WDR FERNSEHEN

Servicezeit : Technik

Servicezeit: Technik vom 21. Juli 2005

Redaktion Wolfgang Back

Die Themen der Sendung:

Photovoltaik (1): Stromerzeugung durch Solarenergie	Seite	1
Solarthermie (2): Wärmeerzeugung durch Solarenergie	Seite	2
Geothermie – Wärme, die aus der Erde kommt	Seite	4
Wendelstein 7-X	Seite	6
Der 8. Sinn: Digicam	Seite	9

URL: http://www.wdr.de/tv/service/technik/inhalt/20050721/

Photovoltaik (1): Stromerzeugung durch Solarenergie

Von Gunther Weis

Seit die Stromerzeugung durch Solarenergie verstärkt vom Staat gefördert wird, ist ein nie da gewesener Boom in der Solarbranche entstanden. Die Nachfrage nach Solarmodulen, also den Siliziumplatten, über die das Sonnenlicht in Strom gewandelt wird, ist zurzeit so groß, dass die Hersteller mit der Produktion kaum nachkommen.

Der Energieertrag, der sich selbst in unseren Breiten mit der Photovoltaik – so nennt man die Stromerzeugung durch Sonnenenergie – erzeugen lässt, ist beachtlich. Diffuses Licht reicht zur Stromerzeugung aus, auch wenn direktes Sonnenlicht natürlich einen höheren Energieertrag liefert. Die Dachfläche muss nicht direkt nach Süden ausgerichtet sein, es genügt, wenn das Dach in einer Position ausgerichtet ist, die zwischen Westen und Osten liegt, um noch einen rentablen Energieertrag zu erhalten.

Technisches Prinzip

Das Prinzip der Stromerzeugung durch Sonnenenergie ist recht einfach und der Rohstoff Quarzsand nahezu unbegrenzt verfügbar. Der Hauptbestandteil des Sandes, das Silizium, wird bei der Herstellung isoliert, in Blöcke geschmolzen und dann in dünne Scheiben geschnitten. Aus diesen so genannten Wafern werden die hauchdünnen Solarzellen gefertigt. Die Oberflächen der Wafer werden auf einer Seite mit Bor-Atomen und auf der anderen Seite mit Phosphor-Atomen bedampft, um die Siliziumscheiben elektrisch leitfähig zu machen. In den fertigen Zellen sorgen schließlich feine Drähtchen dafür, dass der Stromfluss reguliert werden kann. Danach besitzen die Zellen die Fähigkeit, Lichtenergie in Gleichstrom umzuwandeln.

Eine bestimmte Anzahl von Zellen wird zu Solarmodulen in Reihe zusammengeschaltet. Werden mehrere Module elektrisch miteinander verbunden, spricht man vom Solargenerator, der dann auf dem Dach oder an der Fassade installiert wird. Der beim Betrieb über die Solarmodule erzeugte Gleichstrom wird über den zentralen Wechselrichter in Wechselstrom gewandelt und dann ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Der Betreiber der Solaranlage bezieht über einen zweiten Stromkreis den eigentlichen Verbrauchsstrom.

Leistung

Die Leistung eine Photovoltaikanlage wird in Kilowatt Peak (kWp) angegeben, das ist die Spitzenleistung, die ein Solarmodul im Idealfall erreicht. Die tatsächliche Leistung ist jedoch geringer und neben der Sonneneinstrahlung auch von der Dachausrichtung und Dachneigung abhängig. Diese wirkliche Leistung wird als „Performance Ratio" bezeichnet und liegt normalerweise lediglich bei 75 bis 80 Prozent der Spitzenleistung. Für eine Anlage mit 1 Kilowatt Peak benötigt man in etwa 9 bis 10 Quadratmeter Modulfläche. In unseren Breitengraden lassen sich damit im Jahr in etwa 750 bis 850 Kilowatt Strom pro Stunde erzeugen. Eine übliche 3 Kilowatt Peak große Anlage von 27 bis 30 Quadratmeter erwirtschaftet folglich im Jahr circa 2.250 bis 2.550 Kilowatt pro Stunde.

© WDR Köln 2005

Man unterscheidet im Wesentlichen monokristalline und polykristalline Zellen beziehungsweise Module. Monokristalline Solarzellen haben einen um etwa 2 Prozent höheren Wirkungsgrad, was sich über einen Förderzeitraum von 20 Jahren durchaus rechnet. Polykristalline Zellen sind dafür kostengünstiger in der Herstellung.

Die Komponenten der in Deutschland gefertigten Photovoltaik-Komponenten (Solarmodule und Wechselrichter) sind in den meisten Fällen als sehr hochwertig anzusehen. Die Lebensdauer einer Solaranlage liegt bei etwa 25 bis 30 Jahren.

Förderung
Seit Januar 2004 gilt ein neues Gesetz zur Förderung der Photovoltaik. Das 100.000-Dächer-Programm ist ausgelaufen. Das neue Gesetz ist zunächst noch ein Vorschaltgesetz, das heißt, es gilt so lange bis, wahrscheinlich im Sommer dieses Jahres, das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) verabschiedet wird. Das EEG soll dann generell die Förderung erneuerbarer Energien regeln. Es ist davon auszugehen, dass die derzeitig gültige Förderung für Solarenergie im Wesentlichen beibehalten wird.

Gefördert werden netzgekoppelte Anlagen, das sind Potovoltaik-Anlagen, bei denen das Energieversorgungsunternehmen verpflichtet wird, den solar erzeugten Strom abzunehmen, zu vergüten und ins öffentliche Netz einzuspeisen. Derzeit wird für Anlagen, die auf oder an Gebäuden installiert sind, 57,4 Cent je Kilowattstunde vergütet. Diese Einspeisevergütung muss 20 Jahre lang gewährt werden. Wird die Anlage erst 2005 errichtet, sinkt die Vergütung um 5 Prozent auf 54,6 Cent je Kilowattstunde und gilt ebenfalls 20 Jahre lang. Jedes Jahr später, in dem eine Anlage neu errichtet wird, sinkt die Vergütung jeweils um weitere 5 Prozent.

Da sich bei den jetzigen Kosten eine Anlage bereits nach 12 bis 14 Jahren amortisiert, lässt sich über die Vergütungsdauer von 20 Jahren sogar eine Rendite erwirtschaften. Multipliziert man beispielsweise den Energieertrag der oben angesprochenen 3-Kilowatt-Peak-Anlage von circa 2.250 bis 2.550 Kilowatt pro Stunde mit der jeweiligen Einspeisevergütung, ergibt sich ein beachtlicher Gewinn. Bei den derzeitigen Zinssätzen am Kapitalmarkt ist die Solarenergie also durchaus auch eine Kapitalanlage.

Da die Investition für eine Anlage aber auch recht teuer ist und mit circa 5.000 bis 6.000 Euro je Kilowatt Peak (inklusive Installation) zu Buche schlägt, kann die Anschaffung zusätzlich mit zinsgünstigen Darlehen der KfW Förderbank gefördert werden. Darüber hinaus gibt es Förderprogramme der einzelnen Bundesländer und auch manche Energieunternehmen gewähren einen einmaligen Zuschuss.

Links:

- **www.solarinfo.de**
  Sunbeam GmbH (Solarinfo)
- **www.solarpraxis.de**
  Solarpraxis AG – Fachverlag zu regenerativen Energien
- **www.photon.de**
  Photon – Solarstrom-Magazin online
- **www.kfw-foerderbank.de**
  KfW Förderbank
- **www.solarfoerderung.de**
  Förderberatung der Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft e.V.

Solarthermie (2): Wärmeerzeugung durch Solarenergie

Von Gunther Weis

Auf Grund der ständig steigenden Kosten für Heizöl und Gas überlegt sich so mancher Häuslebauer, ob er nicht in die solare Wärmeerzeugung investiert. Zwar wird die solare Warmwasserbereitung, die so genannte Solarthermie, nicht ganz so stark vom Staat gefördert wie die Photovoltaik (Stromerzeugung), doch wächst das Interesse an dieser faszinierenden, umweltscho-

nenden Energietechnik. Für das Jahr 2004 rechnet die Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft in Deutschland mit circa 1 Million Quadratmeter verbauter Kollektorfläche.

Die Wassererwärmung durch Sonnenenergie hat mittlerweile schon eine recht lange Tradition. Stiftung Warentest hatte erstmals bereits 1987 Sonnenkollektoren auf dem Prüfstand. Die reine Brauchwasser-Erwärmung ist nach wie vor am meisten verbreitet. Doch neben der Warmwasserbereitung gewinnt insbesondere bei besser gedämmten Gebäuden die solare Heizungsunterstützung an Bedeutung.

Technisches Prinzip
In der Solarthermie macht man sich den Treibhauseffekt zunutze, der bei einem Sonnenkollektor ähnlich wie in einem Gewächshaus entsteht, sobald Sonnenstrahlen den mit einer Glasabdeckung versehenen Kollektor erwärmen. Der wichtigste Bestandteil des Kollektors ist der Absorber, der sich bei Lichteinfall erwärmt. Der Absorber ist im Normalfall eine dünne Metallplatte, an die Rohrleitungen angelötet sind. Dieses Prinzip wird bei den Flachkollektoren eingesetzt, die am weitesten verbreitet sind. Innerhalb des Leitungssystems fließt eine spezielle Solarflüssigkeit, welche die Wärme aufnimmt und über einen Kreislauf zu einem Speichertank transportiert.

Neben dem Flachkollektor wurde für unsere Breiten der Vakuumröhren-Kollektor entwickelt. Bei diesem Prinzip entstehen geringere Wärmeverluste, so dass Vakuumröhren-Kollektoren übers Jahr gesehen einen um bis zu 30 Prozent höheren Energieertrag liefern. Im Unterschied zum Flachkollektor befinden sich hier zwei mit Solarflüssigkeit gefüllte Kupferrohre als Absorber im Inneren einer Glasröhre, von denen mehrere nebeneinander liegen. Die Glasröhren sind teilweise auch doppelwandig, halten die Wärme wie bei einer Thermoskanne. Der Solarkreislauf ist auch hier mit dem Speichertank verbunden.

Im Inneren des Speichertanks befindet sich der Wärmetauscher. Er ist meist als Wendel konstruiert. Die Solarflüssigkeit durchfließt diese Wendel und überträgt dabei die erzeugte Wärme an das Wasser des Speichers. Von dort aus wird das warme Wasser im Haus verteilt. Für die Brauchwassererwärmung von vier Personen benötigt man in etwa 300 bis 400 Liter Speicher.

Wenn die Kollektorfläche größer gewählt wird, ist zusätzlich eine solare Heizungsunterstützung möglich. Hierfür muss auch der Speichertank größer sein und zwischen 700 bis 1.000 Liter fassen. Für diese Art der Wassererwärmung benötigt man zwei getrennte Systeme: Ein Kreislauf dient allein der Warmwasserversorgung, ein zweiter Wasserkreislauf ist mit der Zentralheizung gekoppelt. Dafür gibt es unterschiedliche Systeme. Kombispeicher besitzen einen kleineren Innentank, der allein für die Warmwasserbereitung benutzt wird. Pufferspeicher ermöglichen es, die erzeugte Wärme für den Heizungskreislauf über einen längeren Zeitraum zu speichern. So genannte Frischwasserstationen sind am teuersten, sie bereiten jedoch das benötigte Frischwasser besonders hygienisch auf.

Wenn die solar erzeugte Wärme nicht ausreicht, schaltet sich, sowohl bei der reinen Brauchwassererwärmung als auch bei Anlagen mit Heizungsunterstützung, der normale Gas- oder Ölbrenner bei Bedarf automatisch zu. Moderne Brenner arbeiten auch mit Holzpellets. Durch solarthermische Anlagen lässt sich auch sehr gut in der Übergangszeit, im Frühling und Herbst Energie einsparen.

Energieertrag
Mit einer etwa 6 Quadratmeter großen Solarwärmeanlage kann der Warmwasserbedarf eines Vierpersonenhaushalts im Jahresdurchschnitt zu 60 Prozent gedeckt werden. Eine solche Anlage liefert in etwa 2.000 Kilowattstunden Energie pro Jahr. Dies reicht aus, um das Wasser für etwa 400 Wannenvollbäder mit je 150 Litern oder für 2.000 Duschgänge mit je 30 Litern zu erwärmen. Dies spart nach aktuellen Berechnungen der Zeitschrift ÖKO-TEST über 300 Liter Heizöl jährlich.

Alternativ liefert die Sonne circa 50 Prozent des Energiebedarfs für die Wassererwärmung von 5.000 Waschmaschinen- oder 3.300 Spülmaschinengängen, die übrigen 50 Prozent werden elektrisch nachbeheizt. Voraussetzung ist, dass die Geräte an die Warmwasserleitung angeschlossen sind.

Kosten und Förderung
Die Kosten für eine Solarwärmeanlage (6 Quadratmeter Flachkollektoren und ein 300- bis 400-Liter-Tank), die einen Vierpersonenhaushalt mit warmem Wasser versorgt, liegen inklusive Montage bei etwa 4.500 bis 7.000 Euro. Eine doppelt so große Anlage mit circa 12 Quadratmetern Kollektorfläche und einem 800-Liter-Tank ist für die Heizungsunterstützung

© WDR Köln 2005

konzipiert und kostet mit Installation in etwa das Doppelte, also 9.000 bis 15.000 Euro. Vakuumröhren-Kollektoren sind in etwa 30 bis 75 Prozent teurer.

Bei der Installation einer neuen Anlage zahlt der Bund 110 Euro pro Quadratmeter Kollektorfläche. Daneben gewährt die KfW Förderbank zinsverbilligte Darlehen aus den beiden Programmen zur CO_2-Minderung und zur Gebäudesanierung. Darüber hinaus gibt es Förderprogramme der einzelnen Bundesländer und auch manche Energieunternehmen gewähren einen einmaligen Zuschuss.

Links:

- **www.solarwaerme-plus.info**
  Initiative Solarwärme Plus, Informationen für Hausbesitzer und Handwerker
- **www.solarinfo.de**
  Informationen rund um Solarenergie
- **www.solarpraxis.de**
  Fachverlag zu regenerativen Energien
- **www.kfw-foerderbank.de**
  Förderprogramme der KfW-Förderbank

Geothermie – Wärme, die aus der Erde kommt

Von Swen Gummich und Gunther Weis

Das Barrel Öl kostet wieder mehr, die Gaspreise werden angehoben – Schreckensnachrichten für den Bundesbürger. Manch einer hat sich schon gefragt, ob es nicht eine Energieform gibt, die einen vom Weltmarkt unabhängig macht. Dabei aber noch solide und zuverlässig ist.

Gibt es nicht? Doch – ganz einfach unsere Erde. Je tiefer man von der Oberfläche unseres Planeten ins Innere vordringt, desto wärmer wird es. Faustregel: Pro 100 Meter nimmt die Temperatur um 3 Grad Celsius zu. Der größte Teil davon entstammt aus der Entstehungszeit unseres Planeten. Aber auch heute noch entsteht durch den Zerfall radioaktiver Stoffe neue Energie. Und die gute Nachricht: Diese Energie ist nutzbar und dann verfügbar, wenn man sie braucht. Zudem sind Heizanlagen, welche die Erdwärme, das heißt Geothermie, nutzen, kaum anfällig und fast wartungsfrei.

Inzwischen gibt es eine ganze Reihe solcher Nutzungsmöglichkeiten der Erdwärme. Allerdings ist nicht jede für den Einfamilienhaushalt oder die Siedlung geeignet. Je nach geografischer Beschaffenheit ist auch nicht jedes Verfahren gleich ergiebig.

Verfahren für den großen Energiebedarf
Je tiefer man bohrt, desto kostenaufwändiger wird die Energiegewinnung. In Aachen wird zurzeit in einem Pilotprojekt an der Technischen Hochschule die Wärme in 2.500 Metern Tiefe geothermisch genutzt. Kaltes Wasser wird mit einer Tiefenerdwärmesonde auf etwa 80 Grad Celsius erhitzt. Das erwärmte Wasser steigt nach oben und wird über Aggregate und Verteiler zur Heizungsanlage geleitet. Durch die hohen Temperaturen wird eine Wärmepumpe überflüssig.

Eine andere Technik ist das Hot-Dry-Verfahren. Es wird nicht zum Wärmen, sondern sogar zur Stromerzeugung eingesetzt. In Tiefen von 4.000 bis 5.000 Metern kann das Gestein sehr trocken sein. Es ist dann von kleinen Rissen und Klüften durchzogen. Für das Hot-Dry-Rock-Verfahren pumpt man unter großem Druck Wasser in die Risse. Dadurch entsteht ein ganzes Netz von Fließmöglichkeiten – ein natürlicher Wärmetauscher. Hier wird das Wasser auf so hohe Temperaturen erhitzt, dass damit an der Oberfläche eine Turbine betrieben werden kann.
Geothermische Verfahren – geeignet für den kleinen Energiebedarf
Für den kleinen Energiebedarf kommen eigentlich nur die geothermischen Verfahren in Frage. Dabei wird die oberflächennahe Erdwärme genutzt, denn ein Großteil der Kosten beläuft sich in jedem Fall auf die Bohrung. Je tiefer, desto teurer. Die Tiefe hängt letztendlich auch vom Grundwasserspiegel ab. Je höher der Grundwasserspiegel, desto besser die Effizienz, denn das Wasser transportiert immer wieder Wärme nach.

Das Verfahren selbst ist sehr simpel. Wasser oder eine Sole wird durch ein Rohrsystem in die Erde gepumpt Dabei erwärmt sich die Flüssigkeit. Eine Wärmepumpe nimmt die Energie auf und erhöht unter Druck die Temperatur noch weiter. Die dadurch erzeugte Wärme wird über einen zweiten Wärmetauscher an eine „Heizflüssigkeit" abgegeben, die das Haus erwärmt.

Etwa drei Viertel aller Kleinanlagen arbeiten mit Erdwärmsonden. Die Bohrung wird 50 bis 150 Meter tief senkrecht in die Erde getrieben. Wasser oder Sole werden durch ein u-förmiges Rohrleitungssystem gepumpt. Dabei erwärmt sich die Flüssigkeit auf 8 bis 12 Grad Celsius. Am Ende der Heizperiode erreicht man oft nur 0 Grad Celsius, doch selbst diese geringen Temperaturen reichen aus.

Das Rohrleitungssystem der Erdkollektoren wird horizontal in einer Tiefe zwischen 1 und 3 Metern in die Erde verlegt. Dabei ähneln die Erdkollektoren einer Fußbodenheizung. Nur dass hierbei die Wärme dem Boden entzogen wird. Zum Verlegen muss der Boden vollständig abgetragen werden. Man kalkuliert für die Erdkollektoren die anderthalbfache Fläche der zu beheizenden Wohnfläche. Die Effizienz der flach verlegten Kollektoranlagen ist etwas geringer als die der Erdwärmesonden. Grund sind die höheren Temperaturschwankungen in der geringen Tiefe.

Wärmepumpe – das technische Herzstück der geothermischen Anlagen
Über einen Wärmetauscher wird die Wärme der zurückgepumpten Flüssigkeit an ein schnell verdampfendes Kältemittel abgegeben. Durch Verdichtung verdampft das Kältemittel. Dabei erhöht die Wärmepumpe die gewonnene Wärme und überträgt sie über einen zweiten Wärmetauscher an den Warmwasserspeicher einer Heizungsanlage. Dabei kühlt sich das Kältemittel ab und kondensiert. Danach beginnt der Prozess von neuem.

Das Prinzip der elektrischen Wärmepumpe entspricht der Technik, die wir in unseren Kühlschränken verwenden. Im Kühlschrank entzieht die Wärmepumpe den Lebensmitteln die Wärme. Anschließend wird die Wärme nach außen transportiert und über die Gitterstäbe an der Rückwand an die Umwelt abgegeben.

Mit erdgekoppelten Wärmepumpen lässt sich höchstens eine Temperatur von 50 Grad Celsius erzeugen. Im Durchschnitt sind es sogar nur 35 Grad Celsius. Es gilt: Je höher die Temperatur, desto mehr Strom muss für die Wärmepumpe eingesetzt werden. Die Anlage wird weniger rentabel. Solche Temperaturen reichen für normale Heizkörper nicht aus. Deshalb kann man geothermische Verfahren auch nur in Kombination mit Fußbodenheizung oder Wandheizungen nutzen.

Tipps und Tricks für die häusliche Nutzung der Erdwärme
Geothermische Anlagen eignen sich nicht als Nachrüstanlagen. Sie sind nur dann sinnvoll, wenn neu gebaut wird oder ein Altbau saniert werden soll. Für die Effizienz ist dabei entscheidend, mit welcher Temperatur das Wasser an der Wärmepumpe ankommt. Normalerweise sind das 8 bis 12 Grad Celsius. Selbst im Winter, wenn das Solewasser nur mit 0 Grad Celsius aus der Erde gefördert wird, lassen sich noch Temperaturen von 35 Grad Celsius erzeugen.

Allerdings braucht man für Pumpe und Wärmeaustauscher auch Strom. Faustregel: Die gewonnene Wärme besteht zu drei Vierteln aus Erdwärme und zu einem Viertel aus Strom. Selbst im Winter, wenn die Böden stark ausgekühlt sind, arbeiten die Anlagen noch wirtschaftlich. Eine komplette geothermische Anlage kostet zurzeit inklusive der Bohrung etwa 14.000 bis 17.000 Euro. Da die Betriebskosten sehr gering sind, amortisiert sich die Anlage recht schnell. Eine direkte Förderung gibt es nicht. Lediglich die Kreditanstalt für Wiederaufbau gewährt zinsgünstige Kredite für die Anlagen.

In Nordrhein-Westfalen hat der Geologische Dienst NRW eine CD-Rom auf den Markt gebracht, damit jeder das Potenzial für die Erdwärmenutzung auf seinem Grundstück selbst einschätzen kann.

© WDR Köln 2005

Literaturtipps:

- Sven Geitmann
  Erneuerbare Energien und alternative Kraftstoffe
  Mit neuer Energie in die Zukunft
  Hydrogeit, 2005
  ISBN 3937863052
  Preis: 19,90 Euro

  Guter Überblick über erneuerbare Energie: Wind, Sonne, Erdwärme etc.

Die vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im September 2004 herausgegebene **Broschüre „Geothermie – Energie für die Zukunft"** steht als kostenloser Download zur Verfügung unter:

- www.erneuerbare-energien.de/inhalt/6677/4594/

- **CD-Rom „Geothermie – Daten zur Nutzung des oberflächennahen geothermischen Potenzials für die Planung von Erdwärmesondenanlagen", Basisversion**, 2004 herausgegeben vom Geologischen Dienst NRW

Infos unter:

- www.gd.nrw.de/g_cdgt1.htm

Links:

- **www.gd.nrw.de**
  Geologischer Dienst NRW

- **www.geothermie.de**
  Infoseite mehrere Firmen und Geothermische Vereinigung e.V.

Wendelstein 7-X

Von Christian B. Egbers

Experten rechnen damit, dass die Weltbevölkerung in den nächsten 50 Jahren auf über zehn Milliarden Menschen anwachsen wird. Das hat auch eine deutliche Zunahme des Energiebedarfs zur Folge. Der Weltenergiebedarf wird heute zu über 90 Prozent aus fossilen Energiequellen gedeckt. Doch die Vorkommen an Kohle, Gas und Öl sind begrenzt. Es werden also auf absehbare Zeit alternative, sichere und umweltverträgliche Energiequellen benötigt.

Kernfusion
Für den Energiemix der Zukunft könnte diese Energiequelle die Kernfusion sein. Kernfusion ist ein Energie liefernder Prozess, der seit Milliarden Jahren in unserer Sonne und in allen anderen Sternen abläuft. Der Fusionsprozess findet dabei unter extrem hohen Temperaturen statt, bei denen die Materie nicht mehr fest, flüssig oder gasförmig ist, sondern sich im vierten Aggregatzustand, dem so genannten Plasma, befindet. Ein Plasma besteht aus Atomkernen (Ionen) und Elektronen, die nicht mehr aneinander gebunden sind.

Im Innern unserer Sonne laufen die Fusionsreaktionen bei circa 15 Millionen Grad Celsius ab. Um diesen Prozess auf der Erde nachvollziehen zu können, reicht diese Temperatur allerdings nicht aus. Denn auf der Erdoberfläche fehlen die hohe Dichte und die Gravitation, wie sie in der Sonne vorherrschen. Unter den Bedingungen auf der Erde muss das Plasma auf Temperaturen von über 100 Millionen Grad Celsius erhitzt werden. Da kein Behältermaterial diesen hohen Temperaturen widerstehen kann, wird das Plasma bei extrem niedriger Dichte (Hochvakuum = etwa 250.000-mal dünner als die Erdatmosphäre) und durch starke Magnetfelder wie in einem Käfig gefangen gehalten und im Fall des Wendelstein-7-X-Experiments in einem so genannten Stellerator eingeschlossen.

© WDR Köln 2005

Fusionsreaktor
In der ersten Generation zukünftiger Fusionsleistungsreaktoren werden die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium miteinander verschmolzen. Der Kern des schweren Wasserstoffs Deuterium (ein Proton, ein Neutron) fusioniert mit dem Kern des überschweren Wasserstoffs Tritium (ein Proton, zwei Neutronen) zu einem Helium-4-Kern, dem so genannten α-Teilchen (zwei Protonen, zwei Neutronen) unter Aussendung eines Neutrons. Dabei wird circa viermal so viel Energie frei wie bei der Spaltung eines Urankerns. 80 Prozent dieser Energie ist an das Neutron gebunden, das als neutrales Teilchen das Plasma ungehindert verlassen kann. Durch Abbremsung der Neutronen im so genannten Blanket (Mantel) einer Fusionsanlage entsteht Wärme, die über einen konventionellen Dampfkreislauf in Elektrizität umgewandelt wird.

Brennstoff
Der Jahresverbrauch eines Fusionskraftwerks mit einer Leistung von 1.000 Megawatt beträgt circa 100 Kilogramm Deuterium und 150 Kilogramm Tritium. Deuterium ist ungefähr zu 0,015 Prozent im natürlichen Wasser enthalten und somit fast unbegrenzt verfügbar. Tritium wird als Teil des Fusionsprozesses im Reaktorblanket aus Lithium gewonnen. Lithium ist etwa gleichmäßig in der Erdkruste vorhanden, der Gesamtvorrat wird auf 100 Millionen Tonnen geschätzt. Damit reichen die Brennstoffvorräte auf der Erde aus, um den Weltenergiebedarf über mehr als ein Jahrtausend zu decken.

Sicherheit
Der Fusionsreaktor kann anders als bei einem Atomkraftwerk aus physikalischen Gründen nicht aus der Kontrolle geraten. Im Gegenteil: Eine deutliche Abweichung von den Betriebsbedingungen (Hochvakuum, Temperatur, Magnetfelder) des Plasmas führt zum Abriss und damit zur Unterbrechung der Energiefreisetzung. Zudem befindet sich in der Brennkammer eines Fusionskraftwerkes nur so viel Brennstoff, wie zur Aufrechterhaltung der Betriebsbedingungen des Plasmas notwendig ist. In einem Volumen von 1.000 Kubikmetern sind dies circa 1 Gramm Deuterium und Tritium. Bei Ausfall der Kühlung kann es zum Beispiel auch nicht zum Schmelzen von Strukturmaterialien kommen.

Wendelstein 7-X
Seit rund 50 Jahren versuchen Forscher weltweit gemeinsam den komplizierten Prozess der Energiegewinnung in einem Fusionskraftwerk erfolgreich durchzuführen. Das Wendelstein-7-X-Experiment in Greifswald wird ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zum Erfolg sein. Ein Energiegewinn findet dabei allerdings noch nicht statt. Im so genannten Stellarator wollen die Wissenschaftler lediglich ein optimiertes Magnetfeld testen und dabei herausfinden, wie ein Plasma dauerhaft in einem Magnetfeld eingeschlossen und in einem Kraftwerk genutzt werden kann. Aber auch dieses Teilproblem des Prozesses erfordert Technologien, die bis vor kurzem noch gar nicht vorhanden waren. Allein die Planung, bei welcher das theoretische Konzept des optimierten Stellarators entwickelt und in Supercomputern berechnet wurde, hat zehn Jahre gedauert. Der Bau der Gefäße, der supraleitenden Magnetspulen und der Plasmaheizung wird weitere Jahre in Anspruch nehmen, so dass der Start des Experiments frühestens für das Jahr 2010 vorgesehen ist.

Magnetspulen
Für den Aufbau des magnetischen Käfigs wird ein Spulensystem aus insgesamt 70 so genannten Modulfeldspulen benutzt. Für die Stromleiter der Magnete werden statt normal leitendem Kupfer verlustlose, das heißt supraleitende Stromleiter aus Niobtitan benutzt. Da der supraleitende Effekt erst bei einer Temperatur von minus 269 Grad Celsius einsetzt, werden alle Spulen mit flüssigem Helium auf diese Temperatur heruntergekühlt.

Kryostat
Wegen der tiefen Betriebstemperatur werden die Spulen in einem Kryostaten eingebaut, wo sie ein Vakuum von der Umgebung isoliert. Der ringförmige Isolationsraum mit einem Innendurchmesser von rund 12 und einem Außendurchmesser von rund 16 Metern besteht aus dem innen liegenden Plasmagefäß, dem Außengefäß und 299 Stutzen, die den Zugang für Heizung, Kühlung und Messgeräte zum Plasmagefäß ermöglichen. Der Kryostat enthält außerdem die Wärmeisolation, die Stromverbindungen, mechanische Abstützungen sowie die Instrumentierung. In dem evakuierten Raum zwischen Plasma- und Außengefäß ist das gesamte supraleitende Spulensystem untergebracht.

Plasmagefäß und Plasmaform
Die Deggendorfer Werft, die das Plasmagefäß aus Edelstahl herstellt, hat mittlerweile zwei der insgesamt zehn Halbmodule des Plasmagefäßes geliefert. Weitere fünf Halbmodule sind geschweißt, vier davon auf Leckagen getestet. Das Plasmagefäß bildet in seiner Form den gewundenen Plasmaverlauf nach. Wichtige Merkmale sind der wechselnde – dreieckig bis boh-

© WDR Köln 2005

nenförmige – Querschnitt des Plasmas und die liegende Spiralform der magnetischen Achse. Im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald werden zurzeit die Isolationspaneele auf den ersten Teil der Gefäßwände aufgebracht. Sie bestehen aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit integrierten Kupfernetzen.

Heizsysteme
Zur Aufheizung des Plasmas dienen vor allem Mikrowellen. Das Forschungszentrum Karlsruhe entwickelte dazu eine spezielle Mikrowellen-Plasmaheizung mit zuvor nie da gewesenen Leistungsmerkmalen. Für die Plasmaerzeugung und -heizung werden zehn Mikrowellensender – so genannte Gyrotrons – mit insgesamt 10 Megawatt Mikrowellen-Heizleistung bei einer Frequenz von 170 Gigahertz im Dauerbetrieb zur Verfügung gestellt. Zum Vergleich: Um die Energie eines einzigen Gyrotrons zu erzeugen, wären 1.500 Küchenmikrowellen notwendig.

Gyrotrons
Nach intensiven Vorbereitungsarbeiten wurden jetzt die ersten beiden Gyrotrone in Greifswald in Betrieb genommen. Bei Tests werden zunächst nur kurze Pulse erzeugt. Später sollen dann alle zehn Gyrotrons ihre Leistung über einen Zeitraum von jeweils 30 Minuten entfalten. Das Institut verfügt dazu über ein eigenes Umspannwerk, das dem gesamten Gebäudekomplex 50 Megawatt Leistung zur Verfügung stellt, von denen tatsächlich 40 Megawatt während des jeweiligen Experimentzeitraums benötigt werden.

Die armdicken Mikrowellenstrahlen der einzelnen Gyrotrone werden in einer speziellen Strahlengangkammer gebündelt und quasi-optisch in die Experimentierhalle zum Stellarator übertragen. Das geschieht durch speziell gekühlte Umlenkspiegel, die über eine Kupferoberfläche verfügen. In jedem Gyrotron selbst existiert wie im Plasmagefäß ein Vakuum. Um den Mikrowellenstrahl aus dem Gyrotron heraus und in das Plasmagefäß hinein zu lenken, werden auf beiden Seiten extrem widerstandsfähige, runde Fenster benötigt, die einerseits das Vakuum einschließen können müssen, andererseits den hochenergetischen Mikrowellenstrahl möglichst verlustfrei passieren lassen sollten.

Diese Materialanforderungen erfüllt nur Diamant. In zweijähriger Entwicklungszeit gelang es dem weltgrößten Diamantenproduzenten „DeBeers", Scheiben mit einer Wandstärke von 2 Millimetern und einem Durchmesser von 100 Millimetern aus Diamant herzustellen. Die Scheiben haben ein Gewicht von 270 Karat. Für das Heizsystem des Wendelstein-7-X-Experiments werden insgesamt 20 Scheiben benötigt. Wäre „DeBeers" nicht in der Lage gewesen, diese überaus weltvollen Diamantscheiben herzustellen, wären viele Jahre der Planung und Entwicklung umsonst gewesen. Unter Umständen hätte das ein Scheitern des gesamten Wendelstein-7-X-Projektes zur Folge haben können.

Montage
Auch wenn es noch rund sechs Jahre dauern wird, bis das Wendelstein-7-X-Experiment in Greifswald startet, haben die Vorbereitungen für die Endmontage bereits begonnen. Die ersten beiden Sektoren des Plasmagefäßes sind mit Sensoren (Temperatur, Dehnung, Induktionsspulen) bestückt. Erfolgreich abgeschlossen wurden bereits das Training der Arbeitsabfolge bei der Spulenvorbereitung, die Montage und Ausrichtung der Spulen in den Montageständen, die Optimierung der Fädelwege für die Spulen sowie der Probeeinbau der einzelnen Plasmagefäßsektoren in die Montagestände.

Die Aufrüstung des Hallenkrans ist abgeschlossen, die zusätzliche Montagehalle und die 600 Tonnen schwere Hallenschleuse werden noch in diesem Jahr einsatzbereit sein. Die Statik des Maschinenfundaments wurde geprüft. Das Erdungssystem sowie die Kühlwasserversorgung wurden bereits festgelegt. Bei einem so komplexen physikalischen Experiment wie Wendelstein 7-X gibt es naturgemäß eine ganze Reihe weiterer wichtiger Komponenten, auf die wir hier nicht weiter eingehen können. Zum Beispiel allein 60 unterschiedliche Messgeräte, mit denen das Plasma später untersucht werden soll, der Divertor zur Energie- und Teilchenabfuhr sowie die Targetelemente und Kryopumpen.

Ziel
Mit einem Investitionsvolumen von über 300 Millionen Euro gehört Wendelstein 7-X zu den wichtigsten Forschungsvorhaben der Bundesrepublik Deutschland. Obwohl mit diesem Experiment wichtige Schlüsseltechnologien auf dem Weg zur Energiegewinnung durch Kernfusion entwickelt werden, stellt Wendelstein 7-X in Greifswald nur einen kleinen Teil der europäischen und weltweiten Forschungsetappen dar. Mit dem bereits auf dem Reißbrett fertig geplanten Forschungsreaktor ITER wollen Plasmaphysiker danach erstmals einen Reaktor bauen, der alle bisherigen Forschungsbereiche rund um einen Energie gewinnenden Kernfusionsprozess erfolgreich miteinander vereint. Mit einem Reaktor, der zur öffentlichen Stromversorgung beiträgt,

© WDR Köln 2005

rechnen Experten nicht vor dem Jahr 2050.

Wesentliche Daten von Wendelstein 7-X:

Größe des Experimentes	16 Meter Durchmesser, 5 Meter Höhe
Masse	725 Tonnen
Großer Plasmaradius	5,5 Meter (im Mittel)
Kleiner Plasmaradius	0,53 Meter (im Mittel)
Magnetfeld	3 Tesla
Entladungsdauer	Dauerbetrieb 30 Minuten mit Mikrowellenheizung
Plasma	
- Zusammensetzung	Wasserstoff, Deuterium
- Volumen	30 Kubikmeter
- Menge	0,005 bis 0,03 Gramm
Plasmaheizung	15 Megawatt
Plasmatemperatur	bis 100 Millionen Grad
Plasmadichte	bis 3 mal 10^{20} Teilchen/m^3
Energieeinschlusszeit	0,15 Sekunden

Quellen: IPP, IRS, IPE, IHM, IKET, IMF I, IMF II, IMF III, ITP, HVT

Links:

- www.fzk.de
- http://europa.eu.int/comm/research/energy/index_en.htm
- www.babcocknoellnuclear.de
- www.fusion-eur.org
- www.efda.org

Der 8. Sinn: Digicam

Von Marc Müller und Wolfgang Rudolph

Die digitale Fotografie erfreut sich wachsender Beliebtheit. Sie ist einfach, und wenn Bilder nichts geworden sind, können sie sofort wieder gelöscht werden. Die Kameras gibt es für unterschiedliche Bildauflösungen und Zoomfaktoren.

Ein Fotoapparat mit 8 Megapixel Auflösung gehört schon zur Spitzenklasse. Für normale Urlaubsfotos ist diese Auflösung nicht unbedingt nötig. Hier reichen wesentlich preiswertere Modelle vollkommen aus. Schon 4 Megapixel Bildauflösung bringen auf einem 10-mal-13-Ausdruck ausreichend gute Ergebnisse.

Kombigeräte, welche einen digitalen Camcorder und eine Fotofunktion in sich vereinen, sind mittlerweile erschwinglich geworden.

Doch wo sind die wirklichen Unterschiede zwischen den Kameras, was braucht man, und was ist nur Firlefanz?

Eine Auflösung um die 5 Megapixel reicht aus, und ein optischer Zoom von mindestens dreifach ist absolut notwendig. Ein gutes und lichtstarkes Objektiv ist die beste Voraussetzung für scharfe und kontrastreiche Bilder.

Vor dem Kauf sollte man Testaufnahmen machen, um die Qualität der Aufnahmen und die Farbtreue selbst beurteilen zu können.

© WDR Köln 2005

Am wichtigsten ist der optische Zoom. Ein digitaler Zoom ist blanker Unsinn. Hier werden nur die Pixel vergrößert. Das Bild wird, je nach Auflösung, extrem unscharf.

Die notwendigen Speicherkarten sollten für hohe Kapazitäten verfügbar und nicht zu teuer sein. Das Auswechseln der Karte sollte einfach und schnell gehen.

Dem Stromverbrauch sollte man ebenfalls seine Aufmerksamkeit schenken. Manch eine gute Kamera frisst geradezu Batteriezellen oder Akkus.

Am Computer kann man gut erkennen, welcher Qualitätsunterschied zwischen einem Bild mit 1.600 mal 1.200 Pixel und einem mit 640 mal 480 Pixel Auflösung liegt.

Die grobe Struktur ist nicht schön. Und was wir auf dem Bildschirm sehen können, wird auch beim Ausdruck nicht besser. Ein ausgedrucktes Bild kostet schließlich über 1 Euro und sollte für dieses Geld auch von hoher Qualität sein. Zu einer schönen und positiven Erinnerung gehört eben auch ein qualitativ hochwertiges Foto!

Oft sind die Druckergebnisse nur sehr bescheiden. Für eine gute Qualität braucht man gute Tinte, gutes Papier und einen guten Drucker. Oder man geht mit der Speicherkarte zum Fotofachhandel – das ist billiger, denn wenn es da nicht klappt, kann man sich beschweren und braucht nicht zu zahlen.

Noch einmal zum optischen Zoom: 1fach, 12fach oder 25fach optischer Zoom – die Bilder des digitalen Camcorders sehen immer gut aus. Dabei haben sie nur 1.200 mal 800 Pixel Auflösung.

Mit digitalem Zoom bei 2.046 mal 1.536 Bildpunkten, also ohne optischen Zoom, ist das Bild viel schlechter! Bei 1.600 mal 1.200 Pixel ist nichts mehr zu erkennen. Und nur noch unscharfe Farbkleckse sind bei 640 mal 480 Pixel Auflösung zu sehen.

Die einzige Konsequenz daraus: den digitalen Zoom immer ausschalten und Bilder in höchster Auflösung machen. Vergrößern kann man die Bilder später immer noch. Entweder am Computer oder beim Händler.

Wird eine Kamera mit einem hohen digitalen Zoom beworben – Achtung! Wahrscheinlich hat sie sonst nichts Nennenswertes zu bieten, und der Hersteller will an der teuren Optik sparen – die Elektronik ist sowieso billig!

© WDR Köln 2005