

Nutzung regenerativer Energiequellen in Deutschland

Eine Daten- und Faktensammlung, herausgegeben vom BMFT

Der Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) hat „Daten und Fakten“ über die derzeit mögliche Anwendung von Systemen zur Nutzung regenerativer Energiequellen zusammentragen lassen. Auftragnehmer des entsprechenden „Kurzgutachtens“ war die Forschungsstelle für Energiewirtschaft der Gesellschaft für praktische Energiekunde e.V., die von Prof. Dr.-Ing. Helmut Schaeffer geleitet wird. In einer für die Presse vom BMFT aufbereiteten Zusammenfassung werden Kilowattstundenkosten, die diese Studie ergab, gegenübergestellt und wie folgt kurz erläutert:

Die Kosten von Nutzungssystemen erneuerbarer Energiequellen sind, von Ausnahmen abgesehen, fast ausschließlich Fixkosten, insbesondere Kapitalkosten. Dadurch ergibt sich eine sehr starke Kostendegression bei steigender Ausnutzungsdauer. Diese Ausnutzungsdauer ist aber anders als im Falle der konventionellen Techniken durch die natürlichen Gegebenheiten begrenzt – anders als z.B. bei einem Kohlekraftwerk, wo die Benutzungsdauer sehr stark variiert werden kann. Die Ausnutzungsdauer von Kohle- und Kernkraftwerken ist durch die Nachfrage vorgegeben, die für die Wind- und Solarzellenanlagen durch die Windhäufigkeit bzw. Sonneneinstrahlung. Die Kosten der Stromerzeugung aus den verschiedenen Anlagen werden wie folgt geschätzt:

Strom aus	Nettoleistung	Ausnutzungsdauer in Std.	Investitionskosten in DM/kW	Kosten in DM/kWh
Kohlekraftwerk	420 MW	5000	2500	0,195
Kernkraftwerk	1285 MW	7000	5000	0,135
Windkraftanlagen	55 kW	2000	3800	0,27
Photovoltaikanlagen	300 kW	900	30000	3,57

Einen ähnlichen Vergleich errechnet das Gutachten für

- große Raumheizungs-systeme (63 kW)
 - monovalente Elektro-wärmepumpe 0,26 DM/kWh
 - Ölkessel 0,19 DM/kWh
 - Hackschnitzelfeuerung 0,22 DM/kWh
- Solare Warmwasserbereitung
 - Schwimmbad (Absorber, 20 m²) 0,10 DM/kWh
 - Brauchwasser (Flachkollektor, 8 m²) 0,98 DM/kWh
 - Prozeßwärme (Vakuumschmelzkoll., 200 m²) 1,04 DM/kWh
- Biomasse-Brennstoffe
 - Strohbrickettierung 0,03 DM/kWh
 - Vergasung 0,13 DM/kWh
 - Biogaserzeugung 0,15 DM/kWh

Alle Angaben, das wird betont, gelten unter den spezifischen Bedingungen des Gutachtens: Heute verfügbarer Stand mit Anwendung in der Bundesrepublik Deutschland.

Das Gutachten, das in Kürze im VDI-Verlag, Düsseldorf, erscheint, befaßt sich recht ausführlich mit „Gütekriterien der Energiewandlungssysteme“. Diesem Kapitel entstammen die folgenden Feststellungen zu den einzelnen regenerativen Energiequellen:

Windenergie

Spricht man von der Nutzung der Windenergie, so wird darunter vorrangig die Erzeugung elektrischer Energie aus der Strömungsenergie des Windes verstanden. Die physikalischen Grundlagen basieren dabei auf zwei verschiedenen Prinzipien, nämlich dem Widerstands- und dem Auftriebsprinzip.

Obwohl Windkraftanlagen nach dem Widerstandsprinzip fertigungstechnisch wesentlich einfacher hergestellt werden können, kommt dieses Prinzip aufgrund der schlechten Leistungscharakteristik und vor allem wegen des schlechten Nutzungsgrades (in der Theorie lassen sich maximal 20 % der Windenergie nutzen) nur für Kleinanlagen bis zu mehreren kW Nennleistung in Betracht.

Windkraftanlagen nach dem Auftriebsprinzip, deren Rotorflügel ähnlich wie die Tragflächen der Flugzeuge gestaltet sind, können dagegen bis zu 59 % der Windenergie in ein nutzbares Drehmoment umsetzen. Dies erklärt neben der besseren Leistungscharakteristik, daß zur Stromerzeugung nur Anlagen in Frage kommen, die den Auftriebseffekt nutzen.

In der technischen Realisierung ergeben sich jedoch erhebliche Unterschiede. So werden die Rotoren überwiegend aus ein bis drei Blättern gebaut. Darüber hinaus kann die Drehachse horizontal als auch vertikal (Darrieus-Rotor) angeordnet werden. Obwohl der Darrieus-Rotor durch seine Windrichtungs-Unabhängigkeit besticht, hat diese Variante unter anderem wegen des unbefriedigenden Anlaufverhaltens bisher keine Verbreitung gefunden.

Je nach Leistungsgröße und Einsatzzweck kommen für die elektrische Energiewandlung zwei unterschiedliche Generatorkonzepte zum Einsatz. Der preisgünstige Asynchrongenerator wird bevorzugt in kleineren und mittleren Anlagen im Netzparallelbetrieb eingesetzt. Soll die Windkraftanlage darüber hinaus auch im Inselbetrieb eingesetzt werden, so wird wie bei Großanlagen meist dem Synchrongenerator und einer Energieaufbereitungselektronik der Vorzug gegeben.

Wie stark die Leistungsdichte des Windes mit der Windgeschwindigkeit variiert, ist dem Diagramm (hier Bild 2) zu entnehmen. Die daraus begründete Forderung nach einer hohen Windgeschwindigkeit läßt sich durch die Wahl eines windgünstigen Standorts erfüllen. In der Bundesrepublik bieten sich dafür vorwiegend an den norddeutschen Küstengebieten Flächen von theoretisch 4000 km² mit mittlerer Windgeschwindigkeit von mindestens 5 m/s bei 10 m über Grund an. Darüber hinaus muß für die erzeugbare elektrische Energie die Windgeschwindigkeitsverteilung berücksichtigt werden. Selbst für den im gezeigten Bild zugrunde gelegten windgünstigen Standort an der Nordseeküste mit 45 m Höhe über Grund zeigt die Häufigkeitsverteilung, daß es zur Gewährleistung einer akzeptablen Ausnutzungsdauer unumgänglich ist, ein möglichst breites Spektrum der Windge-

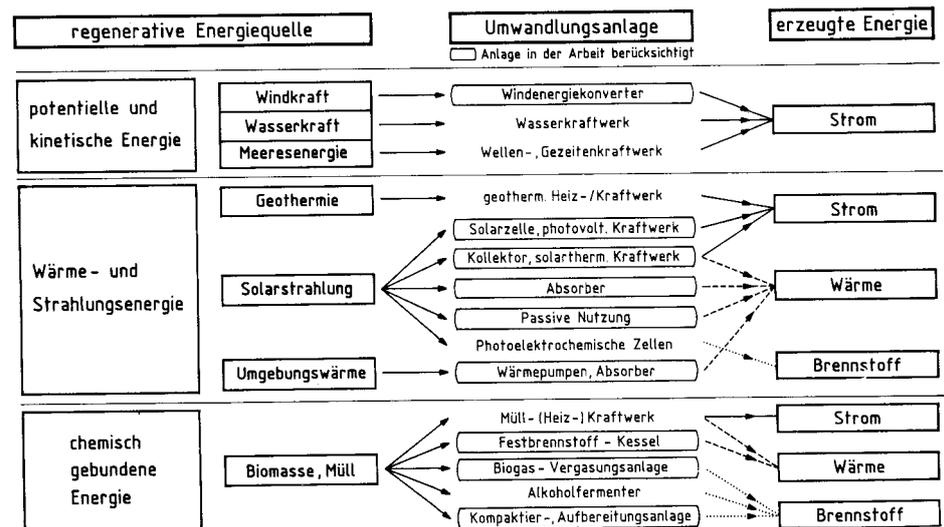


Bild 1. Einteilung der Umwandlungssysteme regenerativer Energie

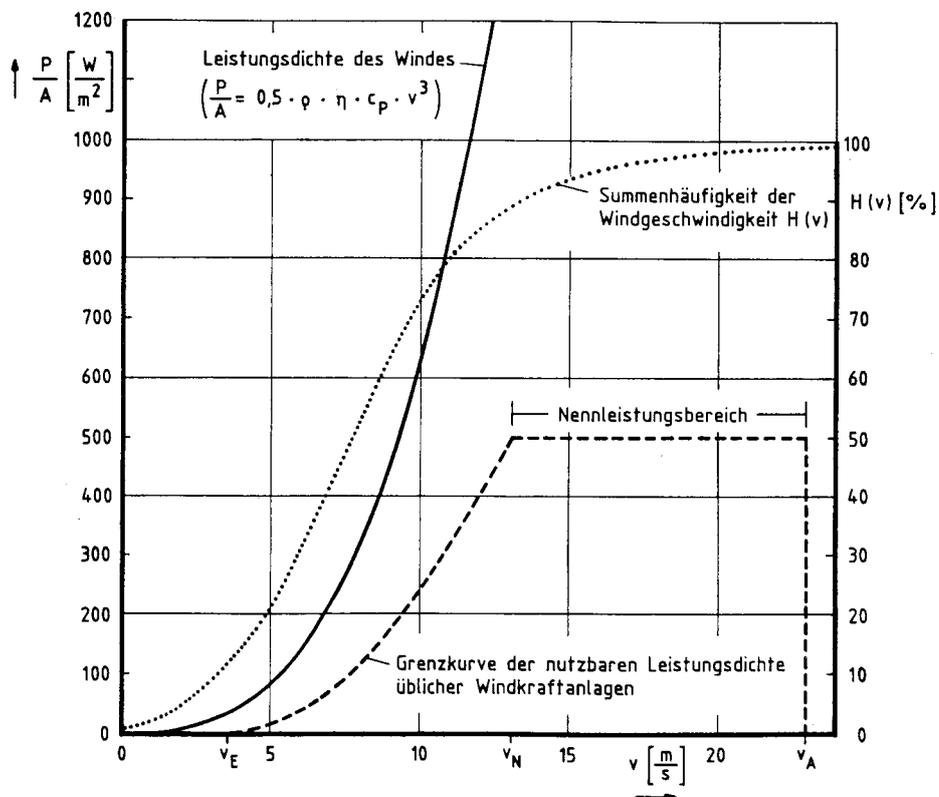


Bild 2. Charakteristische Kenngrößen zur Nutzung der Windenergie

schwindigkeiten zu nutzen. Damit ergeben sich für den praktischen Einsatz Leistungskurven, die sich, bezogen auf 1 m² Rotorfläche, innerhalb der in Bild 2 markierten Grenzkurve bewegen. Dabei sind vier Bereiche zu unterscheiden; die unteren Windgeschwindigkeitsangaben beziehen sich mehr auf Kleinanlagen, während die oberen Werte vorwiegend auf Großanlagen zutreffend sind. Davon abgesehen gibt es durchaus einzelne Anlagen, die aufgrund der örtlichen Verhältnisse anders ausgelegt werden.

Im einzelnen ist zu dem Diagramm festzustellen:

- Unterhalb der Einschaltgeschwindigkeit ($v_E = 4 \dots 6$ m/s) gibt die Anlage keine Leistung ab.
- Im Teillastbetrieb, der unten durch v_E begrenzt wird und bis zur Nennwindgeschwindigkeit ($v_N = 10 \dots 13$ m/s) reicht, entzieht der Rotor dem Wind die maximale Leistung.
- Der Nennleistungsbereich, der durch die Abschaltgeschwindigkeit ($v_A = 20 \dots 25$ m/s) nach oben und v_N nach unten begrenzt ist, zeichnet sich durch konstante Leistungsabgabe bei reduziertem Wirkungsgrad aus. In diesem Bereich, der für eine Windkraftanlage mehrere 100 Stunden im Jahr vorkommt, liegen die nutzbaren anlagen-spezifischen Leistungsdichten zwischen 100 und 500 W/m².
- Der letzte, im Bild 2 nicht mehr enthaltene Bereich erstreckt sich von v_A bis auf Windgeschwindigkeiten von 50 bis 60 m/s. Diese obere Windgeschwindigkeit stellt die Überlebenswindgeschwindigkeit dar, wobei die Blätter üblicherweise in Fahnenstellung gehen und der Rotor festgebremst wird.

Wegen des nichtlinearen Wirkungsgradverlaufes, der sich aus dem Verhältnis der gestrichelten Linie zum durchgezogenen Kurvenzug ergibt, muß die Rotorauslegung, die Turmhöhe und die installierte Generatorleistung der ermittelten Windgeschwindigkeitsverteilung am geplanten Standort angepaßt werden. Für Kleinanlagen ergeben sich Wirkungsgrade im Nennpunkt von maximal 35 %, während bei Großanlagen bis zu 40 % gemessen werden.

Die Kosten für einzelne Windkraftanlagen belaufen sich für den Leistungsbereich um 50 kW – nur dieser Leistungstyp wird bisher in größeren Stückzahlen gefertigt – je nach Ausstattung auf etwa 2500 DM/kW (inkl. Mehrwertsteuer). Rechnet man die Kosten für Fundament, Anlagenaufstellung sowie die elektrischen Anschlußkosten an das Verbundnetz hinzu, so ergeben sich für diese Anlagengröße Gesamtkosten von rund 3800 DM/kW. Hierbei werden normale topographische Verhältnisse und eine mit kurzen Leitungen zu realisierende Netzverbindung unterstellt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich vor allem die infrastrukturellen Kosten mit zunehmender Anlagenzahl (Windpark) sicherlich noch erheblich reduzieren lassen.

Für die bisher nur in geringen Stückzahlen gefertigten Großanlagen ergeben sich bis heute allein für die Anlagen deutlich höhere Kosten von mindestens 5000 DM/kW. Ebenso steigen für Kleinanlagen (10 bis 20 kW Nennleistung) die spezifischen Investitionskosten merklich an. Dabei ist zu beachten, daß aufgrund der geringeren Ausnutzungsdauer gegenüber konventionellen Kraftwerken die Werte der spezifischen Investitionskosten nicht direkt vergleichbar sind.

Photovoltaik-Systeme

Bei der photovoltaischen Energieerzeugung, also der direkten Umwandlung der Sonnenenergie in elektrische Energie, fällt der Solarzelle die zentrale Bedeutung zu. Solarzellen sind bis zu einige hundert Quadratzentimeter große Scheiben, deren aktive Halbleiterschicht je nach Basismaterial zwischen 1 und 500 µm dick ist. Allein diese Bandbreite deutet schon die vielfältigen technischen Ausführungen von Solarzellen an.

Jede unbeleuchtete Solarzelle verhält sich wie eine Diode. Sobald sie beleuchtet wird, werden jedoch im Halbleiter Photonen absorbiert und damit Ladungsträger generiert, die einen Stromfluß zu Folge haben. Welcher Anteil des Sonnenspektrums sich dabei überhaupt in elektrische Energie umwandeln läßt, hängt in erster Linie von der Energielücke des verwendeten Halbleiters bzw. der Kombination der verschiedenen Halbleiter ab. Für grundsätzlich geeignete Halbleiter ergeben sich die in Bild 3 skizzierten maximalen Wirkungsgrade, wobei die verschiedenen Grundmaterialien eine mehr oder weniger ausgeprägte Abhängigkeit von der Zelltemperatur T aufweisen. Nicht berücksichtigt sind die erst in der Entwicklung befindlichen Tandemzellen, deren theoretische

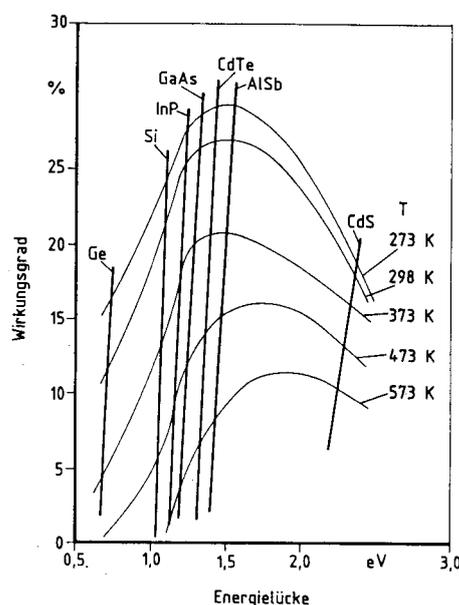


Bild 3. Theoretischer Wirkungsgrad von Solarzellen bei unterschiedlichen Basismaterialien und verschiedenen Betriebstemperaturen

tische Wirkungsgrade noch höher liegen.

Bei Solarzellen kann über weite Strahlungsbereiche mit konstantem Wirkungsgrad gerechnet werden, sofern deren Arbeitstemperatur und das Spektrum des eingestrahlten Lichts sich nicht wesentlich verändern.

Für einen auch in der Praxis hohen Wirkungsgrad muß die Schichtdicke des Halbleitermaterials entsprechend dem Absorptionsverhalten gewählt werden. Daraus ergeben sich für eine großtechnische Nutzung noch erhebliche Probleme. Schließlich verursacht allein

der Energieinhalt des erforderlichen Halbleitermaterials bei den bisher durch die Raumfahrt am weitesten entwickelten monokristallinen Siliziumzellen – hier standen weniger die Kosten als ein hoher Wirkungsgrad im Vordergrund – so hohe Kosten, daß selbst die modernsten Produktionsverfahren keine Aussicht zu einer drastischen Kostenreduzierung erwarten lassen. So sucht man weltweit nach Halbleitermaterialien, die folgende Forderungen erfüllen sollen:

- hohe Verfügbarkeit des Rohmaterials,
- geringer kumulierter Energieaufwand der fertigen Solarzelle,
- einfache, kostengünstige und leistungsfähige Produktionsverfahren für hohe Herstellungskapazitäten,
- hohe Lebensdauer ohne gravierende Wirkungsgradeinbuße,
- leichte Kontaktierbarkeit zur Verschaltung der einzelnen Zellen zu Modulen,
- hoher Wirkungsgrad, um den Flächenbedarf und den Aufwand an Tragkonstruktionen zu begrenzen.

Ansätze dazu bieten die multikristallinen Si-Zellen bzw. Solarzellen aus amorphem Silizium und verschiedenste Verbindungshalbleiter. In der Praxis lassen sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt für die verschiedenen Siliziumzellen – nur diese sind bis heute in größeren Stückzahlen gefertigt worden – folgende Wirkungsgrade angeben:

- monokristalline Si-Zellen: 12 bis 14 %
 - multikristalline Si-Zellen: 9 bis 11 %
 - amorphe Si-Zellen: 4 bis 6 %
- Diese Angaben beziehen sich auf 25 °C Zellentemperatur und ein definiertes Sonnenspektrum (Air Mass 1,5).

Um zu größeren Leistungseinheiten zu kommen, werden die einzelnen Solarzellen jeweils zu Modulen mit einer Gesamtleistung von bis zu 100 W und mehr zusammengeschaltet. Diese Mo-

dule werden wiederum zu ganzen Panels mit Ausgangsleistungen von mehreren Kilowatt zusammengebaut. Die Nennleistung ist dabei auf eine Einstrahlung von 1000 W/m² Solarzellenfläche bei einer Temperatur von 25 °C bezogen (peak load). Die gewonnene Energie wird aufbereitet und über eine aufwendige Leistungselektronik in einen dem Verbundnetz angepaßten Drehstrom wechselgerichtet. Aufgrund dieser unumgänglichen Schaltungsmaßnahmen läßt sich die von den Solarmodulen gelieferte Energie nur zu 85 bis 90 % nutzen.

Für die Festlegung der Aufstellungsart und -richtung photovoltaischer Panels ist eine genaue Kenntnis der Einstrahlungsdaten nötig, um zu prüfen, ob der Mehraufwand für eine ein- oder zweiachsige Nachführung sinnvoll ist. In Deutschland wird sich eine Nachführung auch im Hinblick auf den Wartungsaufwand nur in den wenigsten Fällen rechtfertigen lassen. Hier wird vielmehr eine starre Südorientierung oder allenfalls eine einachsige Nachführung zu günstigeren Energieerzeugungskosten führen.

Für ein komplettes Modul ergeben sich spezifische Investitionskosten, deren Untergrenze bei 15 000 DM/kW Spitzenleistung liegen. Hier müssen noch die Kosten für Gestelle, Verkabelung, Regel- und Schalteinrichtungen, Leistungselektronik und Installation hinzugerechnet werden. Da es mangels erstellter Anlagen noch keine allgemeingültigen Zahlen gibt, können hierfür Kosten von ebenfalls rund 15 000 DM/kW_p als Anhaltswert dienen. Damit ergeben sich Gesamtkosten, deren untere Grenze bei etwa 30 000 DM/kW_p liegt.

Mit einem Modul, dessen Spitzenleistung bei 1 kW liegt, lassen sich auf die Bundesrepublik Deutschland bezogen je nach Standort und Nachführsystem pro Jahr maximal 1000 bis 1300 kWh elektrische Energie erzeugen.

nach Anwendungsfall muß der geeignete Kollektortyp nach dem Gesichtspunkt der größtmöglichen Wirtschaftlichkeit bestimmt werden. Dies soll an drei Beispielen der möglichen Hauptanwendungsgebiete in der Bundesrepublik verdeutlicht werden.

Sommerfreibäder mit einer Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Außenluft von max. 10 bis 15 °C werden nur in der Zeit des größten Strahlungsangebots betrieben. Einfachste Kollektoren oder Absorber und sogar Kunststoffschläuche bieten für diesen Zweck bereits zufriedenstellende Wirtschaftlichkeit, insbesondere in Verbindung mit passiven Energiesparmaßnahmen wie der Verwendung von dunklen Beckenfliesen und vor allem der Nachtabdeckung des Beckens. Bei dieser Anwendung kann auch auf die kostenintensive Wärmespeicherung verzichtet werden, da das Beckenwasser selbst diese Funktion übernimmt.

Für die Bereitung von warmem Brauchwasser kann man aus Bild 4b ersehen, daß bei hohen Einstrahlungen und Temperaturdifferenzen von 20 bis 30 K, wie sie im Sommerhalbjahr häufig auftreten, die Unterschiede zwischen den in Frage kommenden Flachkollektoren in diesem Temperaturbereich klein sind. Die geringen Bestrahlungsstärken während des restlichen Jahres werden effizienter von selektiven und besser wärmedämmten Kollektoren genutzt. Eine bestimmte jährliche Wärmemenge kann entweder mit einem hochwertigen, teuren Kollektor mit kleiner Fläche oder einem billigen Einfachkollektor entsprechend größerer Fläche erzeugt werden. Die Leistungsfähigkeit des einzelnen Kollektors ist deshalb kein ausschlaggebendes Qualitätsmerkmal für eine solare Brauchwasseranlage; vielmehr kommt es auf die richtige Auslegung aller beteiligten Komponenten und ihre gegenseitige Abstimmung an. Da im Sommerhalbjahr von April bis September rund 75 % der jährlichen Solarenergie eingestrahlt werden, werden solare Brauchwasseranlagen am günstigsten auf einen hohen Deckungsbeitrag in diesem Zeitraum ausgelegt. Die ganzjährige Warmwasserbereitung mit hoher Deckung auch im Winter führt zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung aufgrund eines über das Jahr zu geringen Nutzungsgrades. Einige wenige bisher durchgeführte Langzeituntersuchungen zeigen, daß die optimale Auslegung und Regelung von Gesamtanlagen noch ein größeres Entwicklungspotential beinhaltet.

Als letztes soll die Erzeugung industrieller Prozesswärme genannt werden. Es bestehen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, wie die Pasteurisierung von Getränken und allgemeine Reinigungsaufgaben. Die dafür erforderlichen Temperaturen von 60 bis 100 °C erfordern hocheffiziente Vakuum-Röhrenkollektoren. Für eine Beurteilung und Fortentwicklung sind noch langfristige Betriebsuntersuchungen notwendig.

Erschwert werden die meisten Anwendungen der Solarthermik durch das

Sollarkollektoren und -absorber

Die direkte thermische Erschließung der Strahlungsenergie realisieren Sollarkollektoren und Solarabsorber; letztere unterscheiden sich durch die fehlende transparente Abdeckung von den Kollektoren.

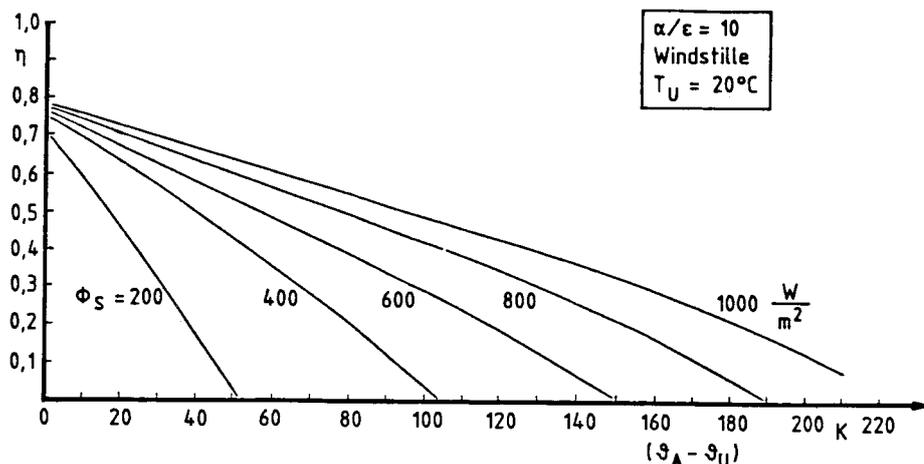
Durch den hohen diffusen Strahlungsanteil kommen in der Bundesrepublik nur nicht-konzentrierende Kollektoren in Frage. Daraus ergibt sich eine Beschränkung auf die Niedertemperatur-Wärmeerzeugung bis etwa 120 °C (Vakuum-Röhrenkollektoren). Die Entwicklung konzentrierender Systeme ist für den Einsatz in Ländern mit hoher Direkt einstrahlung durchaus interessant.

In diesem Bereich dominieren in der kommerziellen Solartechnik die Flachkollektoren. Diese Kollektorbauweise wandelt die überwiegend kurzwellige Solarstrahlung an einem schwarzen Absorber, der von einem Wärmeträger durchströmt wird und häufig selektive Eigenschaften besitzt, in Wärme um. Beim aufwendigsten Kollektortyp, dem

Vakuum-Röhrenkollektor, ist der Raum zwischen Absorber und Abdeckung evakuiert. Dargestellt wird die Effizienz eines Kollektors in den sog. Kollektor-Kennlinien. Es ergibt sich eine Kennlinien-Schar (Bild 4a), da der Wirkungsgrad sowohl von der Einstrahlung als auch von der Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Umgebung abhängt. Deutlich wird daraus vor allem der Einfluß des geforderten Temperaturniveaus auf den Wirkungsgrad. Vergleicht man bei konstanter Einstrahlung, im Beispiel 800 W/m², die Kennlinien verschiedener Kollektorbauarten, gelangt man zur Darstellung in Bild 4b.

Während bei hoher Einstrahlung und niedrigen geforderten Heizmitteltemperaturen Kollektoren mit Einfachverglasung ohne selektive Beschichtungen ebenso wie Absorber höhere Leistungen erbringen als hocheffiziente Flachkollektoren, kehrt sich dieses Verhalten mit steigender Temperaturdifferenz bei gleichbleibender Einstrahlung um. Je

a) selektiver Kollektor mit Einfachverglasung



b) Kollektoren verschiedener Bauarten bei gleicher Bestrahlungsstärke

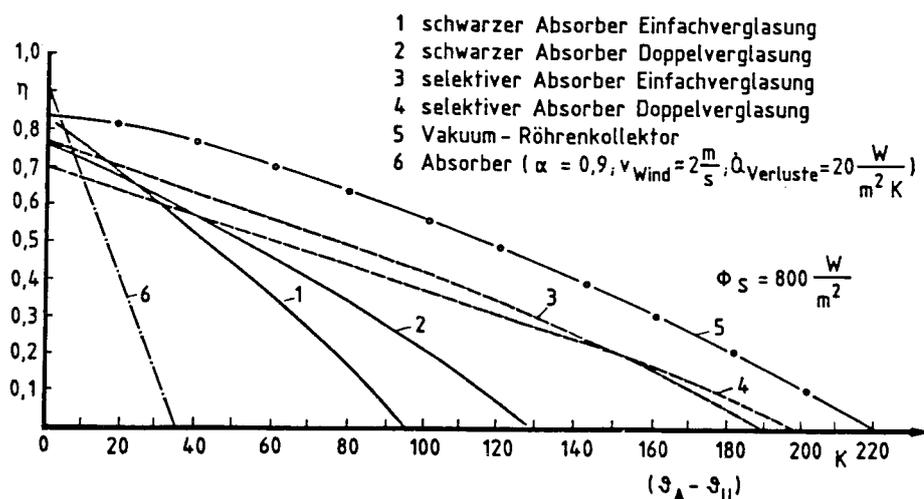


Bild 4. Kollektorkennlinien (nach K. Abel und H. Engelhorn, „Wärme und Strom aus Sonnenenergie, 6. Auflage, 1983; Hrsg.: Solar-Energie-Technik GmbH, Altlußheim)

Fehlen einer Langzeit-Speichermöglichkeit. Schwankungen des Strahlungsangebots sind über Tage, z.B. Wochenenden, ausgleichbar, doch liegen die spezifischen Speicherkosten bei bis zu 7000 bis 8000 DM/m³. Für einen breiteren Einsatz der Solarthermik ist die Weiterentwicklung der Speichertechnologie von besonderer Bedeutung. Sowohl die Brauchwarmwasser- als auch die Prozeßwärmegewinnung müssen, auf Deutschland bezogen, zusammen mit herkömmlichen Wärmeerzeugern als bivalente Systeme betrieben werden, da ein Deckungsanteil der Solarenergie von 100 % zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung in den Sommermonaten führen würde.

Zur Abschätzung der Jahresenergieerzeugung geht man von der durchschnittlich eingestrahlteten Energie auf eine Horizontalfläche von 1000 bis 1200 kWh/m² und Jahr aus. Unter heute erreichbaren Anlagenwirkungsgraden ergeben sich als nutzbare Wärme: bei Absorbern zur Beckenwasser-Erwärmung 300 bis 400 kWh/m²a, bei Kollektoren zur Brauchwassererwärmung (selektiv, Einfachverglasung) 250 bis 350 kWh/m²a und bei Vakuum-Röhrenkollektoren bis 500 kWh/m²a.

Wärmepumpen

Die Wärmepumpe hat in der Bundesrepublik unter allen behandelten Nutzungssystemen regenerativer Energiequellen die weiteste Verbreitung. Die Heizleistung, welche von Kompressionswärmepumpen bei konstanter Verdichterdrehzahl abgegeben wird, ist nicht konstant. Sie hängt vielmehr von den Niveaus der unteren und der oberen Temperatur des Kreisprozesses ab. Für Wasser als Wärmequelle mit geringen Temperaturschwankungen ist die Abhängigkeit wesentlich weniger ausgeprägt als für die Wärmequelle Luft.

Die Heizleistung einer Gasmotor-Wärmepumpe variiert weniger als bei Antrieb mit Elektromotor, da wegen der nutzbaren Abwärme des Verbrennungsmotors der Anteil der Umweltwärme an der Gesamtwärmeabgabe wesentlich geringer ist und sich daher Änderungen der Betriebsbedingungen weniger auswirken. Während bei Kompressionswärmepumpen die Leistung nur durch den getakteten Ein-Aus-Betrieb geregelt werden kann, bietet die Absorptionswärmepumpe die Möglichkeit einer kontinuierlichen Leistungsreduzierung bis auf ein Viertel des Maxi-

malwertes durch Vermindern der Wärmezufuhr im Austreiber.

Die wichtigste Kennzahl einer Wärmepumpe ist der Quotient von erzeugter Heizwärme zu aufgewendeter Endenergie (Strom, Gas etc.) für Verdichterantrieb (bei Kompressionswärmepumpen) bzw. für Austreiberwärme (bei Absorptionswärmepumpen). Dieser Quotient wird bei elektromotorisch angetriebenen Wärmepumpen (EWP) als „Leistungszahl“ bzw. „Arbeitszahl“ bezeichnet, je nach dem, ob die Daten eines stationären Betriebszustandes oder eines Betriebszeitraumes (z.B. 1 Jahr) betrachtet werden. Bei gasmotorgetriebenen Wärmepumpen (GWP) und bei Absorptionswärmepumpen (AWP) spricht man von der „Heizzahl“.

In Bild 5 sind die Leistungs- bzw. Heizzahlen von Wärmepumpen über der Außenlufttemperatur dargestellt. Einen wesentlichen Einfluß übt wiederum die Art der Wärmequelle aus. Zudem ist die Vorlauftemperatur des Heizsystems in Abhängigkeit von der Außentemperatur in der Regel automatisch gesteuert.

Die erreichbare Vorlauftemperatur ist bei EWP auf etwa 55 bis 60 °C, bei GWP auf etwa 65 bis 75 °C beschränkt. Eine „monovalente“ Wärmeversorgung ausschließlich über die Wärmepumpe ist nur möglich, wenn das Heizsystem auch an besonders kalten Tagen mit diesen Vorlauftemperaturen auskommt und der Wärmequelle ausreichende Leistung entzogen werden kann. Ist dies nicht der Fall, ist eine „bivalente“ Versorgung im Zusammenwirken mit einem brennstoffgefeuerten Wärmeerzeuger erforderlich. Hierbei sind zwei Betriebsweisen möglich:

– Bivalent-alternativer Betrieb: Unterhalb einer bestimmten Temperatur der Wärmequelle (Umschalttemp.) ist nur der Wärmeerzeuger in Betrieb, oberhalb nur die Wärmepumpe.

– Bivalent-paralleler Betrieb: Unterschreitet die Außenlufttemperatur den Umschalttemp., so geht auch hier der Wärmeerzeuger in Betrieb. Jedoch wird die Wärmepumpe nicht gleichzeitig ausgeschaltet, sondern sie trägt auch unterhalb der Umschalttemp. im Rahmen ihrer Möglichkeiten zur Wärmeversorgung bei. Dadurch ist der jährliche Deckungsbeitrag der Wärmepumpe bei bivalent-paralleler Betriebsweise höher als bei bivalent-alternativer.

Der Energieverbrauch einer Wärmepumpe wird durch die jährliche Arbeits- bzw. Heizzahl charakterisiert, die in der Tafel für die verschiedenen Wärmepumpen angegeben ist. Die besonders großen Spannweiten für EWP mit der Wärmequelle Grundwasser bzw. Luft bei bivalenter Betriebsweise ergeben sich als Unterschied bei der Verwendung von Niedertemperatur-Heizsystemen bzw. herkömmlichen Radiatorheizungen mit Auslegungstemperaturen von 90/70 °C.

Bei allen Wärmepumpenanlagen entsteht ein erheblicher Zusatzverbrauch an elektrischer Energie für Ventilatoren, Pumpen und Steuerungseinrichtungen. Anhaltswerte hierfür sind in der rechts wiedergegebenen Tafel als prozentualer Zuschlag auf den Jahresenergieverbrauch des Wärmepumpenaggregats aufgeführt. Die angegebenen Daten gelten für Anlagen, bei denen die Wärmepumpe in Abstimmung mit allen anderen Systemkomponenten richtig ausgelegt ist. Darüber hinaus wird ein Regelungskonzept vorausgesetzt, das für das Gesamtsystem einen einwandfreien Betrieb unter allen vorkommenden Bedingungen gewährleistet.

Passive Sonnenenergienutzung

Unter passiver Solarenergienutzung bei Gebäuden wird der gezielte Einbezug von Wärmegewinnen aus Sonneneinstrahlung über die Gebäudehülle in die Energiebilanz eines Gebäudes zur Heizwärmeversorgung verstanden. Eine optimierte Solarenergienutzung in Verbindung mit niedrigem Heizwärmebedarf muß integriert erfolgen, d.h. es müssen alle relevanten technischen und nichttechnischen Faktoren einbezogen werden. Hierzu zählen:

- das Gebäude mit seinen energetischen Eigenschaften und bauspezifischen Kenndaten, wie das Wärmedurchlaßverhalten der Gebäudehülle und das Speicherverhalten des Gebäudes, die Gebäudegröße, die Geschoßzahl, die Fassadengliederung und der Fensteranteil an der Fassadenfläche;
- die Anlage zur Wärmeversorgung, die Dimensionierung, die Versorgungstechnik und das Versorgungssystem, das Regelungskonzept und die Betriebsweise,
- der Mensch mit seinen Nutzungsansprüchen an die Wärmeversorgung hinsichtlich Temperaturniveau und Zeitgang im Wohn- und Schlafbereich sowie an die lufthygienische Qualität.

Generell führt zunehmender Wärmeschutz von Gebäuden zu

- einer Verkürzung der Heizperiode, da das „Wärmegleichgewicht“ des Gebäudes sich in Richtung niedriger Außentemperatur verschiebt,
- einer Verringerung der Wärmeverluste einzelner Bauteile,
- einem steigenden Anteil der kurzwelligen Zustrahlung und der inneren Wärmegewinne am Gesamtwärmebedarf des Gebäudes.

Die Wärmespeicherfähigkeit von Gebäudeteilen ist für den Energiehaushalt des Gebäudes von Bedeutung, denn sie wirkt ausgleichend und verzögernd auf Temperaturschwankungen, die z.B. durch eingestrahelte Sonnenenergie, sommerlich kühle Tage, freie Wärmequellen im Haus, Fensterlüftung und ungenügend geregelte Heizwärmeabgabe entstehen können.

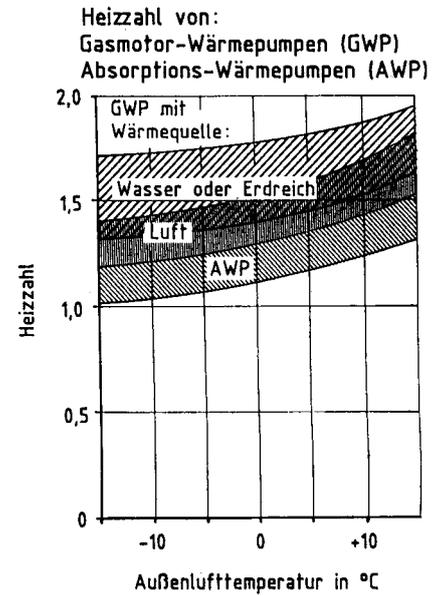
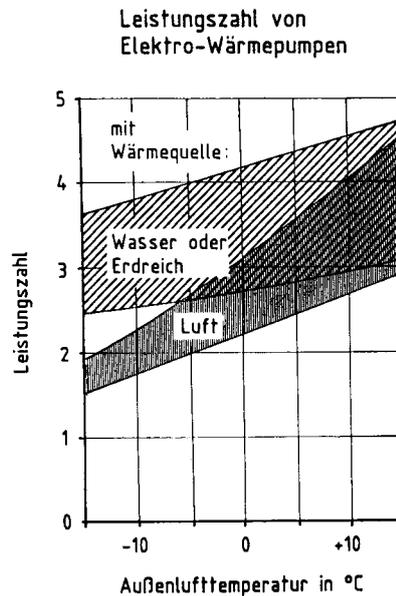


Bild 5. Leistungs- bzw. Heizzahlen von Wärmepumpen-Aggregaten in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

Wärmepumpe	Wärmequelle	Betriebsweise	Jahresarbeits- bzw. Heizzahl	El. Zusatzverbrauch
EWP	Grundwasser	monovalent	3,0 3,7	ca. 15 %
EWP	Erdreich	monovalent	3,0 3,2	ca. 15 %
EWP	Außenluft	monovalent	2,7 2,9	ca. 20 %
EWP	Außenluft	bivalent-parallel	2,4 2,9	ca. 20 %
EWP	Außenluft	bivalent-alternativ	2,6 3,6	ca. 20 %
GWP	*)	*)	1,2 1,5	ca. 10 %
AWP	*)	*)	1,1 1,4	ca. 6 ... 7 %

*) Werte gültig für die unterschiedlichen Kombinationen von Wärmequellen und Betriebsweisen

Anhaltswerte zum Energieverbrauch von Wärmepumpen

Verbesserungen des Wärmeschutzes und Maßnahmen zur passiven Solarenergienutzung senken die Wärmeverluste bei Gebäuden erheblich. Die passive Solarenergienutzung wird durch geeignete Gebäude- und Fassadengestaltung zu einer wichtigen Ergänzung bei zusätzlichen Wärme-

schutzmaßnahmen, wobei auch temporärer Wärme- und Sonnenschutz von großer Bedeutung sind. Neben der Raumbehaglichkeit während der Heizperiode muß auch zu den übrigen Zeitpunkten ein akzeptables Raumklima gewährleistet sein.

Systeme zur Biomassenutzung

Trocken anfallende Biomasse kann im wesentlichen in drei Umwandlungstechniken eingesetzt werden: direkte Verbrennung, Vergasung oder auch Pyrolyse sowie mechanische Aufbereitung der Biomasse in eine Brennstoffform mit definierten Eigenschaften.

Für eine nennenswerte Nutzung durch Verbrennen kommen in Deutschland vor allem Stroh und Holz sowie die brennbare Müllfraktion in Frage. Die Erstgenannten werden dabei in ländlichen Regionen bereits in starkem Maße als „nichtkommerzielle“ Energieträger verwendet. Viele Heizkesselhersteller haben in den letzten Jahren daran gearbeitet, ihre Kessel an Bio-Festbrennstoffe bezüglich Feuerungsqualität, Wirkungsgrad, Emissionen und Bedienerfreundlichkeit anzupassen. Auch für

aufbereitete Brennstoff-Formen sind Feuerungsanlagen auf dem Markt, die häufig über automatische Beschikungseinrichtungen verfügen und so den sonst üblichen zeitintensiven Personalaufwand verringern. Die Wirkungsgrade der Strofeuerungen liegen zwischen 30 und 75 %, die der Holzfeuerungen bei 45 bis 80 %.

Festbrennstoffe aus regenerativer Biomasse sind in technischen Anlagen auch effizient in Gase umzuwandeln. An Einsatzstoffen für die Luft-Vergasung besteht ein weites Angebot: Holzspäne, Sägemehl, Abfall- und Altholz, Rinde von praktisch allen Holzarten, Stroh und Gräser sowie Schalen und Hülsen vieler Früchte. Vorzugsweise für Müll scheint die Entgasung unter Luftabschluß, die

Pyrolyse, ein geeignetes Verfahren zu sein. Neben dem Gas, das noch einer Nachbehandlung bedarf, fällt als Reststoff Pyrolyseöl und evtl. Holzkohle an. Der Hauptvorteil gasförmiger Brennstoffe liegt in der gleichzeitigen Erzeugungsmöglichkeit von Wärme und Strom durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken. Der Energieinhalt der Brenngase bewegt sich zwischen 1 und 5 kWh/m³ bei Vergasungswirkungsgraden von 50 % bis über 80 %.

In den seltensten Fällen kann Biomasse direkt in der anfallenden Form genutzt werden. Sinn einer Aufbereitungsanlage ist daher, das Ausgangsmaterial an das jeweilige nachfolgende Umwandlungsverfahren anzupassen. Die wichtigsten Prozesse sind hierbei: Trocknen, Zerkleinern, Sortieren und Kompaktieren. Vor allem die Strohbrickettierung wurde in den letzten Jahren als sinnvolle Verwertungsmöglichkeit der rund 5 Mill. t Überschussstroh diskutiert. An diesem Beispiel soll kurz der Energieaufwand für die Kompaktierung inkl. Verkleinerung abgeschätzt werden: Er liegt bei einer untersuchten Anlage bei 93 kWh/t und erreicht damit knapp 8 % des Materialheizwertes. Bei der Holz-Hackschnitzelerzeugung ergeben sich 0,4 %. Die gängigen Anlagenkapazitäten liegen bei 300 bis 400 kg h.

Biomasse mit hohem Feuchtigkeitsgehalt eignet sich für die biologische Brenngaserzeugung durch Methangärung in Biogasanlagen. Geeignetes Substrat findet sich in drei Bereichen: der Landwirtschaft (hauptsächlich Tierexkrementen), den kommunalen Klärwerken (Klärschlamm) und der Industrie (vor allem Nahrungsmittelindustrie). In landwirtschaftlichen Anlagen kann mit Gasmengen von 0,6 bis 3,0 m³ je GVE (Großvieheinheit, 500 kg Tiergewicht) und Tag gerechnet werden. Der Gasanfall in Klärwerken liegt bei etwa 8 m³ EGW-a (EGW: Einwohnergleichwert).

Die Leistungsfähigkeit der Biogasanlagen kann allgemein, auch für industrielle Anwendungen, mit 1 m³ Gas je m³ Faulraum und Tag abgeschätzt werden, bei einem Heizwert des Biogases von rund 6 kWh/m³. Einen Teil der gewonnenen Energie (in Deutschland 20 bis 30 %) benötigen die meisten Anlagen für die Aufrechterhaltung einer Faulraumtemperatur von rund 35 °C. Im Rahmen des Gesamtkonzeptes landwirtschaftlicher Biogasanlagen kommt neben der Biogasnutzung auch der Verwertung des Restsubstrats Bedeutung zu, da dessen Anwendung als veredelter Dünger unproblematischer ist als die Ausbringung von Frischgülle. Da speziell in der Landwirtschaft viele Anlagen mit hoher Eigenleistung des Betreibers erstellt werden, ist die Angabe von Kosten problematisch. Als Grenze für den wirtschaftlichen Betrieb scheinen allerdings 1000 DM je m³ Faulraumvolumen ansetzbar. Die jährlichen Betriebskosten betragen im Durchschnitt etwa 2 % der Investitionskosten. Als untere Grenze der Betriebsgröße gelten für landwirtschaftliche Anlagen 80 bis 100 GVE.

KFA Jülich als Wirtschaftsfaktor

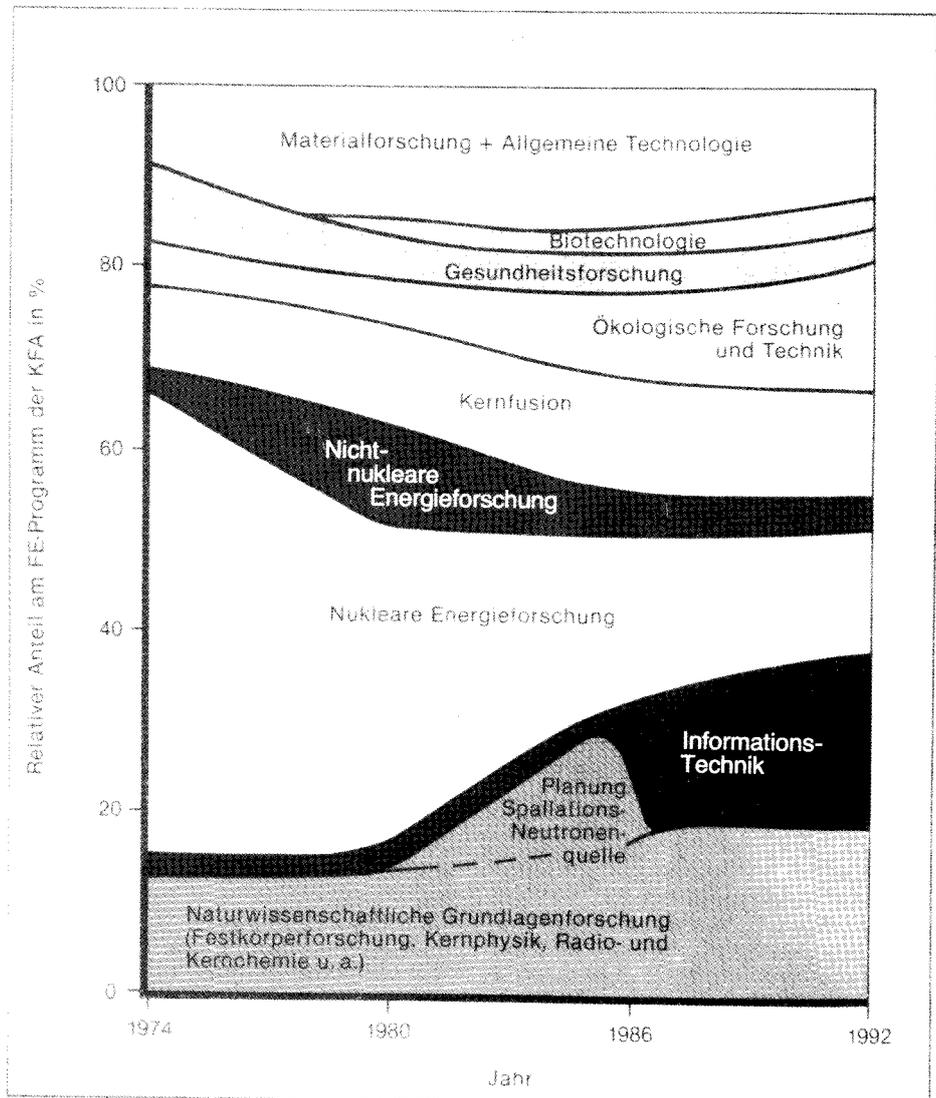
Die Kernforschungsanlage Jülich GmbH, mit der auch viele, die Entwicklungen auf dem Gebiet der Nutzung regenerativer Energiequellen vorantreiben und dabei in den Genuß öffentlicher Förderung kommen möchten, als „Projekträger“ Bekanntheit machen, hat sich soeben in einer Schrift als „Wirtschaftsfaktor“ dargestellt. Die Gesellschaft, die zu 90 Prozent von der Bundesrepublik Deutschland und zu 10 Prozent vom Land Nordrhein-Westfalen getragen wird, beschäftigt 4550 Mitarbeiter, darunter 880 Wissenschaftler (davon 59 Professoren). Hinzu kommen jährlich über 400 Gastwissenschaftler aus mehr als 30 Ländern. Über 400 Menschen werden in 24 Berufen ausgebildet. Bei einem Jahresetat von 500 Millionen DM wird ein Ertrag von 60 Millionen erwirtschaftet.

In der Einleitung des Berichtes schreibt K. W. Baurmann:

„Der Name der Kernforschungsanlage Jülich weist auf ihre Anfänge hin und läßt nicht unmittelbar erkennbar werden, daß sich ihre Forschungsziele in mehr als einem Vierteljahrhundert des Bestehens der KFA gewandelt und vielfältig haben.“

Ein geschärftes Bewußtsein um die begrenzte Belastbarkeit unseres Ökosystems und um die damit verbundenen Fragen nach umweltfreundlichen Energietechniken, das Vordringen modernster Techniken in alle Lebensbereiche und die starke Zunahme wissenschaftlicher Erkenntnisse und Fähigkeiten sind

Beispiele für einen sich weltweit vollziehenden Umbruch, dem auch die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der KFA Rechnung getragen haben. Ein Großteil der namensgleichen Aufgaben der KFA ist erfolgreich abgeschlossen und hat neuen Zielen Platz gemacht. Der Übergang zu neuen Zielen war dabei fließend und dadurch gekennzeichnet, daß man Probleme nicht nur zu meistern verstand, sondern auch neue erkannte und aufgriff. Daß diesem gleichsam stetigen Neubeginn eine grundsätzliche Neuorientierung folgt, bedeutet das betonte Fortschreiten auf einem schon lange vorgezeichneten Wege. Es bedeutet aber nicht, daß jetzt auf den



Entwicklung der Forschungsschwerpunkte der KFA Jülich in den Jahren 1974 bis 1992