeigt den jeweiligen Ladezustand des ‚Dyson Energy Bracelet‘ genannten Designs.



# Energiesparen

## Ausgangssposition

Während der im Auftrag der Bundesregierung tätige Sachverständigenrat für Umweltfragen in seinem Gutachten ‚Energie und Umwelt‘ 1981 feststellt, dass jede Form der Energieentfaltung schwer kalkulierbare Schäden in der Umwelt und für die Gesundheit verursacht, erklären Wirtschaftswissenschaftler, das bis zu einer gewissen Grenze jede Form der Energieeinsparung preiswerter ist, als der notwendige Kapitaleinsatz für eine noch so raffinierte und fortschrittliche Ausbeutung fossiler Quellen.

Aus beiden Ansichten lässt sich ableiten, dass es nicht besonders sinnvoll ist, sich über die Methoden zu streiten, mit denen der Energiebedarf gedeckt wird, sondern das es viel wichtiger ist, diesen möglichst schnell und nachhaltig zu senken!

Seit über dreißig Jahren tobt bereits die Schlacht um die Machbarkeit des sogenannten 3-Liter-Autos. Dabei liegt diese Zielsetzung die ganze Zeit über im Bereich des Machbaren, wäre auch der politische Wille da. Denn was wirklich möglich ist, zeigt z.B. der Eco-Marathon-Weltrekord beim Rockingham-Rundkurs von 2003: Das ethanolbetriebene Sparmobil des Siegerteams, von Studenten der technischen Fachschule Lycée St. Joseph de La Joliverie in Frankreich entwickelt, schafft umgerechnet mit einem Liter Benzin eine Strecke von 3.789 Kilometer(!) – was schier unglaublich ist, selbst wenn man es mit den inzwischen produzierten sparsamen Fahrzeugen vergleicht! Etwa 50 % aller produzierten Mengen an Sekundärenergie gehen beim Herstellungsverfahren, beim Transport und während des Verbrauchs sinnlos verloren. Es ist also kein Wunder, wenn im Energiesparen die größten und auch am schnellsten nutzbaren Kapazitäten gesehen werden – wobei das Energiesparpotential manchen Angaben zufolge sogar bei etwa 60 % liegen soll!

Die notwendigen Investitionen für die Ausnutzung dieser

bereits vorhandenen Energiemengen sind nicht gering: Die EG schätzt 1979, das nur die dringendsten Investitionen während der folgenden 10 Jahre etwa 500 Mrd. \$ kosten würden. Andere Institute nennen in einem Energie-Szenario sogar einen, bis zum Jahr 2030 weltweit benötigten Betrag von 40.000 Mrd. \$! Dies ist nachvollziehbar wenn man bedenkt, dass solche Unternehmen stark an gut finanzierten und langjährigen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben interessiert sind – und der wellenartigen Produktion immer ‚noch ein wenig sparsamerer‘ Geräte usw. Allerdings schätzt die International Energy Agency 2003, das schon bis 2010 rund ein Drittel des aktuellen Energiekonsums in den OECD-Ländern durch einen Umstieg auf heute schon verfügbare Geräte eingespart werden könnte.

Gerade das Kfz ist ein Energieschlucker ersten Ranges (es verbraucht etwa ein Viertel des gesamten Mineralölbedarfs der Bundesrepublik), und weil gerade das Rohöl neben energetischen und ökologischen insbesondere politischen Gesichtspunkten unterworfen ist, wird der Energiesparhebel besonders gerne in diesem Bereich angesetzt. Neben der Geschwindigkeitsbegrenzung gibt es weitere Vorschläge, die sich mit einer Verbrauchsminderung im Kfz-Sektor beschäftigen:

1. Fahrverbote
2. Flexible Ampelintervalle, je nach Verkehrsaufkommen automatisch geregelt
3. Kenntnissnachweis über kraftstoffsparende Fahrweise bei der Fahrprüfung
4. Produktion sparsamer Autos, Spargetriebe
5. Nutzung synthetischer Motoröle
6. Supraleitende Elektromotoren in Kfz-Bau
7. Kfz-Steuer, die sich an Geräusch- und Abgasemission orientiert

Bei Neuwagen sinkt der Brennstoffverbrauch in den Jahren 1977 bis 1987 immerhin um rund 25 %.

Während in der Industrie die Nutzung von Abwärme und Recycling-Prozessen zum Energiesparen besonders

attraktiv sind, ist dies im privaten Rahmen eher das individuelle Sparen, d.h. der verantwortungsvolle Umgang mit der Energie, wie dem nur nächtlichen Anschalten energiefressender Geräte, der Installation von Energiesparlampen.

Zunehmend kommen auch die Produzenten den Verbrauchern entgegen, z.B. mit der Einführung bestimmter Verbrauchsnormen für Haushaltsgeräte.

Im Haushalt gibt es eine sehr einfache Möglichkeit, den Energieverbrauch zu senken, denn allein der Standby-Betriebfrisst inzwischen 16%(!) des Gesamtstromverbrauchs (Stand 2005; dabei ist es sehr leicht diesen Verbrauch einzudämmen – z.B. mit einer Schalter-Stromleiste, mit deren einem Schalter die gesamte Medienwand oder der komplette Computerarbeitsplatz abgeschaltet werden kann. Inzwischen gibt es aber auch intelligente Steuerungen, die bei unnötigem Verbrauch entweder warnen oder sogar selbsttätig eingreifen und beispielsweise in einem Raum die Heizung sofort herunter drehen, wenn dort ein Fenster geöffnet wird.

Eine Studie des Fraunhofer ISI Instituts ermittelt einen Stromverbrauch in den Haushalten durch so genannten Leerlauf – und Standby-Verluste in Höhe von etwa 240 kWh pro Jahr und Person, und das sind tatsächlich rund 16 % des Gesamtstromverbrauchs im Haushalt. Nach Berechnungen des Umweltbundesamtes summieren sich die Leerlaufverluste in Deutschland auf jährlich mindestens 3,5 Mrd. €!

Beim Heizen bringt Energiesparen am meisten, denn etwa 70 % der im Haushalt verbrauchten Energie fließt ins Heizen, während jedes Grad Raumtemperatur weniger ca. 6% Heizkosten einspart.

Für manchen klingt dies vielleicht nach lustfeindlicher Gängelei zur Sparsamkeit, doch was für den Einzelnen nur zu Einsparungen von einigen hundert Kilowattstunden führt, bringt in der Summe eine ganze Menge: Angenommen die Privathaushalte in Deutschland senken durch ein

bewusstes Nutzerverhalten ihren Energiehunger nur um bescheidene 10 %, dann würde dies zu Einsparungen von 113.000 kWh pro Jahr führen – und dies wiederum würde umgerechnet 16 Kernkraftwerke überflüssig machen (!) – ohne Komfortverlust und weitestgehend sogar ohne Investitionen.

### **Sommerzeit**

Die Idee für eine spezielle, energiesparende Sommerzeit hatte Benjamin Franklin schon 1783, doch es dauerte fast 150 Jahre, bis die Engländer 1925 als erste die Sommerzeit tatsächlich einführten, um das Tageslicht besser ausnutzen zu können. 2007 wird sie in 76 Staaten angewandt und beeinflusst damit rund 1,6 Mrd. Menschen.

Auf Anfrage der FDP-Fraktion bestätigt die Bundesregierung im Mai 2005, das die erwünschte Energieeinsparung in Deutschland nicht erreicht werden konnte.

Auch Umweltbundesamt-Präsident Andreas Troge lässt im Oktober 2007 verlauten, „durch das Vor- und Zurückstellen der Uhren wird keine Energie eingespart.“

In den USA wird 2005 beschlossen, daß die Daylight Saving Time (DST) ab 2007 um vier Wochen verlängert wird, obwohl bekannt ist, das die abendlichen Einsparungen durch dunklere und kältere Morgen restlos wieder aufgezehrt werden. Die aufgrund von Simulationen erwartete Stromeinsparung (0,6 bis 3,5 %) wird laut einer Studie der University of California, Berkeley, nicht erreicht. Es wird sogar ein Verbrauchsanstieg festgestellt (im Jahresdurchschnitt 1 %, mit Peak im Herbst von 3 – 4 %), was alleine im untersuchten Bundesstaat Indiana, wo der Verbrauch von 7 Mio. Haushalten drei Jahre lang beobachtet wird, für zusätzliche Energiekosten von jährlich knapp 9 Mio. \$ sorgt. Der Studie zufolge kann dieser Mehrverbrauch in anderen Staaten und Ländern noch größer ausfallen.

Im Oktober 2008 finden schwedische Mediziner am Karolinska Institute und dem National Board of Health and

Welfare heraus, das die Anzahl von tödlichen Herzattacken ebenso wie die von allgemeinen Krankenhauseinweisungen am Tag nach einer Zeitumstellung um 5 – 10 % zunimmt.



*Lunar-resonant*

Wirtschaftlich sinnvoll ist auch die Reduzierung der nächtlichen Lichtemission insgesamt. Nicht nur Astronomen beklagen sich über den zunehmenden Licht-Smog durch unsinnige Straßenbeleuchtungen und Lichtreklamen. Die ersten Maßnahmen werden bereits vor rund 50 Jahren in Flagstaff, Arizona, veranlaßt, um die Arbeit des Lowell-Observatoriums nicht weiter zu beeinträchtigen. 2001 wird Flagstaff von der International Dark-Sky Association zur weltweit ersten ‚Stadt des dunklen Himmels‘ erklärt.

Inzwischen ist man auch in anderen Ländern darum bemüht, die Lichtverschmutzung unter Kontrolle zu bekommen. Immer mehr Städte verpflichten sich dazu, sogar ganze Staaten wie die Tschechische Republik. In Deutschland kann man sich inhaltlich über das Portal [lichtverschmutzung.de](http://lichtverschmutzung.de) weiter informieren.

Ein Umsetzungsmodell hierfür bildet das Konzept des US-

Designkollektives Civil Twilight, das 2007 den Preis des Metropolis-Magazins gewinnt: Bei der Straßenbeleuchtung namens ‚Lunar-resonant streetlights‘ werden die Lampen mit Lichtsensoren ausgestattet, die sie mit zunehmendem Mondlicht immer weiter dimmen und sie in den Vollmondtagen sogar vollständig ausschalten.



*Light Way*

Im Kleinen bringt das System ‚Light Way‘ genau da Licht ins Dunkel, wo es grade gebraucht wird. Auch bei dieser Designidee aus dem Jahr 2008 wird die Helligkeit der Bodenbeleuchtung mittels Nahfeldsensoren gesteuert. Das Licht, das über optische Leitungen aus Fiberglas von einer zentralen Lichtquelle aus verteilt wird, ist normalerweise auf eine dunkle Stufe gedimmt und leuchtet erst auf, wenn in unmittelbarer Nähe Bewegungen erfasst werden.

## Energiesparlampen

Die Europäischen Kommission verbietet herkömmliche Glühlampen im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie stufenweise nach Wattzahlen und Energieeffizienzklassen orientiert und schrittweise ab 2009:

Ab dem 01.09.2010 sind Glühbirnen ab 75 W verboten.

Ab dem 01.09.2011 sind Glühbirnen ab 60 W verboten.

Ab dem 01.09.2012 sind Glühbirnen ab 25 W verboten.

Ab dem 01.09.2013 werden die Kriterien, nach denen ein Leuchtkörper ‚energieeffizient‘ ist, weiter verschärft.

Ab dem 01.09.2016 sind auch ‚ineffiziente‘ Halogenlampen der Klasse C – dazu zählt ein Großteil der derzeit vertriebenen Spots – verboten.

Bis 2015/2016 sollen Glühlampen dann vollständig verschwunden und flächendeckend durch Energiesparlampen ersetzt worden sein. Die Kommission rechnet mit Einsparungen für die Verbraucher in Europa in Höhe von 5 – 8 Mrd. €. Im Dezember 2008 genehmigen die Energieminister der Europäischen Union den Fahrplan der Kommission, obwohl es allgemein bekannt ist, daß die Technologie der Energiesparlampen im Grunde schon überholt ist, daher werde ich auch nicht darüber berichten, sondern nur ihre Probleme aufzeigen:

1. Leider sind die Energiesparlampen am Ende ihrer Lebensdauer Sondermüll (Quecksilber), der entsprechend entsorgt werden muß. Oft enthalten sie außerdem noch elektronische Bauelemente.

2. Die Lebensdauer dieser Lampen sinkt mit der Anzahl ihrer Ein-/Ausschaltzyklen, d.h. ihre Verwendung ist nicht für alle Anwendungsfälle sinnvoll (z.B. Treppenhausbeleuchtung oder allgemein in Räumen, in denen man nur für kurze Zeit Licht braucht). Ohne daß ich jetzt konkrete Zahlen habe ist auch die Herstellung von Energiesparlampen mit höherem Energieeinsatz verbunden, als die von konventionellen Glühlampen. Bei der Sondermüllverarbeitung muß ich dann noch weitere Energie reinstecken.

3. Die Hersteller der Energiesparlampen haben natürlich ein großes Interesse daran, die Glühlampen zu verbieten. Sie verdienen an diesen ja auch nichts mehr, denn die Glühlampenproduktion findet längst nur noch in Schwellenländern statt, und die Maschinen sind dorthin verlagert und verkauft. Mann, wie könnten die ihre Produktion hochfahren, wenn die gute alte Glühlampe verboten würde!

4. Die Lichtausbeute von Energiesparlampen ist stark temperaturabhängig, daher eignen sie sich nicht zur Beleuchtung bei niedriger Temperatur. Außerdem benötigen sie eine gewisse Zeit, bis sie überhaupt angehen, und sie erreichen ihre maximale Lichtausbeute erst nach einiger Zeit, z.T. länger als 15 Minuten.

Aber es geht besser !

## LED

Eine sehr wichtige Entwicklung bedeutet die maßgeblich von vier Gruppen in den USA erfundene LED (Light Emitting Diode), deren Lichtausbeute sich im Laufe weniger Jahrzehnte und innerhalb mehrerer Sprünge um vier Größenordnungen steigert, und die durch den Einsatz

von Galliumnitrid (statt Siliziumcarbid) auch an Qualität und Effektivität sehr gewinnt. Aber die Technologie wurde schon 1927 erkannt, als dem russische Radiotechniker Oleg Vladimirovich Losev auffiel, dass mit Strom durchflossene Dioden manchmal Licht emittieren.

Diese Lichtquellen sind klein wie ein Staubkorn, verbrauchen bei gleicher Lichtleistung rund ein Fünftel des Stroms herkömmlicher Glühlampen und halten bis zu 50 Mal länger, wenn sie nicht überhitzt werden. Zudem sind sie quecksilberfrei.



Weißer LEDs

LED's werden hauptsächlich zu Beleuchtungszwecken verwendet, sind aber auch für Darstellungszwecke im Einsatz als sehr große Displays.

Der Millennium-Technologiepreis 2006 wird dem Japanischen Physiker Shuji Nakamura verliehen, der Mitte der 1990er Jahre blaue, grüne und weiße LEDs und blaues Laserlicht entwickelt hat. Nakamura hatte jahrzehntelang zielstrebig daran gearbeitet etwas zu erreichen, was andere Wissenschaftler für unmöglich hielten: aus Galliumnitrid blaues, grünes und weißes Licht sowie blaues Laserlicht zu erzeugen. Eine der bedeutsamsten zukünftigen Anwendungen der Erfindungen von Nakamura besteht im Sterilisieren von Trinkwasser, denn die Wasseraufbereitung mit UV-LEDs gestaltet sich effizienter und vorteilhafter als mit den gegenwärtigen Methoden.

Eine Marktanalyse geht 2006 davon aus, daß 2025 fast jede dritte Lichtquelle auf LED-Technik beruhen wird. Die Lichtleistung der LEDs verdoppelt sich gegenwärtig etwa alle zwei Jahre, ihre Lebensdauer beträgt rund 50.000 Stunden und die Effizienz soll bereits bei 90 % liegen.

Eine Studie des Sandia National Laboratory aus dem Jahr 2007 schätzt, dass die Welt 120 GW weniger an elektrischer Leistung benötigen würde, wenn die Hälfte der Beleuchtung bis 2025 aus LEDs bestünde. 100 Mrd. \$ im Jahr ließen sich so sparen – sowie 350 Megatonnen CO<sub>2</sub>.

2007 wird der Lexus mit den ersten LED-Scheinwerfern ausgestattet, ein Jahr später zieht Audi nach.

Inzwischen werden die US-Luftwaffenbasen im Nahen und Mittleren Osten mit LED-Flutlichtern der Firma Carmanah Technologies Corp. beleuchtet und gesichert, die sich in den dortigen Wetterkonditionen als hochtauglich erwiesen haben. Die Stromversorgung der LED-Landebahnbeleuchtung erfolgt sogar mittels Solarzellen.

Diese Lampen haben eine Reichweite von bis zu 5 km. Die in wenigen Minuten installierbaren Systeme beinhalten als wetterfeste Einheiten

alles für den wartungsfreien, mehrjährigen Dauerbetrieb. Schon im Oktober 2007 gibt die US-Stadt Ann Arbor, Michigan, ihren Plan bekannt, als erste Stadt Amerikas die öffentliche Beleuchtung im Laufe von zwei Jahren komplett auf LEDs umstellen zu wollen. Kooperationspartner ist das LED-Unternehmen Cree Inc., von dem die eingesetzten Lampen stammen. Ab November werden als erster Schritt über 1.000 Straßenlampen *a u s g e w e c h s e l t*. Insgesamt will die Stadt damit gut 100.000 \$ Energiekosten pro Jahr einsparen.

Weitere Städte mit ähnlichen Ambitionen, die sich zur LED City™ Initiative zusammengeschlossen haben, sind Raleigh, North Carolina, und das kanadische Toronto.



*Led Streetlight (Designmuster)*

Bundespräsident Horst Köhler zeichnet im Dezember 2007 ein Forscherteam aus Jena, das ein Verfahren entwickelt hat, mit dem Leuchtdioden heller gemacht werden können, mit dem 250.000 € schweren Deutschen Zukunftspreis aus. Die Wissenschaftler des Regensburger Unternehmens Osram Opto Semiconductors bauen in die LED-Chips eine dünne, reflektierende Metallschicht ein, die mehr Licht an die Oberseite der Diode bringt. Das Fraunhofer-Institut in Jena entwickelt dazu eine Spezialoptik, die für eine weitere Effizienzsteigerung sorgt.

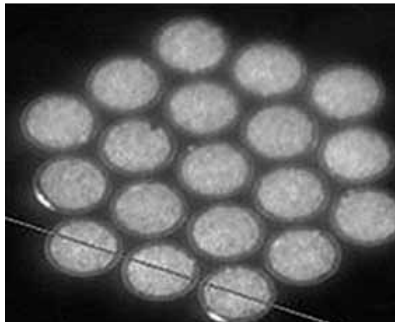
Im März 2008 meldet die Presse einen Durchbruch am Tyndall National Institute (Irland), wo im Rahmen des FLAME-Projekts nach neuen, energieeffizienteren Leuchtmitteln geforscht wird. Die nun vorgestellten Mikro-LEDs sind mit einem Durchmesser von 15 Mikron nur ein



*Solare LED-  
Landebahnbeleuchtung*



Zwanzigstel so groß wie herkömmliche LEDs, funktionieren dafür aber schon mit wenigen Milliardstel Ampere. Und sie sollen sehr lange leuchten – wie lange, darauf kann sich die Forschergruppe nicht genau einigen. Einer im Team rechnet vor, das ein einmal aufgeladenes, münzengroßes System etwa 80 Jahre lang leuchten könnte!



*Micro LEDs unter dem Mikroskop*

Im April 2008 meldet die Presse aus Brasilien, daß der Austausch der Glühlampen aller Ampeln in Guarulhos, einem Vorort von Sao Paulo mit rund 1,3 Mio. Einwohnern, durch LED-Birnen der brasilianischen Firma Meng Engenharia Ltda (mit LEDs von Luxeon) die erwartete jährliche Einsparung von 1.340 MWh im Werte von 240.000 \$ tatsächlich erbracht hat. Durch die Reduzierung der Wartungskosten aufgrund der Langlebigkeit der neuen LED-Birnen amortisieren sich die Projektkosten von 750.000 \$ aber schon im ersten Jahr.

Um die gleiche Zeit herum gibt die Stadt Düsseldorf bekannt, daß man 10.000 der derzeit 17.000 Stück zählenden Straßenlampen durch LED-Modelle auszutauschen gedenkt. In einem Ende 2007 gestarteten und deutschlandweit ersten Pilotversuch, eine Kooperation zwischen der Südwestfälischen Fachhochschule Hagen und den Stadtwerken Düsseldorf, sind 25 Stück LED-Straßenleuchten im Einsatz..

Die Sharp Corp. präsentiert im Juli 2008 zwei neue solarbetriebene LED-Straßenlampen (1.800 lm). Eine Besonderheit bildet der eingebaute Erdbebensensor. Sobald dieser eine Erschütterung der Stärke 5 oder größer registriert, schaltet er die Lampen während der Dunkelheit auf ununterbrochene volle Beleuchtungsstärke, um den

Hilfetrupps die Arbeit zu erleichtern. Außerdem führt das Unternehmen im September auf dem japanischen Markt 11 neue LED-Leuchten und -Spots ein, die eine Lebensdauer von 40.000 Stunden aufweisen.



*LN-LW3A1 Solar-Powered LED Street Light Sharp*

2012 baut SHARP LED-Module mit einer Lichtleistung von bis zu 900 Lumen bei einer Lichteffizienz von bis zu 106 lm/W bei Standardbetrieb, spezifiziert ist die neue Generation für eine Durchlassspannung von 17.7V bei einem Durchlassstrom von 480 mA. Man kann die Arrays aber auch mit einem Strom von bis zu 800 mA betreiben, um Lichtströme von bis zu 1300 lm zu erreichen.

LED-Veteran Cree aus Durham beeindruckt zur Olympiade in Peking 2008 mit ausdrucksstarken Installationen wie der aus 440.000 XLamp-LEDs bestehenden Außenbeleuchtung des auch ‚Water Cube‘ genannten National Aquatics Centre, sowie der ‚Bird's Nest‘ genannten Zentralarena. Insgesamt kommen 750.000 LED-Lichter zum Einsatz.



*Watercube*



LED's für den privaten Haushalt gibt es mittlerweile in den unterschiedlichsten Varianten, und bei Preisen ab 6€ auch schon bei ALDI und Co. Einzig die Lichtausbeute ist noch nicht so hoch.

Mit der 8 W ‚Geobulb‘, die eine konventionelle 60 W Birne ersetzt, wird im Sommer 2008 eine sehr ästhetische

**A l t e r n a t i v e** angeboten, die mit ihren 800 lm 120 \$ kosten soll. 2011 wird die GeoBulb-3 cool white LED Glühbirne verkauft, ihre 7 Watt Leistung erzeugt etwa so viel Licht wie eine 50-Watt-Glühbirne. Der Preis liegt aber noch knapp unter 100€.



*Geobulb LED-Birne*

Im Juli 2008 präsentieren Wissenschaftler der Purdue Universität im US-Bundesstaat Indiana eine Methode, mit der die noch relativ teuren weißen LEDs künftig deutlich günstiger hergestellt werden können. Der Grund für den derzeit hohen Preis liegt in der Saphierschicht, auf der die LEDs hergestellt werden und die auch als Reflektor der LEDs dient. Diese Saphiertechnologie kostet etwa das 20-fache der Methoden zur Herstellung konventioneller Lichtquellen.

Die Forscher des Purdue University Birck Nanotechnology Center verändern den Herstellungsprozess der Dioden und erreichen damit eine deutliche Produktionskostenreduktion. Die neuen Saphier-freien Dioden werden auf einem Metallüberzogenen Silizium-Wafer hergestellt, und für den Reflektor wird Zirconium-Nitrid verwendet, das vom Silizium durch eine Isolator-Schicht aus Aluminium-Nitrid getrennt ist. Dadurch sollen innerhalb von zwei Jahren auch weiße LED-Lampen auf den Markt gebracht werden können, zu einem erhofften Preis um 5 \$.

Viel ästhetischer und schöner als die üblichen Lampen in Parks und Grünanlagen ist das Konzept der Designerin Jongoh Lee aus Südkorea. Ihr ‚Invisible Streetlight‘ besteht aus künstlichen, Blatt-tragenden Ästen – nur daß



die Blätter auf der einen Seite mit Solarzellen und auf der anderen mit LEDs bestückt sind. Um die Äste natürlicher Bäume gewunden schalten sie sich bei Dunkelheit automatisch an. Verdientermaßen gewinnt Lee den renommierten IDEA-Preis 2008 (International Design Excellence Awards).

Auch bei den LED-Straßenlampen geht die Entwicklung weiter. Ziel ist es, die energiesparenden Lampen zu einem deutlich kostengünstigeren Stückpreis anbieten zu können. Zu den aktuell führenden Anbietern gehört das brandenburgische Unternehmen Autev AG, das mit der sachsen-anhaltischen Forschungseinrichtung HarzOptics in Wernigeröde zusammenarbeitet.

Gemeinsames Produkt ist die mit 72 LEDs ausgestattete Straßenleuchte ‚AuLED‘ (100 - 110 lm/W), die damit beworben wird, daß sie im Vergleich zu einer Natriumdampf-Niederdrucklampe 42 % weniger Energie verbraucht - sogar ohne Dimmung. Mit Dimmung lassen sich sogar mehr als 57 % einsparen. Die Lebensdauer soll 50.000 Stunden betragen.

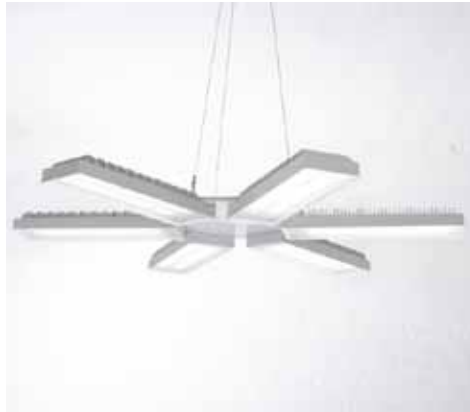
Die LEDs des ‚AuLED‘-Modells sind auf drei Flächen aufgebracht, von denen die mittlere fixiert ist, während die beiden äußeren Flächen beweglich sind. Dadurch lassen sich die Abstrahlcharakteristiken für jede Lampe individuell einstellen – die Abstrahlung in die Horizontale und nach oben kann auf Wunsch sogar vollständig unterbunden werden. Darüber hinaus sind auf den LEDs spezielle Optiken aufgebracht, die das Licht zusätzlich fokussieren können.

Auch für Industriehallen baut die Firma ihre Leuchten.

Die Verwendung als Pixel für Bilddarstellung ist eine andere



*AuLED Strassenlampe*



*AuLED Industrieleuchte*

Anwendung, wir sehen sie bei viele Fussballübertragungen als Werbebande.

2009 wurde in Dubai mit der Herstellung des weltgrößten LED-Screen begonnen.

Das Monstrum ist leicht gebogen, rund 100 m hoch und bildet die Fassade des ‚Podium‘-Hochhauses mit seinen 35 Stockwerken, einem Projekt der Tameer Holding, das 2012 fertiggestellt sein soll. Der Riesens Bildschirm wird aus einer Entfernung von 1,5 km am besten zu sehen sein. Eine ungewöhnliche Anwendung wird durch die Veröffentlichung im US-Magazin Crystal



*Podium LED Fassade*

Growth & Design im Oktober 2008 bekannt. Die Forscher des Instituts für Mikro- und Nanomaterialien der Universität Ulm, die sich im Grenzbereich von Kristallurgie und Lichttherapie bewegen, finden in einem mehrmonatigen

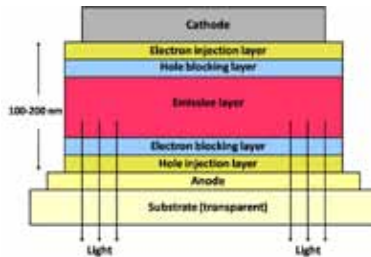
Selbstversuch heraus, das intensive Licht aus LEDs - auf die menschliche Haut gestrahlt - eine ähnlich verjüngende Wirkung wie das Nervengift Botox hat: Es glättet Falten und lässt die Haut insgesamt jünger erscheinen.

Vermutlich zerstört das Licht aus dem roten Bereich des Spektrums den feinen, aber stabilen Wasserfilm, der die elastischen Fasern der Haut umgibt und sie unbeweglich macht. Schon seit über 40 Jahren wird starkes elektrisches Licht eingesetzt, um das Heilen von Wunden zu beschleunigen.

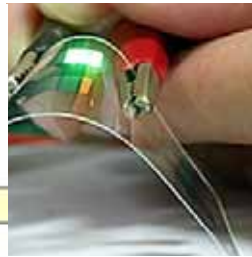
## OLED

Was mit LEDs angefangen hat, findet seine Weiterentwicklung in den OLEDs (organic light emitting diode, auch Light Emitting Polymer (LEP) oder Organic Electro Luminescence (OEL) genannt), die aber hauptsächlich für Bilddarstellung verwendet werden und weniger für Beleuchtungszwecke.

Eine organische Leuchtdiode (OLED) besteht in der Regel aus einem sog. „stack“ (=Stapel) dünner organischer Schichten, welcher von einer metallischen Kathode und einer TCO-Anode eingeschlossen wird. Bedingt durch die sehr geringe Ladungsträgerbeweglichkeit der eingesetzten organischen Materialien müssen die einzelnen Schichten extrem dünn sein, so dass die Gesamtdicke des OLED-Stapels nur etwa 100 bis 200 nm beträgt. Da OLED im Gegensatz zu anorganischen LED aus amorphen Schichten bestehen, können mittels dieser Technologie sehr dünne und großflächige Lichtquellen (Lichtkacheln) realisiert werden.



*Aufbau einer monochromen rückseitenemittierenden OLED*



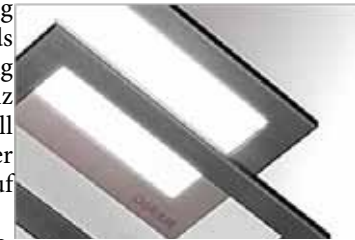
*farbige OLED*

Erstmals erzeugt wird die Elektrolumineszenz Anfang der 1950er Jahre von A. Bernanose und seinen Mitarbeitern an der Universität von Nancy, Frankreich. 1983 stellen Dr. Ching Tang und Steven Van Slyke bei Eastman Kodak erste funktionierende OLEDs her.

Hauptvorteil der dünn-filmartigen, leuchtenden organischen Leuchtdioden aus organischen, halb-leitenden Materialien ist ihre freie Formbarkeit, so daß auch komplett leuchtende Wände oder Decken möglich werden. Im Gegensatz zu LEDs sind bei der Herstellung keine einkristallinen Materialien erforderlich, was auch ein Kostenvorteil ist.

Aufgrund der Material-eigenschaften eignen sich OLEDs besonders gut für biegsame Bildschirme oder als elektronisches Papier. Transparente, hauchdünne Beschichtungen auf Fenstern oder Wänden würden auch die Möglichkeit bieten, an jeder Stelle und in beliebiger Größe einen ‚Bildschirm‘ erscheinen zu lassen oder eine in Farbe und Stärke definierte Lichtquelle zu plazieren.

Die Firma Osram Opto Semiconductors präsentiert zur gleichen Zeit eine weiße OLED-Lichtkachel, die sowohl im aus- wie im eingeschalteten Zustand transparent ist. Der großflächige Prototyp von fast 90 cm<sup>2</sup> erreicht im Labor eine Helligkeit von 1.000 Candela pro m<sup>2</sup> und 20 lm/W. Damit wird es möglich, z.B. Trennwände zu bauen, die tagsüber durchsichtig sind, während sie abends Licht spenden. Die bislang erreichte Transparenz beträgt 55 % und soll im Rahmen weiterer Entwicklungs-arbeiten auf 75 % erhöht werden.



Die General Electric Co. gibt im März 2008 die

### *OLED-Panels von Osram*

Entwicklung einer neuen, günstigen Herstellungsmethode für OLEDs bekannt, die auf der Rolle-zu-Rolle-Fertigung beruht, bei der flexible anstatt fester Substrate zum Einsatz kommen und damit deutlich geringere Beschichtungskosten erreicht werden können. Die dem Papier-druck ähnliche Produktions-methode der als Lichtquellen einzu-setzenden Flächen ist das Ergebnis einer vierjährigen Forschungsarbeit. Die Maschine produziert 20 cm breite Lichtflächen, die später noch breiter werden sollen.



Im Juli 2008 folgt eine Meldung von Wissenschaftlern

### *OLED-Panels von GE*



der Universitäten von Michigan und Princeton, die mit 70 lm/W einen neuen Rekord schaffen, indem sie ein Gitter mit kuppelförmigen mikroskopischen Linsen mit Durchmessern von 5 Mikrometern nutzen.

Auf der Messe Plastic Electronic 2008 zeigt das Fraunhofer IPMS das erste berührungsempfindliche OLED-Display. Das An- und Abschalten sowie das Dimmen bedarf dabei keiner weiteren mechanischen Komponenten. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Touchscreens, die dafür von einer gesonderten Folie überzogen werden müssen, sind die neuen OLEDs in der Lage, das Berührungssignal selbst zu registrieren und die Information an die Steuerungselektronik weiterzuleiten.



*Litroenergy*



*Panasonic ebook 02*

Mittlerweile wird dieses OLED-Display in ebooks und Tablet-PC's eingesetzt.

Eine weitere Umsetzung, über die ab 2008 gesprochen wird, soll in Verbindung mit Dünnschicht-Solarzellen

erfolgen. Das Resultat sind Litroenergy Power Cells, die als autonome und viele Jahre funktionierende Stromlieferanten vermarktet werden sollen, möglicherweise schon ab Anfang 2009.

Unter dem Namen **Light Emitting Capacitor (LEC)** arbeitet CeeLite Inc. in Blue Bell, Pennsylvania, bereits seit 2004 an einer neuartigen, flexiblen und papierdünnen Lichtquelle, und wird auf Anhieb zu den ‚Best Innovations‘ des TIME Magazine 2006 gewählt. Die überall installierbaren Panels,

die aus einer Sandwich-Struktur von Licht-emittierendem Phosphor zwischen zwei Elektrodenschichten bestehen, sollen in Maßen von bis zu 90 x 180 cm und einer Dicke von 1 mm hergestellt werden. Der Stromverbrauch für das warme, weiße Licht ist geringer als der von Leuchtstofflampen oder -röhren.

Noch ein weiterer Start-up macht 2006 von sich reden: Das stark mit dem Militär verbundene Crosslink in St. Louis, Missouri, wurde als Muttergesellschaft zwar schon 1997 gegründet, doch erst jetzt wendet man sich mit einem neuen Label

dem zukunftsreichen Markt der Lichtquellen zu. Das elektroaktive Polymer-Material, das auf den mehr als 100 Patenten der Firma beruht (PEDOT), bildet die Grundlage der leichten und robusten SuperFlex-Beleuchtungstechnologie, die auf der langanhaltenden Elektrolumineszenz beruht.

Die SuperFlex-Panels können Licht im sichtbaren Spektrum ebenso abgeben wie nahe dem Infrarot-Bereich, sie lassen sich verdrehen, lochen, zerreißen oder knüllen, ohne daß ihre Beleuchtungsfunktion davon beeinträchtigt wird.



*LEC-Panel von CeeLite*



*Crosslink-OLED  
(Belastungsversuch)*



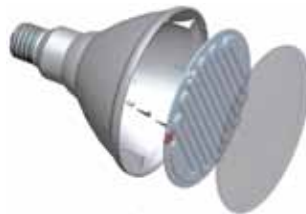
Die ersten Produkte, die 2007 vorgestellt werden, sind semi-permanente Lichtquellen für Militärlager, in Zukunft sollen aber auch SuperFlex-Textilien bzw. damit beschichtete andere Materialien auf den Markt kommen. Crosslinks Nähe zum Pentagon ist auch das Projekt geschuldet, eine im Infrarot-Bereich selbstleuchtende Karte zu entwickeln, die dadurch – mittels Nachtsichtgeräten – auch bei völliger Dunkelheit gelesen werden kann.

Ab Mitte 2009 soll durch das in Cupertino, Kalifornien, beheimatete US-Startup Lumiette, eine flache fluoreszierende Leuchte auf den Markt gebracht werden, die sich durch ihre Langlebigkeit, niedrige Betriebstemperatur und hohe Effizienz auszeichnet. Die Flat Panel Light (FPL) genannte Leuchte ist nur 4 mm dick, erzeugt 52 – 70 lm/W und besitzt eine wirkungssteigernde Reflektionsschicht, die bis zu 97 % des erzeugten Lichts nach vorne ausrichtet. Als Lebensdauer werden 60.000 Stunden angegeben, gleichzeitig sollen die Herstellungskosten nur ein Zehntel der von LEDs betragen.



*Lumiette Panel und als Raumwandlicht*

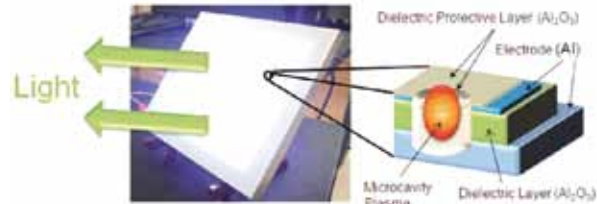
Ein wesentlicher Vorteil ist auch die Anordnung der Elektroden, die sich bei den Lumiette-Leuchten außerhalb befinden (bei herkömmlichen Leuchtstofflampen befinden sich die Elektroden im Inneren und sind daher



*Lumiette als herkömmliche Strahlerbauart*

auch einem Verschleiß ausgesetzt). Externe Elektroden lassen sich außerdem auch leichter dimmen. Allerdings beinhalten die Lampen Argon, Neon sowie kleine Mengen an Quecksilber.

Die Firma Eden Park Illumination in Somerset, New Jersey, eine Ausgründung der University of Illinois, präsentiert Ende 2008 mit ihrem sogenannten microplasma light eine weitere neue flexible Lichtquelle. Dabei handelt es sich um ein Sandwich aus zwei Glasplatten, zwischen denen sich ein Aluminiumgeflecht befindet, in dessen kleinen Ausbuchtungen sich Phosphor befindet, das aufleuchtet sobald es von Strom durchflossen wird. Die Panels lassen sich auch aus Plastik oder anderen verformbaren Materialien herstellen und leisten 40 lm/W oder mehr. Sie können außerdem weißes oder farbiges Licht erzeugen.



*Grafischer Aufbau microplasma light*



*Zwei Anwendungen: als Display und als Flugzeugmarkierung bei den amerikanischen Streitkräften.*

## Energiespeicherung

Da bei vielen Methoden der Exergieseparation ein zusätzlicher Speicher für diese Exergie und/oder für Sekundärformen notwendig ist, werde ich hier einen Überblick über die entsprechenden bislang bekannten Möglichkeiten geben.

Das größte Interesse besteht heute an der Speicherung von Elektrizität. Wenn wir uns also eine alternative Energiewirtschaft mit Solarzellen, Windfarmen usw. anstreben, dann ist es offensichtlich, das ausreichende Speichersysteme für Nachtstunden, Flauten, Regentage und die Wintermonate notwendig werden.

Die Energiespeicher früherer Zeiten waren im Grunde das Holz, Öle und Fette. Erst mit dem Siegeszug der Erdölprodukte (Erdöl ist gespeicherte Energie) kamen neue, zumeist flüssige Medien auf den Markt, die noch heute den Bereich der Energiespeicherung dominieren.

Von besonderen Interesse ist der Transportbereich, insbesondere der Individual- und der öffentliche Nahverkehr. Es wird eine Speichermethode gebraucht, die es erlaubt ein Fahrzeug plus Nutzlast zuverlässig über hunderte Kilometer fortzubewegen, ohne es zwischendurch andauernd wieder ‚aufladen‘ zu müssen.

Bei einer Recherche lassen sich viele Akkumulator-Technologien finden, von denen einige in den vergangenen Jahren auch intensiv weiterentwickelt worden sind, allen voran die Lithium-Ionen-Batterien. Über diese und weitere neue Ansätze von Batterie-Technologien werde ich berichten. Zunehmend wichtig wird auch die Luft. Zum einen als potentielles Speichermedium für große Energiemengen in Zeiten geringen Bedarfs mittels Druckluftspeichern und zum anderen als Antrieb für Druckluftfahrzeuge, die zumindest im städtischen Rahmen eine Alternative zum Elektroauto darstellen.

Die Umwandlung von Strom in Wasserstoff ist eine weitere ernst zu nehmende Speicherart, zu mal sie sehr effektiv ist.

## Geschichte der elektrischen Energiespeicherung

Es ist noch immer so gut wie unbekannt, daß die elektrische Batterie schon mehrere tausend Jahre alt ist. Deshalb möchte ich hier etwas detaillierter darüber berichten.



*Bagdad-Batterie*

Wilhelm König, ein österreichischer Archäologe, der mehrere Jahre lang für das Irakische Museum als Direktor der Antikenverwaltung in Bagdad tätig war, entdeckte **1936** am Hügel Khujat Rabu'a, südöstlich von Bagdad, einen seltsamen Gegenstand, aus der Zeit von **227 bis 126 v. Chr.**, den er zunächst für ein Kultobjekt der Parther hält. Er schreibt einen Forschungsbericht unter der Überschrift „Ein galvanisches Element aus der Partherzeit?“

Später erfährt er das ähnliche Artefakte bei Grabungsarbeiten in der Nähe von Ktesiphon bei Bagdad sowie in Seleukia gefunden wurden. Das Element von 18cm Höhe, sieht aus wie ein ‚vasenartiges Gefäß‘ aus hellgelbem Ton, in dem mittels Bitumen oder Asphalt ein Kupferzylinder, von 12,5 cm Höhe und einem Durchmesser von 3,75 cm, befestigt ist. Seine Öffnung ist mit einer mit Bitumen fixierten Kupferscheibe verschlossen. Im Inneren des Kupferzylinders steckt ein Eisenstäbchen, dessen oberes Ende etwa einen Zentimeter über den Gefäßrand ragt. Es ist von einer gelbgrauen Korrosionsschicht überzogen, was

auf die Wirkung eines blei-artigen Elektrolyten zurückgeführt werden kann. Das Eisenstäbchen wird durch einen Asphaltstöpsel am Herausfallen gehindert.

Ihn fasziniert die unorthodoxe Idee, es könne sich bei all diesen Funden um die Überreste von Trockenbatterien handeln. Sofort macht er sich ans Experimentieren. Nach Einfüllen eines neuen Elektrolyten – er benutzt Kupfersulfat – funktionierten einige der ihm zur Verfügung gestellten Batterien einwandfrei. Sie geben Spannungen von 1,5 – 2 Volt ab. Der Beweis ist erbracht. In seinem Grabungsbericht kann König daher erklären, daß die vermeintlichen ‚Kultgegenstände‘ in Wirklichkeit galvanische Elemente sind. Die Batterie ist im Irakischen Museum von Bagdad ausgestellt, und gilt als älteste Trockenbatterie, die bisher gefunden worden ist.



*Bagdad-Batterie  
englischsprachige Funktionsskizze*

**1960** experimentiert

John B. Pierczynski an der Universität von North Carolina mit einem Duplikat dieser Batterie und erhält 18 Tage lang eine elektrische Spannung von 1,5 V. Im Herbst **1978** wird von Dr. Arne Eggebrecht, Direktor des Roemer-Pelizaeus-Museum Hildesheim, und dem Restaurator Rolf Schulte ein weiterer Nachbau präsentiert, bei dem man als Batterie-Flüssigkeit frisch gepressten Traubensaft verwendet – den es unzweifelhaft schon damals gab. Die Meßinstrumente zeigen sofort 0,5 V an. Es gelingt sogar, mit dem Strom die silberne Replik einer Königsstatue aus dem Parther-Reich zu vergolden – in nur zweieinhalb Stunden!

Aber zurück zur aktuelleren Geschichte – oder korrekt: zu der Version der Geschichte, wie sie derzeit noch immer publiziert wird:

Unabhängig voneinander wird 1745/1746 von dem niederländischen Physiker Pieter van Musschenbroek (1692 – 1761) an der Universität Leiden, und von dem Domdechanten Ewald Jürgen Georg von Kleist (1700 – 1748) aus Cammin, Pommern, der Kondensator entwickelt. Diese ‚Leidener Flasche‘ genannte Konstruktion ist außen mit Zinn beschichtet und innen mit Gold ausgekleidet, spätere Modelle waren innen und außen mit Stanniol belegte Glasbecher.



*Leidener Flaschen*

Der italienische Physiologe und Physiker Luigi Galvani (1737 – 1798) experimentiert 1786 mit der Stromerzeugung durch ein System von Eisen/Kupfer-Elektroden und organischen Elektrolyten.

1796 interpretiert der italienische Edelmann und Physiker Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Conte di Volta die Versuche von Galvani richtig und bastelt mit den Münzen verschiedener Länder die erste ‚Voltaische Säule‘. Abwechselnd Kupfer, Messing, Silber, Zink oder Zinn, getrennt durch kleine Tücher, die mit verdünnter Kochsalzlösung oder Schwefelsäure benetzt werden – und fertig ist die erste Batterie der Weltgeschichte. Sie erbringt um 1800 immerhin 25 Volt – wie die Einheit in Erinnerung an ihren Erfinder genannt wird.

1802 entwickelt Johann Wilhelm Ritter, der mit Goethe auf dem Gebiet der Naturwissenschaften zusammenarbeitet, eine eigene Batterie, die sogenannte Rittersche Säule. Die Säule besteht aus übereinandergeschichteten und mit Tafelsalz (Natriumchlorid) getränkten Kupfer- und Kartonscheiben. Diese Vorrichtung kann mit einem elektrischen Strom geladen werden und gibt bei der Entladung Strom ab. Sie gilt als Urform des Akkumulators.



*Rittersche Säule*

Der französische Physiker Gaston Planté erfindet 1859 die wiederaufladbare Bleibatterie, und Henri Tudor aus Luxemburg gibt ihr 1881 die noch heute übliche Kastenform. Als Elektrolyt dient verdünnte Schwefelsäure. Die negative Elektrode besteht aus Blei, die positive aus Bleidioxid. Die Einführung dieser Alkali-Batterie erfolgt bereits im Jahre 1860, also nur ein Jahr nach ihrer Erfindung. 1865 erfindet der französische Chemiker Georges Leclanché das dann auch nach ihm benannte Kohle/Braunstein/Zink – Element. 1875 wird die  $MnO_2$  – Trockenzelle entwickelt. Ab 1876 wird die Pariser Oper mit dem Strom aus ‚Galvanischen Elementen‘ beleuchtet. Industriell wird der Bleiakku interessant, als Emile Alphonse Faure um 1880 ein Verfahren entwickelt, bei dem der Bleiakku bereits nach wenigen Ladezyklen (dem Formieren), eine hohe Kapazität erreicht. Etwas später entwickeln Lalande und Chaperon das alkalische Element  $Zn/NaOH/CuO$ , und 1892 Weston das sogenannte Normalelement mit Quecksilber/Cadmium. Im Jahr 1896 gibt es einen kreativen Schub, als Schmidt die erste Trockenzelle, und de Michalowski das  $Zn/NaOH/NiOOH$  – System entwickeln.

Um 1899 erfinden dann Thomas Alva Edison und unabhängig von ihm der Schwede Waldemar Jungner die Nickel-Cadmium-Zelle. 1901 erfindet er mit der  $Ni/Fe$  – Zelle eine äußerst robuste Batterie mit einer hohen elektrischen Kapazität pro Gewichtseinheit.

Die Geschichte des Akkumulators ist eng mit der Geschichte der Mobilität verknüpft, und wie üblich auch der Krieg eine Rolle dabei, denn insbesondere U-Boote, die unter Wasser mobil bleiben wollten, brauchten Akkumulatoren. Im Frühjahr 1904 liefert die Accumulatoren Fabrik AG (AFA) in Berlin-Hagen eine aus Triebwagenzellen entwickelte Batterieanlage für das U-Boot ‚Hajen‘ der schwedischen Marine.



*AFA-Batterie*

Das U-Boot U 2 ist 1908 das erste deutsche U-Boot, das mit einer Batterieanlage der AFA ausgerüstet wird. Ab 1910 kommen die verbesserten Masseplatten-Batteriezellen (MAS) zum Einsatz, und der U-Boot-Krieg 1914 - 1918 wäre ohne die Zulieferung der AFA-Batterien nicht denkbar gewesen. Auch bis zum Ende des Zweiten Weltkriegs im Mai 1945 bleibt die AFA der einzige Lieferant für U-Boot-Batterien im Deutschen Reich.

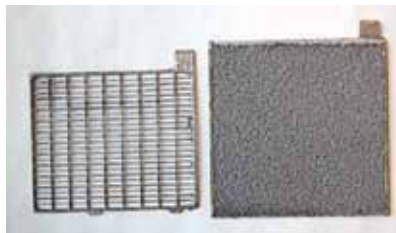
Im Grunde bestand damit also schon Ende des 18. und Anfang des 19. Jahrhundert die (leider vergebene) Chance, den Personen-Nahverkehr vollständig mit Elektrofahrzeugen abzuwickeln. Der Siegeszug der fossilen Fahrzeuge machte den Traum aber schnell zunichte, und die Weiterentwicklung der Akkumulatoren verläuft danach wesentlich langsamer.

Jeder kennt die traditionellen Braunstein/Zink-Zellen, wie sie z.B. seit Jahrzehnten in Taschenlampen eingesetzt werden. Die oben bereit angeführten Alkali-Batterien sind im Grunde alle gleich aufgebaut: Ein in wässriger, Kalilauge enthaltender Elektrolyt verbindet die Kathode aus Braunstein (Manganoxid) mit der Anode aus metallischem Zink.

Noch immer sind Bleiakкумуляtoren die verbreitetste Methode, elektrische Energie zu speichern – insbesondere bei den rund 800 Millionen an Kraftfahrzeugen überall auf dem Planeten (Stand 2005). Im täglichen Gebrauch sind diese Batterien in vielen Geräten vorhanden und wohl auch kaum mehr wegzudenken, obwohl ihre Energiedichte nur 35 Wh/kg beträgt.

1998 wird eine Anlage mit 800 konventionellen Bleibatterien im Rahmen eines Neubaukomplexes im Herner Park-Gelände (Energiepark Mont-Cenis) aufgebaut, um den dort photovoltaisch gewonnenen Strom zu speichern. Diese Anlage kann bei Bedarf 1,2 MWh eine Stunde lang abgeben – oder Lastspitzen bis 1,2 MW abdecken. Konzipiert und gebaut wird die Anlage von der Gesellschaft für innovative Energieumwandlung und -speicherung mbH (EUS).

Die Firma Power Technology Inc. aus Houston, Texas, beschäftigt sich bereits im Oktober 2006 intensiv mit der Graphit-Schaum-Technologie. Hier wird bereits eine Produktionsanlage für die patentierten Stromkollektoren hochgezogen, bei denen der vernetzte, glasartige Kohlenstoff mit einer dünnen Schicht aus einer Zinn-Blei-Legierung überzogen ist. Damit wird die aktive Fläche für die elektrochemischen Reaktionen um das vierfache vergrößert. Während die neuen Batterien dadurch um 30 % bis 50 % kleiner und leichter hergestellt werden können, steigt gleichzeitig ihr Wirkungsgrad auf 70 % bis 68 % (im Gegensatz zu den 30 % bis 40 % bei normalen Bleibatterien).



*Graphitschaum-Kollektor*

Ende 2007 präsentieren Forscher am nationalen australischen Forschungsinstitut CSIRO eine deutlich optimierte Bleibatterie, die fast genauso gut ist wie die aktuellen, aber noch wesentlich teureren Nickel-Metallhydrid-Systeme. Die so genannte UltraBattery verbindet die alte Bleiakku-Technik mit einer Superkondensator-Elektrode. Dadurch hält die neue Batterie 3 – 4 Mal länger als die alten Bleiakkus und verursacht nur ein Drittel der Kosten existierender Hybrid-Batteriepakete. Auf einer Teststrecke in Großbritannien absolviert ein Honda Insight Hybrid, der mit einem UltraBattery-Satz ausgerüstet ist, bereits mehr als 160.000 km – ohne dabei extern nachgeladen werden zu müssen. Preislich soll das neue Produkt etwa um 70 % günstiger liegen als bisherige, vergleichbare Batterien, vermarktet wird die UltraBattery unter dem Namen ‚Smart Storage technology‘.

### **Neue Ansätze der Batterie-Technologien**

Im Januar 2008 gibt die japanische Firma Panasonic bekannt, daß man eine neue Alkali-Mangan-Batterie hergestellt habe, die aufgrund ihrer ‚weltweit längsten Lebensdauer‘ von bis zu 10 Jahren auch schon Eingang in das Guinness Buch der Rekorde gefunden hat. Die Evolta-Batterien sollen bereits ab April des Jahres ausgeliefert werden. Erreicht wurde dieser Rekord durch eine neue Zylinderstruktur und eine neue Kathodenmischung aus Mangan-Dioxid und Oxi-Hydroxide Titanium.

Bereits im August 2007 hatte das Unternehmen ein Demonstrationsfahrzeug vorgeführt, das mit 192 Stück der neuen Oxyride-Batterien der Größe AA (wie sie auch in Kameras, Radios u.ä. eingesetzt wird) ausgestattet ist. Das ‚oxyride 1‘ Testfahrzeug (s.u.) erreicht dabei eine Maximalgeschwindigkeit von 122 km/h.





## Lithium-Ionen-Batterie (LiIon)

Unter allen aktuellen Technologien wird dieser Batterieart gegenwärtig das größte Interesse entgegengebracht. Bereits Mitte der **1980er** Jahre arbeiten die **BASF** und die **Varta AG** gemeinsam an einer flexiblen **Lithium-Batterie** auf Basis eines neuentwickelten, elektrisch leitenden Kunststoffes namens **Polypyrrol**.

### Die Entwicklungen seit der letzten Jahre sind:

Die US-Amerikanische Firma **Panasonic Industrial Corp.** entwickelt papierdünne **Lithiumbatterien** mit einer Dicke von nur 0,8 mm, welche aufgrund einer verhinderten Gasbildung auch nach 10 Jahren noch bis zu 95 % der ehemals eingespeicherten Energie enthalten sollen.

**Toshiba** stellt im März **2005** superschnell nachladbare **Lithium-Ionen Batterien** vor, die in nur einer Minute bereits zu 80 % geladen sind. Hier ist die negative Elektrode mit neuentwickelten **Nano-Partikeln** belegt, die große Mengen an Lithium-Ionen aufnehmen und speichern können, ohne daß es an der Elektrode zu einer Wirkungsreduktion kommt. Der Prototyp dieser laminierten Lithium-Ionen Batterie ist 3,8 mm dick, 62 mm lang und 35 mm breit, und hat eine Kapazität von 600 mAh. Nach 1.000 Zyklen trat ein Verlust von nur 1 % auf, und selbst bei Temperaturen von minus 40°C bietet der Akku noch 80 % seiner Leistung.



*VentureOne (Grafik)*

Im Februar 2007 gibt die bereits 2001 gegründete Firma A123 Systems aus Watertown, Massachussetts, bekannt, dass man unter Einsatz von am MIT entwickeltem

Nanomaterial eine neuartige Lithium-Ionen-Batterie erfunden habe, die sich durch extrem hohe Entladeströme und sehr kurze Wiederaufladezeiten von weniger als 5 Minuten charakterisiert, im Gegensatz zu den sonst üblichen rund 90 Minuten. Die M1 Zellen sollen nun in einem plug-in Hybrid SUV von General Motors sowie in dem dreirädrigen Elektromobil VentureOne der Firma Venture Vehicles aus Los Angeles eingesetzt werden.

Im August **2007** informiert **GM** über seine Kooperationspläne mit A123 Systems, das die Akkus für das Elektromobil Chevrolet Volt liefern soll, dessen Produktion **2010** oder **2011** beginnen wird.

Die Produkte des Unternehmens werden inzwischen bei den Elektrowerkzeugen von Black & Decker eingesetzt



*Killacycle*

Mit einem LiIo-Pack von A123 ist auch das zur Zeit schnellste Elektro-Motorrad der Welt ausgestattet. Das **Killacycle** beschleunigt in weniger als einer Sekunde auf 96,5 km/h und erreicht nach sieben Sekunden eine Geschwindigkeit von 270 km/h, was schnell genug ist, um in Wettbewerb mit den Benzin-betriebenen US-Dragester-Motorrädern zu treten.

In Deutschland kommt im November 2007 der Essener **Evonik**-Konzern in die Presse, der gemeinsam mit Forscher der Universität Duisburg-Essen daran arbeitete, besonders leistungsfähige **Lithium-Ionen-Batterien** autotauglich zu machen. Dabei wird eine weiche **Nano-Membran** eingesetzt. An der Entwicklung wird bereits seit Jahren gearbeitet, rund 50 Mio. € sind investiert worden und 25 Patente schützen die Technologie, die im Oktober 2007 für den Deutschen Zukunftspreis nominiert wird.

Als Alternative zu den bisher verwendeten Kunststoff-Trennfolien, die bei 140°C zu schmelzen beginnen und daher aus Sicherheitsgründen für Autobatterien mit ihrem hohen Energievorrat nicht akzeptabel sind, werden die Evonik-Folien mit winzigen Keramikpartikeln verklebt, die etwa halb so dick wie ein Haar sind. Dadurch bleiben die unter dem Namen Separion bekannten, flexiblen keramischen Separatormembranen zwar weich, halten dank der Beschichtung aber Temperaturen bis 500°C aus. Evonik rechnet damit, daß der Batterie-Markt für von derzeit 1,4 Mrd. € bis 2015 auf 4 Mrd. € anwächst. Deutsche Forscher der Uni Siegen entwickeln Anfang 2008 in Kooperation mit Wissenschaftlern der Universität Münster eine neue Klasse **anorganischer Ionenleiter**, die eine dem Mineral Argyrodit analoge Struktur aufweisen. Der leitfähigste Vertreter dieser künstlichen Mineralien besteht aus Lithium-, Phosphor-, Schwefel- und Brom-Atomen, als Ausgangspunkt wird das bereits 1885 bei Freiberg entdeckte Silber-Germanium-Schwefel-Mineral Argyrodit genutzt, in dem die Silberionen recht beweglich sind. In der neu hergestellten Variante wird Silber durch Lithium, Germanium durch Phosphor und ein Teil der Schwefelatome durch Halogenide (Chlor, Brom, Iod) ersetzt.



Toshiba LiIo-Batterie

## Lithium-Polymer-Batterien

Eine weitere neue Variante bilden **Lithium-Polymer-Batterien**, bei denen das Lithium nicht wie bei den üblichen Lithium-Ionen Batterien in Zellen gepackt, sondern in ein Polymergel eingebracht wird.

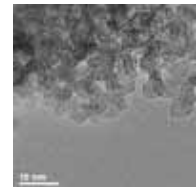
Durch diese Technik wird eine Selbstentzündung, die bei anderen Modellen aufgrund interner Kurzschlüsse häufig aufgetreten ist, verhindert. *(Zwischen 2004 und 2006 sahen sich Firmen wie Sony, Dell, Lenovo, Toshiba, Apple Computer u.a. gezwungen, Millionen von Lithium-Ionen Batterien zurückzurufen, die sie zusammen mit ihren Notebooks ausgeliefert hatten.)*

Das US-Unternehmen **Superlattice Power Inc.** aus Mooresville, North Carolina, gibt im Juni 2008 die Entwicklung eines neuen Kathodenmaterials für Li-Io-Batterien bekannt, das aus Magnesium, Kobalt, Nickel und Titan besteht und zukünftig in **Lithium-Polymer-Batterien** eingesetzt werden soll. Das Material wird bereits in industriellem Maßstab gefertigt. Die Reichweite der entsprechend ausgestatteten Elektrofahrzeuge wird sich dadurch von derzeit 200 km auf über 300 km steigern lassen.

## Lithium/Titanat-Batterie

Schon im August 2007 stellt das US-Unternehmen **Altair Nanotechnologies Inc.** (Altairnano) aus Reno, Nevada, unter dem Namen **NanoSafe** eine neue **Lithium/Titanat-Batterie** vor, die sich durch eine dreifache Kapazität, eine sehr kurze Aufladezeit, eine längere Lebensdauer und auch durch ihre kostengünstigere Herstellung auszeichnet.

Die Nano-Titanat Batterien von Altairnano sollen sich in nur 15 Minuten aufladen lassen, was Elektromobilen anschließend eine Reichweite von über 200 km erlaubt.



Lithium-Titanat Nanopartikel

## Natrium/Schwefel-Batterie

Die Trennwand bei derartigen Akkumulatoren besteht aus Keramikmaterial, der Elektrolyt ist fest, dafür sind die Elektroden flüssig. Die Arbeitstemperatur beträgt allerdings 300°C. Das Gewicht dieser Akkumulatoren ist aber hoch und daher nicht für Automobile geeignet, wie von verschiedenen Firmen festgestellt wird.

Im März **2008** aber berichtet die Presse von dem Plan des US-Unternehmens **Xcel Energy** aus Minnesota, die für die USA erstmalige Verwendung von Batterien zur Speicherung von Windstrom zu testen. Dabei werden **Natrium/Schwefel-Batterien** des japanischen Industriekeramik-Herstellers **NGK Insulators Ltd.** (NGK) aus Nagoya auf ihre technische und wirtschaftliche Machbarkeit überprüft. Hierfür wird im Laufe des Frühjahrs in Luverne, etwa 45 km östlich von Sioux Falls in South Dakota, ein etwa 80 t schwerer Klotz aus 20 Stück 50 kW NAS-Modulen aufgestellt, der eine Energiemenge von 7,2 MWh speichern kann, die aus einem nahegelegenen Windenergiepark mit einer Leistung von 11 MW stammen. Die Ladekapazität der Batterie, die in Zusammenarbeit mit der **Tokyo Electrical Power Company** entwickelt wurde, beträgt 1 MW, d.h. daß sie pro Stunde 1 MWh an Energie aufnehmen bzw. abgeben kann. Voll geladen können damit 500 Haushalte über sechseinhalb bis sieben Stunden mit Strom versorgt werden. Das Speicherprojekt wird mit 1 Mio. \$ aus dem öffentlichen Minnesota Renewable Development Fund gefördert und geht im Oktober **2008** in Betrieb.

Im April **2008** gibt NGK bekannt, daß man auch in einem Dorf an der Nordspitze Japans eine **Natrium/Schwefel-Batteriebank** errichtet, um dort den Strom der Windturbinen in Rokkasho für Spitzenbedarfszeiten zu speichern um ihn dann mit weit größerer Gewinnspanne zu verkaufen. Pro 1 MW Speicherkapazität kostet das System rund 2,9 Mio. \$, es besitzt eine 4,3-fache Speicherkapazität im Vergleich zu konventionellen Blei/Säure-Batterien.

Nickel/Metallhydrid-Akkumulatoren



*Eine Schwefel-Natrium-Batterie soll die Schwankungen in einer Windfarm in Minnesota abfedern. Quelle: Xcel Energy*

Mitte **2007** meldet die Presse, daß es nun auch **Nickel/Metallhydrid-Akkus** (NiMH) mit reduzierter Selbstentladung gibt. Bei den AA-Zellen lässt sich dadurch zwar nicht mehr die maximale Kapazität von 2.700 mAh erreichen, sondern nur noch 2.100 mAh, die Zellen sind jedoch verlässlicher und flexibler einsetzbar. Außerdem garantiert Hersteller **Sanyo** für seine **Eneloop-Zellen** auch nach zwölf Monaten Gebrauch eine Kapazität von etwa 85 %.

Schon sehr weit verbreitet sind wiederum **Nickel-Cadmium-Batterien**, die aufgrund langjähriger Erfahrungen in der Industrie und beim Schienenverkehr in Schweden bis zur Marktreife entwickelt worden sind und inzwischen von vielen Herstellern produziert werden (**Varta, Sonnenschein, SAB Nife, Oerlikon** u.a.). Sie haben Energiedichten zwischen 40 und 55 Wh/kg und werden insbesondere für die Herstellung unterbrechungsfreier Stromversorgungsanlagen (USV) eingesetzt.

### Nickel/Eisen-Batterien

bietet 2007 dagegen die **BeUtilityFree Inc.** in Fort Lupton, Colorado, an – mit den Argumenten, das diese von Thomas Edison in den frühen **1900er** Jahren erfundenen umweltfreundlichen Akkus bereits seit über 100 Jahren genutzt werden, und das Anwender bestätigen, daß die Batteriekapazität auch nach 60 Jahren im Dienst noch immer 100 % beträgt – was in der Geschichte der Batterietechnologie wohl absolut einmalig ist!

Die Akkus besitzen eine Eisen-Anode, eine Nickeloxid-Kathode, nutzen Kaliumhydroxid als Elektrolyt und benötigen neben der regelmäßigen Zugabe von Wasser nur alle 15 Jahre etwas zusätzliches Kaliumchlorid.

Nickel/Hydrid-Batterie

### Zink/Kohle-Batterie

Die Firma **Ever Ready Ltd.** arbeitet an der Weiterentwicklung einer **Zink/Kohle-Batterie**, welche klein, und während Fahrpausen auch regenerationsfähig ist. Ihre Leistung ist um 32,2 % besser als die der normalen Akkumulatoren, womit eine derartige Batterie etwa so stark ist wie eine immerhin doppelt so teure Alkali/Mangan-Batterie.

Von der Firma **Mazda** stammt die quecksilberfreie ‚Green Power‘- Batterie auf Zink/Kohle-Basis, bei der ein organischer, fluorierter Inhibitor verwendet wird. Der Zinkbecher dieser Batterie besteht aus der bei Trockenelementen üblichen Blei-Kadmium-Zink-Legierung mit einem Kadmiumgehalt von 0,06 % und einem Bleigehalt von 0,2 – 0,3 %.



*Nickel/Eisen-Batterien  
(z.T. 80 Jahre alt)*

### Nickel/Zink-Batterien

Ab dem Frühjahr **2008** bietet die im Jahr **2000** gegründete Firma **PowerGenix** aus San Diego, Kalifornien **Nickel/Zink-Batterien** (NiZn) an.

Diese beinhalten keinerlei Blei, Cadmium oder Quecksilber und entsprechen damit der **2006** herausgegebenen EU- Richtlinie zur Verringerung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe. Im Vergleich zu den derzeit genutzten anderen Nickel Metalhydrid (NiMH) Technologien zeichnen sich die NiZn-Akkus durch rund 30 % höhere Leistung aus, sind leichter, kleiner und auch kostengünstiger in der Herstellung. Im Mai **2008** stellt das Unternehmen sein neues, umweltfreundliches Batterie-Pack für Elektrofahrzeuge vor.



*Nickel/Zink Batterie-Pack*

### Zink/Sauerstoff-Batterie

Eine möglicherweise *grundlegende* Neuorientierung bei der Idee, elektrischen Strom in Batterien zu speichern, entstammt dem kalifornischen Forschungsinstitut SRI International and Lawrence Berkeley Laboratories, wo **1995** ein mit 4 Mio. \$ finanziertes Programm bekannt gegeben wird: Dabei soll statt dem Aufladen oder Austauschen von entladenen Akkumulatoren die verbrauchte Flüssigkeit von **Zink/Sauerstoff-Batterien** gegen frische (d.h. frisch aufgeladene) Elektrolyt-Substanz ausgetauscht werden!

Das ‚Strom-Tanken‘ würde dann nicht länger dauern als das bisherige Benzin-Zapfen – und nur etwa 10 % teurer sein. Leider gibt keine neuen Informationen zu dieser Idee.

## Zink/Luft-Batterie (ZOXY)

1993 beginnt die Firma **ChemTEK** auf Initiative des Badenwerks und der Stadtwerke Karlsruhe mit der Entwicklung einer neuartigen **Zink/Luft-Batterie**. Deren Prinzip war schon Thomas Edison bekannt, der bereits damals damit experimentiert hatte. 1997 wird das Ergebnis in Karlsruhe vorgestellt: Die sog. **ZOXY-Batterie** (Abkürzung für Zink-Oxygen) ist bei gleichem Energiegehalt um 80 % leichter als herkömmliche Bleiakkus, sie hat eine Energiedichte von 150 Wh/kg.

Ein Kleinbus-Testfahrzeug erreicht in den USA einen Reichweiterekord von 760 km – und dies bei Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt. Die Entwicklungskosten von 2,1 Mio. DM übernimmt zum größten Teil die Energiestiftung Baden-Württemberg. Die mit Kali-Lauge gefüllten ZOXY-Zellen sind so leicht, weil neben einer Zink-Anode Luftsauerstoff als Kathode benutzt wird. Problematisch wirkt sich bisher der Ladevorgang aus, bei dem sich auf der Zinkelektrode feine Zinknadeln bilden, die über kurz oder lang zu Kurzschlüssen führen. Die Batterie lässt sich bislang nur 10 mal elektrisch aufladen, bevor die Zinkelektroden regeneriert werden müssen.



*QuantumSphere-Kathode*

Die **QuantumSphere Inc.** (QSI) aus Santa Ana, Kalifornien, ein führender Hersteller von Nano-Metallen und Legierungen für portable Energielösungen, kündigt im Oktober 2006 die Einreichung von zwei Patenten zur Materialzusammensetzung einer papierdünnen Elektrode an, welche die Effizienz der Kathoden von **Zink/Luft-Batterien** um 320 % steigert. Im Allgemeinen besitzen diese Batterien die 3 – 6fache Kapazität gleichgroßer Alkali-Zellen. Sie nutzen für ihre Kathode Luftsauerstoff, während die Anode aus Zink und

einem alkalischen Elektrolyt besteht. Die Energiekapazität hängt dabei nur von der Menge des Zinks in der Anode ab. Bislang sind Zink/Luft-Batterien als Hörgeräte-Batterien verbreitet.

Aufgrund der seit 2003 wiederholt aufgetretenen Massen-Probleme mit explodierenden oder in Flammen aufgehenden LiIo-Akkus, die Anlaß für aufwendige und teure Rückrufaktionen sind, entwickelt die Firma

**Zinc Matrix Power** mit ihrer **Zink/Silber-Batterietechnologie** eine sehr viel sicherere Lösung, die auf wässrigen Lösungen beruht und kein Lithium oder brennbare Flüssigkeiten enthält. Die



*Zink/Silber-Akku*

neuen Batterien werden im Oktober 2006 präsentiert. Verglichen mit zylindrischen Lithium-Ionen-Zellen speichern **Zink/Silber-Batterien** etwa 25 % mehr Energie. U-Boote der US-Marine werden schon seit Jahren mit Silber-Zink-Akkus ausgestattet, da hier die hohen Kosten aufgrund der Verwendung von Silber und der kurzen Lebensdauer nicht so ins Gewicht fallen. Für den kommerziellen Markt plant das Unternehmen demgegenüber die Kosten mit einem Recycling-Programm zu senken, das die Wiederverwendung des Silbers und Zinks erlaubt.

Dem Problem der niedrigen Zyklen-Zahl begegnet Zinc Matrix Power durch die Einbettung des Zink-Granulats in einem leitfähigen Polymer, was auch die Sicherheit der Batterien erhöht.



## Batterie mit Shape-Shifter-Funktion

Forscher am MIT untersuchen **2005** das eigentlich negative Phänomen, das Batterien auf längere Sicht ihren Geist aufgeben: Wird eine Batterie geladen, bewegen sich die Ionen von einer Elektrode zu anderen, was dazu führt, dass sich das Elektrodenmaterial ausdehnt. Entlädt sich die Batterie jedoch wieder, zieht es sich erneut zusammen. Diese Tatsache führt dazu, dass sich die innere Struktur einer Batterie langsam auflöst – sie bricht auseinander.

Die Forscher suchen daher nach Materialien, die diesen Effekt nicht kennen. Als man durchrechnet, wie viel mechanische Energie der Ausdehnungsprozess freisetzt, zeigte sich, dass Batterien im Vergleich zu Piezo-Technik das Zehnfache an Energie leisten können, mit dem Nachteil der geringen Geschwindigkeit allerdings. Piezo-Technik dagegen kann sich mit mehreren Tausend Zyklen pro Sekunde bewegen, während die Ausdehnung einer Batterie von der Zeit bestimmt wird, die das Aufladen braucht – von etwas über eine Minute bis hin zu einer Stunde. Die Forscher wollen dies nun verbessern, indem sie die Zeit reduzieren, die es dauert eine Batterie aufzuladen. Außerdem arbeitet man an einem Design physisch stärkerer Batterien, welche die mechanische Energie der Elektroden besser nutzen können. Das Endziel ist der Einbau einer ganzen Sammlung von Batterien in ein Rotorblatt, das dann selektiv ‚geomorph‘ werden kann und so optimal geformt wird.

Andere Einsatzmöglichkeiten des Batterie-basierten Formwandlers: Solarzellen, die sich aktiv nach der Sonne wenden oder Satelliten-Komponenten, die sich im Weltraum selbständig aufrichten.

## Betavoltaische Zelle (QynCells)

**Betavoltaik** ist ein mit der Photovoltaik vergleichbares Verfahren zur direkten Umwandlung von Beta-Strahlung in elektrische Energie mit Hilfe von Halbleitern.

Betavoltaische Zellen nutzen das Radioisotop Tritium als Energielieferant, das einem nur sehr langsamen

Zerfallsprozeß ausgesetzt ist. Der Strom wird erzeugt, indem Betateilchen kontinuierlich an umgebende Halbleiterschichten abgegeben werden. Da bei dieser Reaktion keine Wärme entsteht, eignen sich die Batterien auch für Laptops oder Handys.

Ende **2005** erfährt man, dass **Qynergy** sich mit Lösungen für eine stabile Energieversorgung von Mikrosystemen und MEMS (micro electro-mechanical systems) über lange Zeiträume befasst.  $\beta$ -Strahler wie  $^{33}\text{P}$  (Halbwertszeit: 25,3 Tage) oder  $^{147}\text{Pm}$  (Halbwertszeit: 2,62 Jahre) wandeln die Energie der freigesetzten Elektronen an einem Halbleiter (z.B. Siliziumcarbid) in Elektrizität um. Diese betavoltaischen ‚**QynCells**‘ sind flexibel skalierbar – von Kubikmillimetern zu Kubikzentimetern, mit Leistungen von Mikrowatt bis Milliwatt.

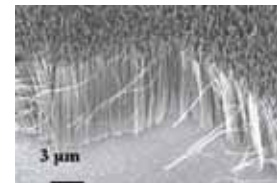
**2007** meldet das U.S. Air Force Research Laboratory einen Durchbruch bei der Wirkungsgradsteigerung von Betavoltaischen Zellen, so dass zukünftige Batterien mit einer einzigen Ladung etwa 30 Jahre lang funktionieren können. Die Forscher betonen, dass dabei weder Strahlung noch giftiger Abfall produziert wird. Die Markteinführung sollte in 2 – 3 Jahren erfolgen.

Es ist nichts zu finden über eine Markteinführung.

*Andere Technologien, die auf Radioaktivität im weitesten Sinne beruhen werde ich nicht behandeln, das ginge nämlich bis zu kleinsten Reaktoren und hat dann keinen Bezug mehr zum Thema der erneuerbaren Energien..*

## Nano-Batterie

Im Dezember **2005** stellen die MIT-Forscher einen wiederaufladbaren **Nano-Akku** vor, dessen Elektroden von feinsten Nano-Fasern aus Kohlenstoff, etwa 30.000 Mal dünner als ein menschliches

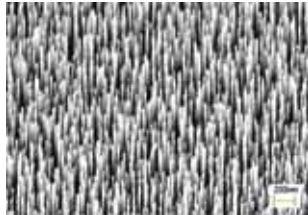


*Nanotubes*

Haar, wie ein Pelz umkleidet sind und damit für die nötige große Oberfläche sorgen. Sie sind dabei etwa 100.000 Mal länger als ihr Durchmesser.

Man geht davon aus, daß der angestrebte Akku, der unter dem Namen **Ultra-Battery** firmiert, bis zu mehrere hunderttausend Mal aufgeladen werden kann, wobei das Aufladen künftig nicht mehr mehrere Stunden, sondern nur noch wenige Sekunden dauern soll. Die immense Steigerung der Stromspeicherfähigkeit wird damit erklärt, daß die Speicherkapazität des elektrischen Feldes auf eine atomare Ebene angehoben wird.

**2006** wird aus Frankreich gemeldet, daß Wissenschaftler zweier Universitäten mittels nanotechnologischen Methoden eine Elektrode für Lithium-Batterien entwickelt haben, die wesentlich kraftvoller und dabei auch noch kleiner ist als die herkömmlichen Modelle. Zum Tragen kommen dabei sogenannte Nanorods, die als Anker des aktiven Material dienen, welches diese Fasern umhüllt. Die Fläche von 1 cm<sup>2</sup> der Elektrode wird durch die Nanorods auf 50 cm<sup>2</sup> gesteigert.



*Nanorods*



*Extrudierte Nanofasern*

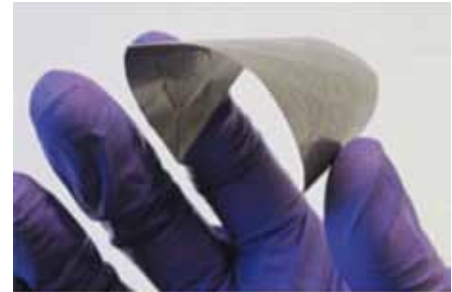
Im Oktober **2007** erscheinen in den Blogs Fotos zukünftiger US-Soldaten, in deren Uniformstoffe Nano-Fasern eingewoben sind, welche die Funktion von Energiespeichern und -lieferanten übernehmen können. Machbar wird diese Entwicklung durch eine neue Extrudermaschine, die in der Lage ist, verschiedene Materialien auf Nanomaßstab miteinander zu organisierten Fasern zu verbinden.

## **Papier-Batterie**

Eine relativ junge Entwicklung bilden die sogenannten **Papier-Batterien**, die diesen Namen ihrer äußerlichen Ähnlichkeit mit Papier verdanken. Sie sind extrem flach, elastisch und lassen sich biegen oder knicken.

Die erste Erwähnung datiert auf Ende **2005**, als Forscher des japanischen Unternehmens **NEC** über die Entwicklung ihrer **Organic Radical Battery** (ORB) berichten, die nur 0,3 mm dick ist und sich innerhalb von 30 Sekunden wiederaufladen läßt. Das Material der ORB-Zelle besteht aus einem umweltneutralen Gel-Elektrolyten, und pro cm<sup>2</sup> leistet die Zelle 1 mWh.

Der organische Akku mit einem Gewicht von 88 g und Abmessungen von nur 55 x 43 x 4 mm soll bis zu 35 W bereitstellen und in der Lage sein,

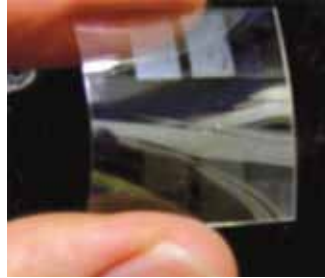


*Paper-Battery von NEC*

mit vier in Reihe geschalteten Einheiten kurzzeitig einen typischen 140 W PC zu versorgen und diesen im Falle eines Stromausfalls sogar selbständig herunterzufahren. Die Akkus nutzen einen elektro-chemischen Prozess organischer Radikalverbindungen, den NEC erstmals **2001** vorgestellt hatte.

Wissenschaftler der japanischen Waseda University veröffentlichen im März **2007** die Meldung, daß man eine neue Batterie auf Grundlage eines Redox-aktiven, organischen Polymers entwickelt habe, die sich in weniger als einer Minute aufladen lässt und eine Lebensdauer von über 1.000 Zyklen besitzt. Die Zelle aus Nitroxid-Radikalen ist 200 nm dünn und kann sich nicht selbst entladen.

Im April 2007 beschreibt Gilles Dennler, ehemals Professor am Institut für Organische Solarzellen der Johannes Kepler Universität in Linz, und inzwischen bei dem Solarenergie-Startup **Konarka Technologies** in Lowell, Massachusetts, beschäftigt, die



*Polymer-Batterie  
von Waseda*

Entwicklung einer **flexiblen Batterie**, die nicht mehr aufgeladen werden muss. Sie ist das Ergebnis einer dreijährigen gemeinsamen Forschung von fünf Ländern im Rahmen des European Polymer Solar Battery Project. Der Trick ist die Kombination einer organischen Dünnschicht-Solarzelle mit einer neuartigen Polymer-Batterie, mit deren Hilfe sich die Batterie ständig selber wiederaufladen kann, sobald sie dem Licht ausgesetzt wird. Prototypen der **Solar-Batterie** wiegen nur 2 g, sind weniger als 1 mm dick und liefern etwa 0,6 Volt.



*Solar-Batterie*

Die genutzte organische Solarzelle ist die von Konarka selbst entwickelte Kombination elektrisch leitender Polymere und Fullerene mit einer Lebensdauer von rund 3.000 Stunden, während die ultra-dünne Lithium-Polymer-Batterie von

dem deutschen Forschungspartner **VARTA-Microbattery** entwickelt wird. Diese Zelle ist nur 0,1 mm dünn und kann mehr als 1.000 Mal wiederaufgeladen werden – Einsatz findet sie bereits im neuen iPod von Apple. Die Rechte an der neuartigen Kombination von Solarzelle und Speicherzelle (wohlgemerkt, eine Innovation, für die es fünf Länder gebraucht hat!!) liegen bei Konarka, das die Batterie aber nicht selbst vermarkten möchte, warum auch immer...



*Papier-Batterie von Rensselaer*

Forscher des Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, New York, stellen im August 2007 eine weitere **Papier-Batterie** vor, die ebenfalls völlig ungiftig ist. Im Gegensatz zu früheren Versuchen durchbrechen sie den typischen Aufbau einer Batterie, bei der Elektrolyte und Elektroden durch eine Zwischenschicht getrennt werden.

Stattdessen konstruierten die Wissenschaftler ein Kompositmaterial. Dabei werden Kohlenstoff-Nanoröhrchen sowie ein Elektrolyt in ein Papier-Substrat eingebracht, wobei sich die Komponenten molekular miteinander verbinden. Das Ergebnis aus 90 % Zellulose wiegt genau so viel wie Papier, sieht so aus und fühlt sich auch so an. Es kann gerollt, gefaltet und sogar gestapelt werden, um mehr Leistung zu erzielen. Da das Papier biologisch mit menschlichen Gefäßen kompatibel ist, lässt es sich für medizinische Implantate einsetzen – zum Aufladen kann die Batterie menschlichen Schweiß oder Blut nutzen.

Die Arbeitstemperatur dieser Technologie beträgt zwischen minus 78°C und plus 150°C, die Zahlen variieren in den verschiedenen Quellen geringfügig.

## Plastik- und Polymerbatterien

Eine Version präsentiert die Brown University in Providence, Hauptstadt des US-Bundesstaates Rhode Island, im September 2006. In der sogenannten **Hybrid-Batterie** wird der Strom nicht mehr durch Metalle, sondern durch leitende Kunststoffe erzeugt. In dem System werden die langfristige Speicherkapazität einer Batterie mit der schnellen Ladungsaufnahme und -abgabe eines Kondensators gepaart. Zum Einsatz kommen dünne Streifen von mit Gold-beschichteter Kunststoff-Folie, deren Spitzen mit Polypyrrol und einer Substanz umhüllt sind, welche die Leiteigenschaften verändern. Die Batterie habe dadurch die doppelte Speicherkapazität eines elektrischen Double-Layer-Kondensators – und mehr als 100-fache Leistung



*Hybrid-Batterie*

einer Standard-Alkaline-Batterie.

Einen Monat später stellt auch die Firma **Technology Research Laboratories Inc.** aus Port Orange, Florida, eine Batterie vor, die fast ausschließlich aus Kohlenstoff- und

Kunststoff-Materialien besteht.

## Redox-Flow-Batterie

In Deutschland arbeitet Anfang 2008 das Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen an einem **Redox-Flow-System**. In einem Filmb Bericht darüber im Februar 2008 wird betont, dass das System weitgehend verschleißfrei arbeitet und dass die benötigte Flüssigkeit nur alle 40 Jahre ausgetauscht werden muss. Die Einheiten, an denen das Institut gemeinsam

mit der **Solon AG** arbeitet, produzieren jährlich 10.000 kWh elektrische Energie – was dem Maximalverbrauch eines Vierpersonenhaushalt entspricht. Der Prototyp ist allerdings drei Mal so groß wie das angestrebte kommerzielle Produkt, außerdem müsse man noch an der Kostenfrage arbeiten.

Über den Einsatz der Technik in Verbindung mit Elektrofahrzeugen, die dann einfach mit dem energiegeladenen Treibstoff ‚betankt‘ werden, liest man allerdings noch kaum etwas.

Auf der Hannover-Messe im April 2008 stellen Fraunhofer-Forscher eine **Redox-Flow-Batterie** vor, mit der sich verschiedene Elektrodenmaterialien, Membranen und Elektrolyte flexibel testen lassen.

Neu entwickelte chemische Batterien sind **Lithium/Aluminium/Pyrit-Batterien** mit erwarteten Energiedichten von bis zu 300 Wh/kg (gegenüber den 35 Wh/kg eines Bleiakкумуляtors), **Graphit-Batterien**, die an der Universität Duisburg erforscht werden, **Lanthan/Nickel- oder Lanthan/Nickel/Kupfer-Batterien**, ihr Ersatz durch Kobalt, Silizium oder Aluminium (Versuche bei Philips in Eindhoven), die von Daimler und einigen Batteriefirmen untersuchte zyklenfeste **Lanthan/Flourid-Batterie** (180 Wh/kg),

Am Israelischen Technion-Institut in Haifa wird wiederum das **sechswertige Eisen** der Ferrat-Salze, das gemeinhin als instabil verworfen wurde, zur Entwicklung einer neuen Batterie genutzt. Dabei hat die Verbindung dieser besonderen Eisenform („Super-Iron“) mit **Kalium** oder **Barium** das Speichervermögen um etwa 50 % auf 475 Wh/kg bzw. 419 Wh/kg angehoben. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß diese Zellen vollständig verrosten und keinerlei umweltbelastende Schwermetalle enthalten.

Es ist jedoch nicht immer nur Elektrizität, die gespeichert werden soll. Nachfolgend stelle ich verschiedene andere mechanische, chemische und thermische Speichersysteme vor – beginnend von der Druckluftspeicherung, die

## Thermochemische Speicher

Reversible chemische Reaktionen ermöglichen die Speicherung von Wärme aus verschiedenen Energiequellen. Mit chemischen Speichern sind größere Energiedichten erreichbar als bei Wasser oder bei Latentwärmespeichern, also eher in der Größenordnung von Erdölprodukten (200 kWh bis 500 kWh pro m<sup>3</sup>). Die Arbeitstemperaturen betragen bei Metallhydriden 280°C – 500°C, bei Silikatgelen 40°C – 100°C, und bei Zeolithen 100°C – 300°C.

Am weitesten fortgeschritten sind Konzepte wie das **Schwefelsäure/Wasser**-System und das **Schwefeldioxyd/Sauerstoff**-System, das für eine 50 MW Sonnenkraftwerk von der US-Amerikanischen Rocket Research Company konzipiert wurde.

Während man an der DFVLR mit dem Stoffpaar **Kieselgel/Wasserdampf**, und an der Universität Stuttgart mit **Paraffin/Salzhydrat** arbeitet, wird an der TU München, wo man sich auch mit der Heterogenverdampfung als Wärmetransportverfahren beschäftigt, in den Jahren **1983/1984** ein **Zeolith-Wärmespeicher** entwickelt, der sich auch für Wärmepumpen und -transformatoren sowie als Langzeitspeicher eignet. Dabei bildet das Zeolith die Absorbersubstanz und Wasser das Arbeitsmedium. Erste Pionierarbeiten hierfür werden schon **1979** am Lehrstuhl für angewandte Experimentalphysik unternommen.



*Zeolithcrystall-Druse*

**Zeolithe** nennt man eine Gruppe von z.T. in großen Mengen vorhandenen wasserhaltigen Metall-Alumosilikaten. Es sind ca. 40 natürliche und über 100 synthetische Zeolithe bekannt, die derart stark mit winzigen Poren

durchsetzt sind, daß riesige innere Oberflächen entstehen – pro kg sind es 800 bis 1.200 m<sup>2</sup>. Innerhalb der Hohlräume wirken starke elektrostatische Kräfte, die polare Moleküle, z.B. Wasser,

heftig ansaugen und unter Wärmeabgabe in die Kristallstruktur einbinden (Adsorption).

Die Anlage an der TU-München hat eine Kapazität von 300 kWh und eine Leistung von 20 kW, die Wärmezufuhr erfolgt mit 250°C bis 300°C, als Leistungsziffer wird die Zahl 1,4 genannt. Man nutzt hier die Zeolithe auch für die Weiterentwicklung der bereits in den **1920er** Jahren erfundenen und bisher mit Ammoniakwasser betriebenen **Wärmetransformatoren**. Bei diesen Transformatoren wird Wärme mittlerer Temperatur (90°C) zu etwa 40 % auf ein höheres Niveau transformiert (130°C), während der Rest als Wärme minderer Qualität abgegeben wird (30°C); die Wärmetransformatoren bilden damit im Grunde chemische Wärmepumpen.

Seit **1996** ist ein Sorptionsspeicher in der Münchner Grafischschule im Stadtteil Haishausen in Betrieb, der im Rahmen eines Pilotprojektes der Münchner Gesellschaft für



*Zeolith-Speicher*

Stadterneuerung (MGS) und des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung (ZAE) entwickelt wurde. Er besteht aus drei miteinander verbundenen Kammern, die insgesamt 7.000 kg Zeolith 13X enthalten, das bei Temperaturen ab 110°C effizient trocknet und sich für die Ankopplung an das bestehende Fernwärmenetz eignet. Als Speicherwirkungsgrad werden 86 % ermittelt. Wirtschaftlich betrieben kann der Speicher, der zum damaligen Zeitpunkt mit Investitionskosten zwischen 85.000 und 115.000 DM pro MWh veranschlagt wurde, allerdings erst, wenn 100 und mehr Zyklen pro Jahr gefahren werden können.



Im April **2006** erscheinen Meldungen über eine neue Methode, die in großen Mengen anfallende industrielle Abwärme sinnvoll zu nutzen. Dabei sollen 20-Fuß-Container zum Einsatz kommen, die auf Lkws verladen und direkt zu den Wärmeverbrauchern transportiert werden können. Die mobilen Energiespeicher sind vom Boden bis zur Decke mit Metallrippen durchsetzt; die Zwischenräume füllt ein Granulat aus winzigen blassbraunen Kügelchen aus, sogenannten Pellets aus **Zeolith**. Bei einer anderen Version ist das Material kristallin, strahlt weiß und wirkt wie zusammengepappter Schnee aus wasserdurchsetzten Salzkristallen namens **Natriumacetat-Trihydrat**. Auch dieser Stoff ist in der Lage, Wärme aufzunehmen, über einen längeren Zeitraum zu konservieren und später an anderer Stelle wieder abzugeben. Die Containerfüllungen wiegen 15 – 20 Tonnen, das Metallskelett nicht mitgerechnet.

Am Institut für Zukunftssysteme (IZES) der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes spricht man von einer neuen Form der ‚Wärmelogistik‘. Die Internationale Energieagentur (IEA) in Paris ist dabei, eine Arbeitsgruppe zum Thema einzusetzen. Im bayerischen Bad Tölz gibt es im November 2005 eine erste größere Expertenkonferenz. Längst sind Forschungs- und Pilotprojekte angestoßen, die demonstrieren sollen, daß der Wärme-Kurierdienst technisch funktioniert und sich auch ökonomisch rechnet. Als Energiequelle eignen sich Anlagen, die kontinuierlich Abwärme jenseits von 150°C liefern – und Verwerter können zum Beispiel Lackierereien, Lebensmittel- oder Agrarbetriebe sein, die Wärme benötigen um ihre Produkte zu trocknen, oder auch ein ganzjährig betriebenes Spaßbad. Auch mit dem Salzhydrat-System, das schon 90°C-Wärme verwerten kann, gibt es bereits erste Pilotprojekte. Mit einer vollen Container-Ladung Zeolith kommt man auf bis zu 3,5 MWh und damit auf einen Energiegehalt, der dem von etwa 350 l Öl entspricht, während die Salzkristalle höchstens zwei Drittel davon schaffen.

Anfang **2007** soll in einem Aluminium-Walzwerk im

nordrhein-westfälischen Grevenbroich ein erstes, vom Bundeswirtschaftsministerium unterstütztes Demonstrationsprojekt mit Zeolith-Akkus starten. Dort produziert die Hydro Aluminium Deutschland GmbH dünne Folien – sowie Heißluft von 230°C. Diese Abwärme soll zu einer Lagerhalle gelangen, die beheizt und trocken gehalten werden muß. In Grevenbroich müssen die mobilen Zeolith-Containern dafür nur auf die andere Seite des Werksgeländes gefahren werden. Für das Aufladen der mobilen Wärmespeicher werden sechs bis zehn Stunden Zeit veranschlagt. Die Entladung (und Energieeinspeisung) beim Abnehmer kann je nach Wärmebedarf bis zu einem ganzen Tag lang dauern.

Eine weitere Einsatzform von Zeoliten verwandelt sogar Holz in einen effizienten Wärmespeicher. Dabei wird das Holz mit Zeolit-Kristallkeimen geimpft, was zu einer Veränderung seiner molekularen Struktur führt, ohne jedoch seiner strukturelle Festigkeit oder seinem Aussehen zu schaden. Im März **2007** gehört diese Innovation zu den Top 25 des Modern Marvels Invent Now Challenge.

Ein 3. Welt System zur elektrizitätslosen, solaren Kühlung, das einen Parabol-Solarkollektor, mehrere Zeolithbehälter, einen (auch defekten) Kühltisch sowie eine manuell betriebene Vakuumpumpe integriert, wird bereits **1997** von dem deutschen Unternehmen Zeo-Tech vorgestellt. Hier reichen 30 Pumpbewegungen aus, um eine Temperatur von minus 15°C zu erreichen – ausreichend kalt für empfindliche Medikamente u.ä.

Schon ab **1988** wird an der TU München auch mit **Kieselgel** (Silikagel o. Silica Gel) gearbeitet. Das stark poröse, glasartige Material nimmt Wasserdampf auf und setzt dabei Wärme frei (Adsorption). Die Feuchtigkeit läßt sich durch Wärmezufuhr wieder austreiben (Desorption). So kann sommerliche Wärme z.B. aus Solarkollektoren feuchtes Kieselgel trocknen. Im Winter setzt es dann die gespeicherte Wärme frei, wenn feuchte Luft hindurchgeblasen wird. Die Umsetzung für ein Einfamilienhaus erfordert allerdings 25 t Kieselgel, das damals 5.000 DM pro Tonne kostete.



*Silica Gel*

Ein weiteres Stoffpaar ist **Magnesium/Wasserstoff**, das allerdings den Nachteil einer sehr trägen Reaktion hat. Am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung und Strahlenchemie in Mülheim/Ruhr wird daraufhin ein mittels Katalysator hergestelltes **Magnesiumhydrit** angewandt, dessen Reaktionskinetik beträchtlich höher ist. Ein damit ausgerüsteter Speicher wird 1988 für ein Solarkraftwerk der Lörracher Forschungsfirma Bomin Solar vorgesehen. Hierbei soll der gesamte Heizenergiebedarf eines Einfamilienhauses mit einem 5 m<sup>2</sup> großen Kollektor und mit 2 t – 3 t Magnesium im Keller (geschätzte Kosten: 30.000 DM) gedeckt werden: Der Kollektor bündelt das einfallende Sonnenlicht und lenkt es auf den Hochtemperatur-Magnesiumspeicher. Durch die dabei entstehenden Temperaturen von 450°C wird aus dem im Speicher vorhandenen Magnesiumhydrit Wasserstoff freigesetzt. Der im Hochtemperatur-Speicher freigesetzte Wasserstoff strömt anschließend in einen Niedertemperatur-Speicher und wird dort chemisch gebunden, wobei Wärme frei wird, die zur Raumheizung oder Warmwasserbereitung genutzt werden kann. In der Nacht oder bei fehlender Sonneneinstrahlung wird das System umgekehrt: Wasserstoff aus dem Niedertemperatur-Speicher strömt zurück in den ersten Speicher und wird dort an das Magnesium angelagert, wobei erneut Hochtemperatur-Wärme frei wird. In dieser Phase sinkt

die Temperatur im Niedertemperatur-Speicher auf Minusgrade, was zum Betrieb von Kühlanlagen genutzt werden kann.

Eine andere Methode wird Ende **1998** von japanischen Forschern entwickelt, wobei eine **Membran** aus **Aluminiumoxid** und **Silizium** zum Einsatz kommt, die für **Wasserstoffatome** durchlässig ist, größere Atome und Moleküle jedoch zurückhält. Die Legierung wird zu einem sehr dünnen Rohr mit einer Wandstärke unter einem zehntausendstel Millimeter geformt, das in einen Kessel eingebaut wird, durch welchen Silizium-Dampf geleitet wird. Während das gasförmige Silizium die größeren ‚Löcher‘ der Membran blockiert, können die kleinen Wasserstoffatome schneller durch die verbleibenden Poren schlüpfen, als größere Moleküle, etwa Kohlenmonoxid. Wird nun heißer **Methanol**-Dampf durch das Rohr geleitet, zerfällt dieser Alkohol durch die Hitze und mittels eines zusätzlich eingebauten Katalysators in Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Da die Wasserstoffatome sofort durch die Membran entweichen, kann die Reaktion nicht rückwärts ablaufen, wodurch das System sogar schon bei Temperaturen von 150°C bis 200°C funktioniert, während für die Spaltung von Methanol bisher mindestens 300°C nötig waren. Die Spaltprodukte werden getrennt gelagert und bei Bedarf in Methanol zurückverwandelt. Dabei wird Wärme frei und das Methanol fließt wieder in den Kreislauf zurück. Herkömmliche Systeme zur Abwärmenutzung sind erst bei mehr als 200°C wirtschaftlich, das neue Verfahren ermöglicht es dagegen, auch Abwärme geringerer Temperatur chemisch zu speichern.

Einen Sorptionsspeicher auf Basis einer **Calciumchlorid-Sole** wird von der Universität Hohenheim für solare Trocknungsanlagen zur Entfeuchtung von Hallenbädern weiterentwickelt – als wirtschaftliche Alternative zur konventionellen Luftentfeuchtung mittels energieverbrauchender klimatechnischer Installationen.

**2001** wird an der FHTW in Berlin und in Kooperation mit dem Forschungsunternehmen Zeosys ein Prüfstand für verschiedene Adsorbensmaterialien eingerichtet. Ziel ist es, optimal angepasste Sorptionsmittel zu bestimmen, wozu an der FHTW **kristalline, mikroporöse Zeolithe, mesoporöse Alumosilikat-Molekülgruppen, amorphe mikro- und mesoporöse Alumosilikate** sowie **Salzhydrate** und **Kompositadsorbentien** untersucht und verglichen werden. Die Speicherung von Solarwärme in geschmolzenem Material wird ab 2007 insbesondere von dem Solarenergie-Start-up Ausra aus dem kalifornischen Palo Alto verfolgt, da sich die Methode als die wirtschaftlichste erwiesen hat. Die Ausra-Technologie kann die Wärme bereits 16 Stunden lang speichern, allerdings verrät das Unternehmen nicht, welches Material dabei erhitzt wird. Als Argument für die Vorteile dieser Technik wird ein Vergleich zwischen einer Thermoskanne und einer Laptop-Batterie gezogen, die beide etwa die gleiche Menge an Energie speichern. Während die Batterie allerdings 150 \$ kostet, bekommt man die Thermoskanne schon für 5 \$.

Bei einem Solar-Wärmeleistungswerk im US-Bundesstaat Nevada und zwei weiteren in Spanien im Bau befindlichen Projekten werden **kostengünstige Salzlösungen** eingesetzt, die beim Schmelzen hohe **Energien** absorbieren und diese beim Erstarren wieder abgeben können.



*Graphitspeicher von Lloyd Energy*

Im Juli **2007** präsentiert Lloyd Energy Systems aus dem australischen **Sydney** einen Wärmespeicher aus hochreinem Graphit, aufgrund dessen spezieller Eigenschaften die Hitze für viele Tage und sogar Wochen gespeichert werden kann.

Das Material des Graphite Block Energy Storage System hat eine Schmelztemperatur von 3.500°C und ist sehr stabil gegenüber Temperaturwechsel. Die Speicherkapazität beträgt zwischen 300 kWh pro Tonne bei einer Speichertemperatur von 750°C bis rund 1.000 kWh bei 1.800°C.

Das Unternehmen entwickelt und patentiert auch eine kostengünstige Methode, um Graphit niedriger Qualität in hochqualitativen, kristallinen Graphit umzuwandeln, wie er zum Einsatz in den Wärmespeichern benötigt wird.

Ende **2007** stellt auch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) einen neuartigen Wärmespeicher vor. Im Rahmen des bereits **2004** begonnenen EU-Projekts DISTOR (Energy Storage for Direct Steam Solar Power Plants) arbeiten 13 Industrie- und Forschungspartner aus fünf Ländern unter der Leitung des DLR an der Entwicklung einer Methode, damit solarthermische Kraftwerke auch nachts oder an bewölkten Tagen Strom liefern können.

Inzwischen gelingt es, dem im spanischen Testgelände Almería aufgebauten 100 kW Speicher aus mehreren Schichten Graphitfolie und Latentwärmespeichermaterial 200°C heißen Dampf zu entnehmen um damit eine Turbine anzutreiben. In einem Anschlussprojekt soll das Speicherprinzip auf eine 1 MW Anlage erweitert und Temperaturen von mehr als 300°C erreicht werden.

Im April **2008** präsentiert das Unternehmen SolarReserve aus Santa Monica, Kalifornien, sein Konzept des Power Tower, dessen Tank mit



*Power Tower von SolarReserve*

flüssigem Salz befüllt ist. Dieses besteht aus einer Kombination von Natrium- und Kalium-Nitrat, ist völlig ungiftig und besitzt eine Schmelztemperatur von 238°C, bei der das Material eine wasserähnliche Konsistenz hat.

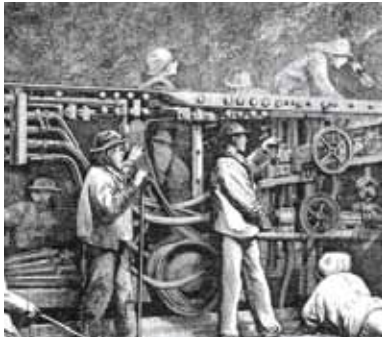
## Druckluft

Der erste Einsatz von Druckluft war wohl das Blasen auf Zunder, um Feuer zu entfachen – und Gebrauch von Blasrohren bei Jagd und Kampf. Ägyptische und sumerische Goldschmiede benutzten ein Blasrohr zum Einschmelzen kleiner Metallmengen, indem sie die Luft direkt in die Glut brachten und somit die Temperatur entscheidend erhöhten. Der erste mechanische Kompressor, der handbetriebene Blasebalg, wird Mitte des 3. Jahrtausends v. Chr. entwickelt, die sehr viel leistungsfähigeren fußbetriebenen Blasebälge um 1500 v. Chr.

Der Grieche Ktesibios (ca. 285 - 222 v. Chr.) nutzt die Druck- oder auch Pressluft, die **Speicherung von Energie**, für ein Katapult, das mit Hilfe der in einem Zylinder zusammengepressten Luft eine Spannung erzeugt, die Geschosse fortschleudert.

**1663** veröffentlicht Blaise Pascal seine Erkenntnisse zur Kraftverstärkung durch Flüssigkeiten (Hydraulik), die sich auch auf die Drucklufttechnologie anwenden lassen, und um **1810** werden bereits Eisenbahnen mit Druckluft angetrieben. In größerem Maßstab findet Druckluft erstmalig ab **1861** beim Bau des Mont-Cenis-Tunnels (o.a. Fréjus-Bahntunnel) zwischen Frankreich und Italien Anwendung, wo die patentierten neuen pneumatischen Stoßbohrmaschinen des französischen Ingenieurs Germain Sommeiller eingesetzt werden, der auch das Gesamtprojekt leitet.

Ihre Idee stammt von dem italienischen Ingenieur Giovanni Battista Piatti. Die Druckluftversorgung dieser frühen Pressluftschlämmer erfolgt über Kompressoren, die von Wasserturbinen betrieben werden.



*Mont Cenis Tunnelbau*

**1896** besteht die Pariser Druckluftanlage bereits aus einem 50 km langen Netz aus Luftleitungen und einer Erzeugungskapazität von 2,2 MW. Mit einem Druck von 550 kPa wird Energie zum Betrieb von Motoren der Leicht- und Schwerindustrie verteilt und über Zähler abgerechnet. Häufige Abnehmer sind auch Zahnärzte, Näherinnen, Druckereien und Bäckereien. Und das Pariser Druckluftnetz ist sogar noch heute in Betrieb.

Um **1900** werden auch in Deutschland und Österreich die ersten Unternehmen mit Druckluft versorgt, um im Laufe der Zeit entstehen immer leistungsfähigere und vielseitiger einsetzbare Druckluftwerkzeuge. Wer kennt sie nicht die Druckluft betriebenen Schrauber in der Formel 1 und in normalen Autowerkstätten.



*Reifenwechsel in der Werkstatt - bei Ferrari in der Formel1*

Und bis heute wird Preßluft in Hospitälern wie auch von Tauchern genutzt, die sie in Stahlflaschen mit sich führen.

Womit wir auch bei dem Thema der Druckluftspeicherung sind, die heute in ganz anderem Maßstab ein Comeback feiert, da diese Technologie eine der kostengünstigsten, sichersten und einfachsten Methoden zur Energiespeicherung darstellt.

Bei **Druckluftspeichern** (Compressed Air Energy Storage, CAES) bildet die absolute Dichte des Speichers die wichtigste Bedingung. Das erste Druckluftspeicher-/Gasturbinen-Kraftwerk der Welt wird 1978 von der Firma Nordwestdeutsche Kraftwerke AG (NWK, Vorgängerunternehmen der E.ON Kraftwerke AG) im

niedersächsischen Landkreis Wesermarsch in Elsfleth-Neuenhunorf bei Bremen errichtet. Die Idee zu dieser Speichermethode ist zu diesem Zeitpunkt allerdings schon rund 30 Jahre alt. Das 290 MW Projekt wird 1975 gestartet, und die Kostenkalkulation beläuft sich auf 92 Mio. DM.

Billiger Nachtstrom wird dazu genutzt, um mit einem Kompressor Luft in zwei ausgelaugten Salzstöcken zusammenzupressen. Betrieben wird der Kompressor durch einen 60 MW Elektromotor. Die zylindrischen Salzkavernen mit jeweils gut 150.000 m<sup>2</sup> Fassungsvermögen liegen in 600 - 800 m Tiefe. Bei Spitzenbedarfszeiten nährt die

herausdrängende Luft die Erdgasverbrennung zum Antrieb von Stromgeneratoren im Kraftwerk. Im Turbinenbetrieb kann diese Anlage über einen Zeitraum von zwei Stunden eine Leistung von 290 MW



*Energy Bags Laborversuch*

bereitstellen. Innerhalb von acht Stunden können die beiden Kavernen wieder auf den Maximaldruck von 70 bar aufgeladen werden. In den zwei Stunden, in denen die wieder austretende Luft die Verbrennung verstärkt, sinkt der Druck von 70 auf 45 bar.

An der Planung des Druckluftspeicher-Kraftwerk in **Hunorf**, das einen Gesamtwirkungsgrad von 42 % erreicht, ist auch die Schlumberger-Firma Kavernen Bau- und Betriebs-GmbH (KBB) beteiligt, die als eine der weltweit führenden Ingenieurgesellschaften auf dem Fachgebiet der Untertagespeicherung gilt und bereits einige der größten Salzkavernenspeicher zur saisonalen Bevorratung von Erdgas realisiert hat

Modernere Anlagen recyceln die bei der Stromproduktion anfallende Abwärme und kommen so auf Wirkungsgrade bis zu 55 %.

Bei dieser CAES-Technologie wird zwar das allgemeine Übel der Gasgeneratoren aus der Welt geschafft, nämlich der geringe Wirkungsgrad und die damit verbundene niedrige Leistung, sehr aufwendig ist dagegen die notwendige Wasserspülung mit Süßwasser, damit die Salzreste in der gespeicherten Luft die Turbinen nicht angreifen.

Eine zweite CAES-Anlage betreibt die Alabama Electric Cooperative seit **1991** in **McIntosh**, Alabama. Das Speicherkraftwerk besitzt eine Salzkaverne von 538.000 m<sup>2</sup> Volumen in 450 - 750 m Tiefe, die über einen Zeitraum von 26 Stunden 110 MW verfügbar macht. Gespeichert wird die Luft bei einem Druck zwischen 45 - 76 bar. Im Juni **1998** werden die Arbeiten an zwei gasbetriebenen Single-Cycle-Gasturbinen abgeschlossen, die über eine Gesamtleistung von 226 MW verfügen und als McIntosh Blöcke 2 und 3 konzipiert sind..

Durch den starken Ausbau der Windenergie verschärft sich der Bedarf an Regelenergie zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage, die bislang von sogenannten Schattenkraftwerken (meist schnell anfahrnde Gasturbinen) zur Verfügung gestellt wird. Experten rechnen damit, daß dieser Bedarf bis **2015** auf rund 3.200 MW steigen wird. Neben Pumpspeicherkraftwerken eignen sich besonders Druckluftspeicherkraftwerke gut für diesen Zweck. Einige der neu vorgeschlagenen CAES-Systeme beschränken sich auf die Komprimierung der Luft und nutzen die reine Preßluft (ohne zusätzliche Gaszufuhr) zur Spitzenlast-deckung. Bei diesen Systemen muß die Kompressionswärme allerdings in einem Wärmeträger gespeichert werden, weil der Gesamtwirkungs-grad sonst zu klein wäre.

Anfang **2010** wird von Forscher der University of Nottingham das **Integrated Compressed Air Renewable Energy Systems** (ICARES) präsentiert, an ihm wird dort seit **2006** gearbeitet.

Hierbei wird Offshore-Windenergie aus riesigen Turbinen mit Durchmessern ab 230 m genutzt, um unter



Wasser verankerte Säcke aus luftdichten Kunststoff- und Textilmaterialien namens **Energy Bags** mit Druckluft zu befüllen, welche dann bei Bedarf Druckluftgeneratoren antreibt um Strom zu erzeugen. Optimal ist, wenn sich die Beutel, jeweils so groß wie zehn Doppeldecker-Busse, in etwa 500 m Tiefe befinden, da die Luft hier mit einem Druck gespeichert wird, der dem äußeren Wasserdruck entspricht, also 50 bar. In dieser Tiefe lassen sich pro Kubikmeter Inhalt bis zu 25 Megajoule speichern.

Mitte **2010** laufen mit finanzieller Unterstützung von E.ON International Research (310.000 €) Tests mit zwei Maßstabmodellen, die in einem 15-Tonnen-Tank untersucht werden. Anschließend Tests im Meerwasser sollen dazu führen, daß bis Mai **2011** eine marktreife Energiespeicherlösung vorgelegt werden kann.

Im Rahmen des EU-geförderten europäischen Forschungsprojekts Advanced Adiabatic – Compressed Air Energy Storage (AA-CAES) arbeiten 20 Unternehmen und Institute ab 2003 daran, die Wirtschaftlichkeit der Druckluftspeicher-Technologie zu steigern. Beteiligt sind Energieversorger wie RWE und E.ON, Kraftwerkhersteller wie MAN Turbo und Alstom, das DLR u.a. Das Interesse ist groß, da es in direkter Nachbarschaft der geplanten deutschen Offshore-Windparks genug Salzstrukturen gibt,



*SST Solar-Dish*

um Speicher zu bauen. Auch im Meer selbst ist der Bau von Druckluftspeichern kein Problem.

Im September **2005** findet in Berlin das dena-EnergieForum Druckluftspeicherwerke statt, bei dem es vorrangig um **Adiabate Druckluftspeicherwerke** (AA-CAES) geht, die nicht nur die Druckluft speichern, sondern – in einem separaten Wärmespeicher – auch die Wärme, die beim Verdichten der Luft frei wird. Für die Stromerzeugung wird die Wärme der zur Turbine strömenden Druckluft wieder zugeführt, was den kostspieligen Einsatz von Erdgas überflüssig macht. Allein mit regenerativem Strom betrieben, sollen AA-CAES Wirkungsgrade von bis zu 70% erreichen.

Im März **2006** meldet der Energieversorger EnBW, daß man am Bau einer Anlage zur unterirdischen Speicherung von Druckluft in Salzstöcken an der deutschen Nordseeküste arbeitet, in denen Energie aus unstillen Quellen wie Windkraftanlagen zwischengespeichert werden soll. Bei einem Überangebot an Strom, vor allem nachts, soll die Luft mit bis zum 100-fachen des normalen Atmosphärendrucks in zwei etwa 200 m hohe und 50 - 80 m breite Salzkavernen mit 150.000 m<sup>3</sup> Fassungsvermögen gepreßt werden, die rund 800 m tief liegen. Das geplante EnBW-Kraftwerk soll zunächst mit Gasbe-feuerung arbeiten, während in der zweiten Phase das so genannte ‚adiabate‘ Prinzip umgesetzt werden soll. Adiabate (ohne Wärmeaustausch verlaufend) bedeutet in diesem Fall, daß die bei der Kompression entstehende Wärme von bis zu 600°C zwischengespeichert und später zum Anheizen der Luft bei der Rückumwandlung genutzt wird – ohne Zufeuerung fossiler Brennstoffe. Das klingt sehr gut, aber außer der Ankündigung ist nichts zu finden.

Die **Solar Southwest Technology Inc.** (SST) aus Phoenix, Arizona, arbeitet seit ihrer Gründung **2008** an einem System, das die Solarenergie nutzt um die aus überschüssiger Windenergie erzeugte und gespeicherte Druckluft bei ihrer anschließenden Expansion auf

umweltfreundlichem Wege zu erhitzen. Das Unternehmen wendet hierfür eine [Dish-Technologie](#) an, in Form eines 23 m durchmessenden Parabolspiegels mit einer Fläche von mehr als 320 m<sup>2</sup>, der die Druckluft auf eine Temperatur von bis über 900°C aufheizen soll. In Verbindung mit der CAES-Technologie könnte ein einziger Spiegel bis 200 kW leisten. Kooperationspartner ist die Firma Brayton Energy in Hampton, New Hampshire, welche die Solarspiegel-Technologie unter dem Namen SolarCAT entwickelt hat.

Ein Prototyp des **TurboSolar Power System** wird südlich des Sky Harbor Flughafens von Phoenix errichtet, wobei die Druckluft allerdings durch einen separaten, elektrisch betriebenen Kompressor erzeugt wird, da sich der dortige Untergrund nicht für einen Speicher eignet. Man hofft, damit Investoren überzeugen zu können, in die Entwicklung und Kommerzialisierung dieses Systems einzusteigen.

Im November **2010** gibt Southwest Solar den Abschluß der Bauarbeiten an seinem Southwest Solar Research Park in Phoenix bekannt. Im Dezember **2011** meldet das Unternehmen die erfolgreiche Testphase für beendet und beginnt mit dem Normalbetrieb.

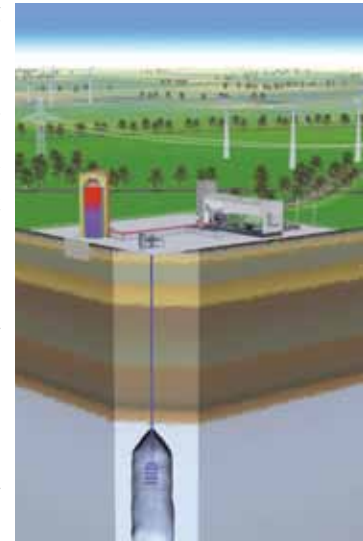
Im Gegensatz zu den meisten Ansätzen, bei denen die Druckluft mit Gas kombiniert in entsprechenden Turbinen ‚verbrannt‘ wird, verfolgt die in West Lebanon, New Hampshire, beheimatete US-Start-Up Firma **SustainX Energy Solutions** des Dartmouth College eine andere Methode, bei der die elektrische Energie direkt aus der Expansion der Preßluft erfolgt. Das **2009** gegründete Unternehmen beschreibt seine Technik als isothermen Gaskreislauf, der mit einer stufenweisen hydraulischen Kompression und Expansion gekoppelt ist. Die Energie wird überirdisch gespeichert, was die langen Vorlaufzeiten für die ansonsten notwendigen Genehmigungen vermeidet. Im September 2010 erhält das Unternehmen ein Patent auf seine Technologie, bei dem es um eine Methoden zur Speicherung von Druckluft bei einer (ungefähr) konstanten

Temperatur geht. Dabei wird bei der Kompression Wärme ab-, und bei der Expansion wieder zugeführt. Im November ist SustainX eines der 12 Gewinner-Firmen des von GE und weiteren Venture Capital Unternehmen veranstalteten und mit 200 Mio. \$ ausgestatteten Ecomagination Challenge Wettbewerbs, wobei sich SustainX mit den anderen 11 Firmen die ersten 55 Mio. \$ Preisgelder aufteilen.

Ebenfalls Anfang **2010** erweitert das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) die Forschungsförderung um den Schwerpunkt Stromspeicher. Eines der ersten geförderten Projekte ist die Entwicklung und der Bau eines adiabaten Druckluftspeichers durch ein Firmenkonsortium mit dem Ziel der Errichtung einer ersten großtechnischen Demonstrationsanlage ab **2013**, die über eine Speicherkapazität von

1 GWh verfügt und fünf Stunden lang eine elektrische Leistung von bis zu 200 MW erbringen soll. Der Wirkungsgrad soll 70 % erreichen, während die Kaverne, die für Adele im Salzstock ausgespült wird, eine Höhe von ca. 300 m haben soll.

RWE geht von einem Bedarf von 20 - 30 Anlagen in Deutschland aus, um die Netzspannung bei regenerativer Strom-Vollversorgung stabil zu halten.



*RWE Druckluftspeicher  
(Grafik)*

## Druckluft im mobilen Einsatz

Zunehmend mehr Interesse wird der Druckluft auch im Verkehrs- und Transportwesen entgegengebracht. Der französische Physiker und Mathematiker Denis Papin (1647 – 1712) schlägt bereits **1687** der Société Royale in London den Einsatz von Druckluft vor, um Energie von einem Ort zum anderen zu transportieren.

Zwischen **1890** und **1902** sind auch in Bern Drucklufttrams im Einsatz. Die zehn **Triebwagen** vom System Mékarski der

Maschinenfabrik Bern werden vor ihrer Fahrt im alten Tramdepot beim Bärengraben mit Druckluft versorgt, die aus einer mit Wasserkraft der Aare betriebenen Kompressorenanlage



*Enginair Kleintransporter*



*Enginair Enviro 1*

stammt. Die Technologie hat allerdings zwei entscheidende Nachteile: erstens reicht die gespeicherte Energie manchmal nicht aus, um die Tram wieder zur Auffüllstation

zurückzubringen, und zweitens zeigten die Pressluftschläuche die Tendenz, ab und zu mit einem großen Knall zu platzen und die Passagiere gewaltig zu erschrecken.

Die Arnold Jung Lokomotivenfabrik GmbH in Jungenthal, Kirchen a.d. Sieg, baut seit der **1920er** Jahren und noch bis **1987** Preßluft-Grubenlokomotiven, zuletzt überwiegend für Polen.



*Druckluft-Straßenbahn*

Es gibt immer wieder Versuche Luftdruck-Autos zu entwickeln und auf den Markt zu bringen, aber mit wenig Erfolg.

Über ein Luftdruck-Auto wird 2004 aus Australien berichtet, wo es von dem Motordesigner Angelo

Di Pietro in seinem Unternehmen Enginair Pty Ltd. in Brooklyn, Victoria, entwickelt worden ist. Di Pietro arbeitet 1969 und 1970 im Stuttgarter Entwicklungslabor von Mercedes Benz am Wankel-Motor und wandert 1970 nach Australien aus. Nach zweijähriger Arbeit meldet er 1999 einen Durchbruch bei der Entwicklung eines besonders effizienten Motors und gründet ein Jahr später die Firma Enginair.



*Enginair Car*



*Außerdem werden noch Rasenmäher, Carts und Motorroller mit dem Motor ausgerüstet.*

Die neuen Luftdruckmotoren werden erfolgreich in kleineren Fahrzeugen, bei Rollern und sogar als Außenborder für Boote getestet. Im August **2004** stellt das Unternehmen einen marktreifen, mit Druckluft betriebenen Kleintransporter vor, außerdem soll ein weiterer **Enginair Carrier** zum Einsatz im (geschlossenen) Melbourne Wholesale Fruit & Vegetable Market entwickelt werden, wo bislang 300 Transporter mit lauten, benzinschluckenden und Abgase emittierenden 2-Kolbenmotoren herumfahren.

Das von Enginair vorgestellte Fahrzeug ist mit einem speziell entwickelten Rotationskolbenmotor ausgestattet und erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Interessenten melden sich aus den USA, China, den Niederlanden und Großbritannien. Im April **2006** melden einige Blogs, daß die **Rotary Air Engine** von Angelo Pietro inzwischen einen Wirkungsgrad von fast 100 % erreicht. Die Druckluft wird in sechs Expansionskammern geleitet und bewegt dadurch einen einzelnen Rotationszylinder. Der Motor ist so klein, daß er sogar direkt als Radnabenmotor eingesetzt werden kann.

Neben dem Transporter **Enviro 1**, der auf dem Foto von **2010** schon sehr professionell aussieht, entwickelt Di Pietro auch einen Druckluft betriebenen Kleinwagen für zwei Personen.

Ein weiteres Fahrzeug, an dem noch gearbeitet wird, ist mit Kevlar Karbon Druckluftbehältern von EADS in Frankreich ausgerüstet und soll mit ca. 300 Liter komprimierter Luft eine Reichweite von 200 km erzielen. Die Betankung erfolgt mittels Kompressor, wobei Energiekosten von ca. 2,80 € je ‚Tankfüllung‘ entstehen. Die außerdem geplanten **CityCars** sollen anfänglich eine Reichweite von ca. 300 km aufweisen. Es wird tatsächlich produziert.

**Die 1994** gegründeten Firma **Aeromovel Global Corporation** (AGCO) hat ein Konzept entwickelt, das einer aufgeständerten Einschienenbahn ähnelt, es wird völlig auf den Antriebsmotor verzichtet – zugunsten von stationären, elektrischen Druckluftgebläsen, die den Zug

vorwärtsbewegen. Dabei wird eine Antriebseinrichtung verwendet, die von außen wie ein traditionelles Bahngleis aussieht, während in Wirklichkeit kleine Platten, die viereckigen Segeln ähneln, innerhalb eines angedichteten Luftkanals unterhalb des Wagen den Niederdruckluftstrom aufnehmen und von diesem voran bewegt bzw. gebremst werden.



*Aeromovel in Jakarta*

**1980** wird auf der Hannover-Messe in Deutschland ein kleines Testfahrzeug für 12 Passagiere installiert und betrieben, das innerhalb von neun Tagen 18.000 Menschen transportiert. Später wird das System im Assis Brazil Exhibition Park in Esteio betrieben. **1981** folgt der Vertrag zum Bau einer 1.025 m langen Pilotstrecke in Porto Alegre mit einer Kapazität von 300 Passagieren pro Wagen. Nachdem **1982** für Tests bereits eine 100 m lange Strecke in Gravataí, sowie ein Fahrzeug für 150 Passagiere zusammengebaut sind, und auch der Bau der Aeromovel Pilotlinie in Loureiro da Silva Avenue beginnt, wird der Mittelzufluß abrupt unterbrochen. Um das Erreichte nicht aufgeben zu müssen, beschließt Coester die Linie auf 650 m zu verkürzen und nur eine einzelne Station zu bauen – auf eigene Kosten!



Das System in Porto Alegre wird **1983** eingeweiht, und ab **1984** werden mit einem Zug Demonstrationsfahrten für Passagiere durchgeführt. In einem Gutachten wird **1985** empfohlen, die Pilotlinie so weiterzuführen, wie sie ursprünglich entworfen wurde, und **1986** folgt die Unterzeichnung eines Vertrags mit der FINEP, um endlich die erste Meile der Pilotlinie zu komplettieren.

Ebenfalls **1986** besucht eine Regierungsdelegation aus Indonesien die Demonstrationsanlage in Brasilien, und **1988** erwirbt die P.T. Citra Patenindo Nusa Pratama Group die Rechte für den Bau eines 3,2 km langen Ringsystems. Dem kleinen Ingenieurbüro gelingt es mit Hilfe brasilianischer Ingenieure, das Projekt im Taman Mini Indonesia Indah (TMII) Themenpark in Jakarta in nur 8 Monaten und zu einem unschlagbar günstigen Preis von 9 Mio. \$ zu verwirklichen. Damit ist ab **1989** das bislang größte Aeromovel-System mit sechs Stationen erfolgreich in Indonesien in Betrieb.



*Aeromovel (Design)*

Die Betriebskosten sind ebenfalls gering und betragen nur etwa ein Viertel der Kosten vergleichbarer Beförderungssysteme. Der Gesamtenergiebedarf der TMII-Anlage beträgt nur 500 kW. Der Fuhrpark besteht aus zwei Doppelwagen für jeweils 104 sitzende Passagiere, sowie einem Wagen für 48 sitzende und 252 stehende Passagiere. Die Geschwindigkeit der Züge auf der in 5,5 m Höhe aufgeständerten und 3,2 km langen Strecke erreicht 50 km/h Spitze.

***Es ist fast unglaublich – aber auch repräsentativ für die noch immer stattfindende Zensur gegenüber erfolgreichen Energie-Alternativen →, daß selbst gestandene Nahverkehrsexperten noch nie etwas von dem Aeromovel-Transportsystem gehört haben!***

Auf der Homepage von AGCO werden als Kooperationspartner die Firmen Allen-Bradley und Reliance Electric des Rockwell-Konzerns sowie die Parsons Transportation Group angegeben. Neben der Aeromovel Brazil in Porto Alegre gibt es eine Firmentochter Aeromovel USA in Westlake Village, Kalifornien, sowie eine Repräsentanz in Saudi-Arabien. Ein Besuch auf der interaktiven Homepage von Aeromovel Brazil ist trotz längerer Ladezeit und etwas monotoner Synthie-Musik zu empfehlen.



*Cadillac Aera (Grafik)*

Von der GM-Marke Cadillac gibt es einen Designbeitrag namens Aera. Dieses ist ein Leichtbau-Fahrzeug, das mittels Druckluft angetrieben werden soll. Überraschend ist die erwartete Reichweite von 1.600 km, die einem Lufttank mit einer Maximalladung von 10.000 Psi zu verdanken ist. Dieser versorgt eine Turbine mit der nötigen Energie, um den Flitzer auch adäquat zu beschleunigen. Die gesamte Fahrzeugelektronik ist kabellos und reduziert zusätzlich das Gewicht, während das Exoskelett aus einem Stück aus hochmodernen Verbundmaterialien geformt wird.