Innovation
und
neue Energietechnologien

Das 5. Energieforschungsprogramm
der Bundesregierung

Berlin, 1. Juni 2005

Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit

Vorwort

Energiegeschichte ist Technikgeschichte. Wir reden zwar vom Kohlezeitalter, vom Ölzeitalter und vom Solarzeitalter, aber diese historischen Perioden mit ihren tiefgreifenden wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umwälzungen wären undenkbar ohne die dazu gehörenden Technologien. Ohne die Erfindung der Dampfmaschine durch James Watt und die Entdeckung des Dynamos durch Werner von Siemens hätte es kein Kohlezeitalter gegeben. Ohne die Entwicklung des Ottomotors hätte es keinen Siegeszug des Mineralöls gegeben, das heute rd. 40 % des weltweiten Primärenergiebedarfs deckt. Und ohne die grundlegenden Entwicklungsarbeiten bei der Photovoltaik in den 50er Jahren gäbe es heute keine so großen Hoffnungen in ein künftiges Solarzeitalter.

Wer Energiegeschichte schreiben will, muss in Technologien investieren. Das ist in erster Linie eine Aufgabe der Wirtschaft. Die Bundesregierung unterstützt jedoch die Bemühungen der Wirtschaft durch gezielte Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien, und zwar auf breiter Front, von der Grundlagenforschung über die angewandte Forschung bis zu Demonstrationsanlagen.

Mehr als 30 Jahre nach dem ersten Energieforschungsprogramm (1974) und fast 10 Jahre nach der letzten Fortschreibung (1996) legt die Bundesregierung das 5. Energieforschungsprogramm „Innovation und neue Energietechnologien“ vor. Das Programm ist unter der Federführung des BMWA gemeinsam mit dem BMU, dem BMVEL und dem BMBF entwickelt worden.

Drei strategische Grundlinien kennzeichnen das Programm:

1. Das Energieforschungsprogramm ist Teil der „Innovationsinitiative“ der Bundesregierung und ihrer Bemühungen um mehr Wettbewerbsfähigkeit, Wachstum und Beschäftigung in Deutschland. Auch im Energiebereich geht es darum, die Innovationsdynamik zu stärken. Wir

müssen die anerkannte technologische Spitzenposition der deutschen Wirtschaft ausbauen und dafür sorgen, dass die modernen Energietechnologien schneller in den Markt gebracht werden.

2. Das Energieforschungsprogramm unterstützt die Energiepolitik der Bundesregierung. Es leistet insbesondere einen Beitrag, damit auch in Zukunft

   - ein ausgewogener Energiemix unter Einschluss von Stein- und Braunkohle in Deutschland erhalten bleibt,
   - deutliche Verbesserungen der Energieeffizienz möglich werden,
   - der Anteil der erneuerbaren Energien zur Primärenergiebedarfsdeckung ohne Verlust an Wirtschaftlichkeit erhöht werden kann und schließlich
   - die international zugesagten Fortschritte beim Klimaschutz zu den geringst möglichen Kosten erzielt werden.

3. Das Energieforschungsprogramm schafft gute Voraussetzungen, dass die deutsche Stromwirtschaft bei dem ab 2010 anstehenden Kraftwerkserneuerungsprogramm auf modernste Technik zurückgreifen kann. Wenn wir die Stromversorgung in Deutschland ohne zusätzliche Importe sichern wollen, müssen zwischen 2010 und 2025 Kraftwerke mit einer Kapazität von ca. 40.000 MW gebaut werden. Damit das möglich wird, hat das BMWA zusammen mit Wirtschaft und Wissenschaft das COORETEC-Konzept zu den künftigen Schwerpunkten bei Forschung und Entwicklung moderner Kraftwerkstechnologien entwickelt. Dort werden die technologischen Grundlagen für ein emissionsarmes und längerfristig emissionsfreies Kohlekraftwerk aufgezeigt. Dieses Konzept wird jetzt mit dem neuen Energieforschungsprogramm umgesetzt und leistet einen Beitrag, damit in Deutschland auf lange Sicht Strom sicher, wettbewerbsfähig, umweltverträglich und mit gesellschaftlicher Akzeptanz erzeugt werden kann.

Energieforschung ist kein Randthema der Energiepolitik. Energieforschung gehört zum Kern. Hier wird mitentschieden, wie wir morgen wirtschaften und leben wollen. Wer bei der Diskussion über die energiewirtschaftliche Zukunft Deutschlands mitreden will, findet in dem neuen Energieforschungsprogramm „Innovation und neue Energietechnologien“ die dazu notwendigen Daten und Fakten.

Wolfgang Clement
Bundesminister für Wirtschaft und Arbeit

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ***1***

1. ***Einleitung*** ***7***

1.1 Ausgangslage 7

1.2 Aufgaben und Ziele der Energieforschungspolitik 13

1.3 Struktur und Leitlinien der Förderpolitik 15

1.4 Internationale Zusammenarbeit 18

1.5 Finanzieller Rahmen 23

2. ***Programmschwerpunkte*** ***25***

2.1 Energieforschung BMWA 27

2.1.1 Rationelle Energieumwandlung *27*

2.1.1.1 Kraftwerkstechnik auf Basis Kohle und Gas 27

2.1.1.2 Brennstoffzellen 32

2.1.1.3 Speichertechnologien und Wasserstoff 37

2.1.1.4 Energieoptimiertes Bauen 42

2.1.1.5 Energieeffizienz in der Industrie, im Gewerbe, im Handel und bei Dienstleistungen 46

2.1.1.6 Systemanalyse und Informationsverbreitung 49

2.1.1.7 Haushaltsmittel 51

2.1.2 Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung *53*

2.1.2.1 Reaktorsicherheitsforschung 54

2.1.2.2 Endlagerforschung 55

2.1.2.3 Kompetenzerhaltung und internationale Kooperation 55

2.1.2.4 Haushaltsmittel 56

2.2 Energieforschung BMU 58

2.2.1 Photovoltaik *61*

2.2.2 Windenergie *67*

2.2.3 Hochtemperatur-Solarthermie *71*

2.2.4 Niedertemperatur-Solarthermie *74*

2.2.5 Geothermie *78*
2.2.6 Wasserkraft und Nutzung der Meeresenergie *81*
2.2.7 Ökologische Begleitforschung *82*
2.2.8 Übergreifende Forschungsthemen für erneuerbare Energien *83*
2.2.9 Haushaltsmittel *84*

2.3 Energieforschung BMVEL 86
2.3.1 Ausgangslage *86*
2.3.2 Potenziale der Bioenergie *87*
2.3.3 Forschungsbedarf bei der Bioenergie *88*
2.3.4 Haushaltsmittel *91*

2.4 Energieforschung BMBF 92
2.4.1 Institutionelle Förderung *92*
2.4.1.1 Erneuerbare Energien 95
2.4.1.2 Rationelle Energieumwandlung 100
2.4.1.3 Nukleare Sicherheitsforschung 106
2.4.1.4 Fusionsforschung 111
2.4.2 Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung *117*

3. Leitfaden für die Projektförderung **121**
3.1 Voraussetzungen 121
3.2 Finanzielle Modalitäten der Projektförderung 123
3.3 Durchführung eines Projektes 124
3.4 Ergebnisverwertung 125

Anhang **127**

A. Liste der Projektträger 127
B. Weitere Informationsstellen 130
C. Abkürzungsverzeichnis 131
D. Umrechnungsfaktoren 134

Zusammenfassung

Eine sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung ist das Rückgrat jeder modernen Volkswirtschaft. Ohne eine leistungsfähige Energieversorgung ist es nicht möglich, Wachstum, Beschäftigung und Wohlstand zu sichern. Ohne Energie gibt es keine Entwicklung. Ohne Umgestaltung der Energieversorgung gibt es keine Fortschritte beim Klimaschutz.

Deutschland steht heute vor der Aufgabe, den Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung weiter voran zu treiben. Dieser Übergang setzt neben geeigneten energiepolitischen Rahmendaten vor allem Innovation und technischen Fortschritt voraus. Nur mit verbesserten und neuen Technologien wird es Deutschland gelingen, die energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zu meistern.

Die zentrale Aufgabe der kommenden Jahre ist es, Innovationsprozesse zu beschleunigen und neue Technologien schneller in den Markt zu bringen. Das ist in erster Linie eine Aufgabe der Wirtschaft. Die Bundesregierung unterstützt diesen Prozess jedoch durch Förderung von Forschung und Entwicklung von Energietechnologien. Sie legt mit dem neuen Energieforschungsprogramm „Innovation und neue Energietechnologien“ die Grundlage für die Förderpolitik in den kommenden Jahren.

Das 5. Energieforschungsprogramm steht im Kontext der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, des Klimaschutzprogramms sowie der „Agenda 2010“ der Bundesregierung und ihrer Strategie für mehr Wachstum und Beschäftigung in Deutschland. Es bildet auch einen wichtigen Input für die Initiative „Partner für Innovation“ von Bundesregierung, Wirtschaft, Wissenschaft und Gewerkschaften zur Stärkung der Innovationsdynamik. Insofern zielt die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien auch darauf ab, einen Beitrag zu leisten, um die gute Position Deutschlands bei Erfindungen, Forschung, Entwicklung und Technik auszubauen, die Attraktivität des Standort Deutschlands für Investition und Produktion zu erhöhen, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu verbessern und dauerhaft zukunftsfähige Arbeitsplätze in Deutschland zu sichern.

Das Programm ist unter der Leitung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) entstanden. Das BMWA hat innerhalb der Bundesregierung die Federführung für die programmatische Ausrichtung der Energieforschungspolitik und das Energieforschungspro-

gramm. Das BMWA ist darüber hinaus zuständig für die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung auf den Gebieten der „nichtnuklearen Energien“ (ohne erneuerbare Energien), der „rationellen Energieumwandlung“ sowie für die „nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung“. Daneben gibt es im Rahmen des Energieforschungsprogramms individuelle Ressortzuständigkeiten: Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) ist zuständig für die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung der „erneuerbaren Energien“, das Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) für die Förderung von Forschung und Entwicklung der „Bioenergie“ und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die institutionelle Förderung der Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft im Forschungsbereich "Energie" sowie für die Grundlagen- und Vorsorgeforschung einschließlich der Forschungsaktivitäten der Netzwerke „Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung“.

Die Energieforschungspolitik der Bundesregierung kann auf einem soliden Fundament aufbauen. Deutschland verfügt über eine gute Grundlagenforschung, eine leistungsfähige wissenschaftlich-technische Infrastruktur sowie eine hervorragende industrielle Energieforschung, vor allem auf zukunftsträchtigen Feldern wie etwa der „modernen Kraftwerkstechnik“, der „Photovoltaik“ und der „Brennstoffzelle“. Das belegen die überdurchschnittliche Beteiligung deutscher Partner an dem EU-Forschungsrahmenprogramm sowie die guten, zum Teil exzellenten Bewertungen der Energieforschungsprogramme der Helmholtz-Zentren durch internationale Gutachter.

Die Bundesregierung hat die Förderung von Forschung und Entwicklung im Energiebereich an die neuen politischen Rahmendaten und Prioritäten angepasst. Die Schwerpunkte der künftigen Förderung liegen auf den Feldern „Energieeffizienz“ und „erneuerbare Energien“. Die Energieforschungspolitik folgt damit auch der von der Bundesregierung entwickelten Strategie für eine nachhaltige Entwicklung und leistet einen wichtigen Beitrag zum Schutz der Erdatmosphäre.

Die Förderung von Forschung und Entwicklung im Energiebereich konzentriert sich insbesondere auf folgende Felder:

- Moderne Kraftwerkstechnologien auf Basis von Kohle und Gas (einschließlich CO_2-Abtrennung und CO_2-Speicherung),
- Photovoltaik und Windenergie im Offshore-Bereich,
- Brennstoffzellen und Wasserstoff als Sekundärenergieträger sowie Energiespeicher,

- Technologien und Verfahren für energieoptimiertes Bauen sowie
- Technologien zur energetischen Nutzung der Biomasse.

Daneben umfasst die Förderpolitik des Bundes auch die Bereiche energiesparender Technologien in der Industrie, im Gewerbe, im Handel und bei Dienstleistungen, weitere Bereiche der erneuerbaren Energietechnologien, wie Solarthermie, Geothermie und Wasserkraft, nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung, die Entwicklung der Kernfusion als Energiequelle sowie Systemanalyse und Informationsverbreitung.

Das Programm und seine Schwerpunkte sind gut abgestimmt mit den Forschungsaktivitäten der Industrie, den Forschungsarbeiten an Universitäten und wissenschaftlichen Instituten sowie der Energieforschung in der EU. Die Ausrichtung des Programms bezieht auch die internationalen Kooperationen mit unseren Partnerländern in der Internationalen Energieagentur (IEA) ein.

Die Fortschreibung des Energieforschungsprogramms fällt in eine Zeit der Konsolidierung öffentlicher Haushalte. Die übergeordneten Ziele der „Reform-Agenda 2010“ setzen auch den Rahmen für die Fördermaßnahmen im Bereich der Energieforschung. Um den großen politischen Herausforderungen des Übergangs zu einer nachhaltigen Energieversorgung Rechnung zu tragen, beabsichtigt die Bundesregierung jedoch, aus der Abschaffung der Eigenheimzulage frei werdende Mittel zusätzlich im Rahmen der „Innovationsinitiative“ bereit zu stellen, um die Förderpolitik zu verstetigen und neue Entwicklungen anstoßen zu können.

In Phasen knapper Haushalte werden an die Effizienz der Fördermaßnahmen naturgemäß besonders strenge Anforderungen gestellt. Die Bundesregierung trägt diesem Anliegen vor allem Rechnung durch:

- Begrenzung der Förderung auf die Kernaufgaben staatlicher Forschungspolitik, d. h. Konzentration der Mittel auf besonders innovative Energietechnologien, die für die künftige Energieversorgung und den Standort Deutschland wichtig sind, aber von der Wirtschaft bei ihren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wegen der hohen Risiken nicht ausreichend beachtet werden können,
- Verbesserung der Kooperation zwischen Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, um die Fördermaßnahmen noch gezielter auf die konkreten Bedürfnisse der Märkte und die gesamtwirtschaftlichen Erfordernisse abzustellen,

- Stärkung der Wettbewerbselemente, um die noch vorhandenen Optimierungsspielräume zu nutzen, neuen Ansätzen bzw. Technologieverbesserungen schneller zum Durchbruch zu verhelfen und die Leistungsfähigkeit der Energieforschung in Deutschland insgesamt zu verbessern sowie
- Optimierung der Arbeitsteilung und verbesserte Zusammenarbeit zwischen nationaler und europäischer Energieforschung mit dem Ziel Doppelarbeit zu vermeiden und Kräfte für Projekte mit klarer „Europäischer Dimension“ zu bündeln.

Die Bundesregierung wird für Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien in den Jahren 2005 bis 2008 rd. 1,7 Mrd. € zur Verfügung stellen. Damit werden zusätzliche Forschungsinvestitionen in der Wirtschaft, vor allem bei kleinen und mittleren Unternehmen, induziert. Die Schwerpunktverlagerung zu Gunsten der Bereiche „Energieeffizienz“ und „erneuerbare Energien“ wird auch in dem Forschungsbudget sichtbar. Gegenüber 1998, dem Jahr der ersten Regierungsbildung von SPD und Bündnis 90/Die Grünen, sollen die Mittel für „Energieeffizienz“ und „erneuerbare Energien“ bis 2008 um rd. 46 % gesteigert werden. Dieser Zuwachs setzt bei einer Gesamtzunahme der Förderung um 9 % erhebliche Umschichtungen aus den Bereichen "Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung" und "Fusionsforschung" voraus. Die Bundesregierung wird im Jahr 2006 innerhalb der programmorientierten Förderung der HGF eine Evaluierung ihrer Anstrengungen zur Fusion im Verhältnis von Aufwand und Wirkungen vornehmen und mit Blick auf die nächste Programmperiode der HGF entscheiden.

Förderung von Forschung und Entwicklung im Energieforschungsprogramm (in Mio. €)

Bereich	***Ist-Zahlen*** **1998**	**2003**	***Planung*** **2008**	***Trend*** **1998/2008**
Energieeffizienz, erneuerbare Energien	178	207	259	**+ 46 %**
Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung	85	53	55	**- 35 %**
Fusionsforschung	122	115	115	**- 6 %**
Sonstiges (z. B. Beseitigung kerntechn. Anlagen)	7	0	0	**-**
Summe	392	375	428	**+ 9 %**

Zahlen 2008 enthalten Mittel aus der Innovationsinitiative und stehen unter dem Vorbehalt der Bewilligung durch das Parlament

Die Bundesregierung unterstützt Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien auch außerhalb des Energieforschungsprogramms. Dabei geht es um Vorhaben in anderen Programmen, in denen die energiepolitischen Aspekte nachrangig sind (Mobilitätsforschung, Luftfahrtforschung, Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Bau- und Wohnungswesens u. a.). Projekte mit Bezügen zur Energieforschung gibt es auch in Forschungseinrichtungen des Bundes. Dort sind sie Teil der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur oder dienen der Politikberatung der Ressorts. Alle diese Arbeiten sind nicht Gegenstand des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung, bilden aber ergänzende Grundlagen für die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien in Deutschland.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Energieversorgung, insbesondere die Stromversorgung, ist das Rückgrat jeder modernen Industrie-, Informations- und Dienstleistungsgesellschaft. Der Stellenwert der Energieversorgung für Wachstum und Wohlstand, aber auch die potenziellen Risiken der Energienutzung für Umwelt und Klima machen politische Entscheidungen über die Energiefrage zu strategischen Weichenstellungen für Wirtschaft und Gesellschaft.

Der Übergang zum 21. Jahrhundert ist durch ein sich rasch veränderndes geopolitisches, wirtschaftliches und technologisches Umfeld gekennzeichnet. Viele energiewirtschaftliche Erwartungen haben sich verändert. Durch die Globalisierung stellen sich auch viele wirtschaftpolitische Fragen neu. Immer deutlicher wird, in welchem Umfang Wachstum und Beschäftigung in Deutschland von Wettbewerbsfähigkeit und Innovationsdynamik abhängen. Schließlich hat der Klimaschutz in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Das Kyoto-Protokoll ist am 16. Februar 2005 in Kraft getreten. Obergrenze für den Ausstoß von Treibhausgasen sind völkerrechtlich verbindlich. Programmatische Aussagen zur staatlichen Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien bedürfen daher einer sorgfältigen Analyse der Ausgangslage und der vor uns liegenden Herausforderungen.

Ziel der Bundesregierung ist eine nachhaltige Energieversorgung, d. h. eine Energieversorgung, die stets eine zugleich sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Bereitstellung und Nutzung von Energie gewährleistet [1].

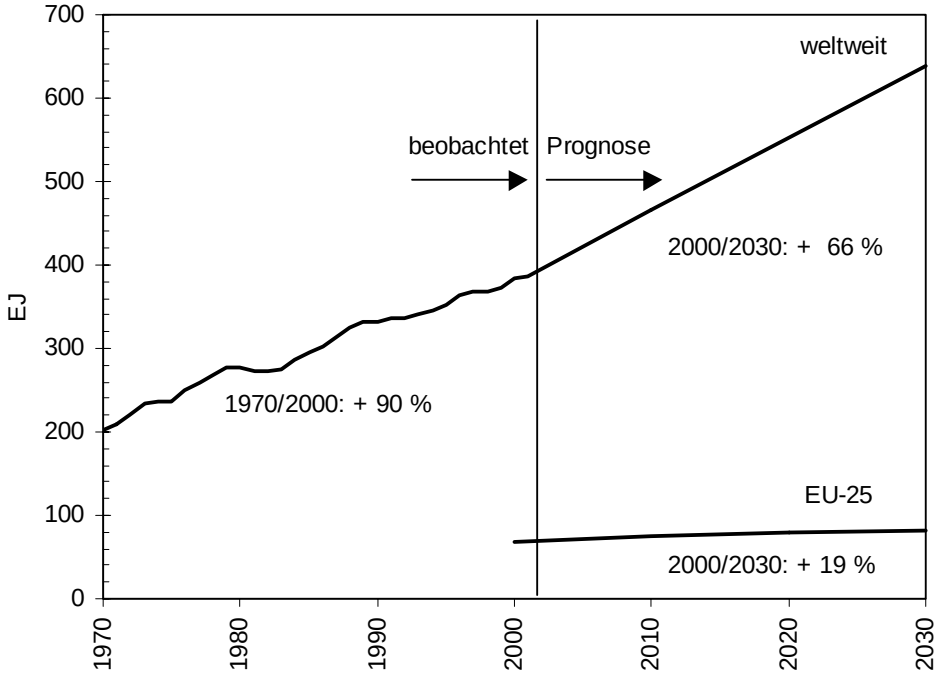
Die weltweite Energieversorgung entspricht heute nicht dem Leitbild der Nachhaltigkeit:

- Viele Menschen, vor allem in den Entwicklungs- und Schwellenländern, haben keinen Zugang zur Stromversorgung und bleiben damit von vielen grundlegenden Entwicklungsmöglichkeiten ausgeschlossen,
- den global zunehmenden Ansprüchen an die Energieversorgung stehen auf lange Sicht begrenzte Ressourcen vor allem an konventionellem Öl und Erdgas gegenüber,
- Wirtschaft und Verbraucher nutzen Energie vielfach nicht effizient genug,

- der Anteil der zukunftsfähigen erneuerbaren Energien (Wasser, Wind, Solarenergie, moderne Bioenergie u.a.) ist noch zu gering und
- die Umweltbelastungen, insbesondere durch die Emissionen der treibhausrelevanten Spurengase wie CO_2, CH_4 und andere, sind zu hoch.

Für die politische Bewertung wichtig ist eine Einsicht in die Dynamik der Entwicklung [2]. Von 1970 bis 2000 ist der weltweite Energieverbrauch um 90 % gestiegen. Die internationale Energieagentur (IEA) erwartet in einer Trendfortschreibung bis 2030 einen weiteren Anstieg des Weltenergieverbrauchs um mehr als 60 % (siehe Abb. 1.1). Ursache dafür ist vor allem der Anstieg der Weltbevölkerung. Heute (2003) leben rd. 6,3 Mrd. Menschen auf der Erde. Die Vereinten Nationen erwarten für 2030 eine Weltbevölkerung von über 8 Mrd. Menschen. Der von der IEA und anderen Institutionen prognostizierte deutliche Anstieg der weltweiten Energienachfrage wird auch mit dem wirtschaftlichen Nachholbedarf der Entwicklungs- und Schwellenländer begründet. Die große Differenz der Pro-Kopf Einkommen zwischen den gering entwickelten Ländern (2002: 430 $) und den Industrieländern (2002: 26.500 $) gibt diesem Argument besonderes Gewicht.

Abb. 1.1: Globaler Energieverbrauch



Quelle: IEA, EU-Kommission

Die Hauptlast der globalen Energieversorgung tragen die fossilen Energieträger Kohle, Öl und Gas. Der Anteil der fossilen Energieträger an der weltweiten Energiebedarfsdeckung liegt heute

bei fast 90 %. An der starken Marktposition von Kohle, Öl und Gas wird sich auf absehbare Zeit nur wenig ändern. Das liegt vor allem an der gegenwärtig noch ausreichenden Verfügbarkeit von Kohle, Öl und Gas, deren Wettbewerbsfähigkeit sowie den praktischen Nutzungsvorteilen gegenüber den meisten der nichtfossilen Energieträger. Hinzu kommt die enge Einbindung der fossilen Energieträger in die über Jahrzehnte gewachsene, langlebige und kapitalintensive energiewirtschaftliche Infrastruktur (Bergwerke, Förderanlagen, Pipelines, Kraftwerke, Leitungsnetze etc.), die grundsätzlich einen längeren Anpassungszeitraum an neue Versorgungsstrukturen notwendig macht.

Weltweit steigender Energieverbrauch und Dominanz der fossilen Energieträger bedeuten bei den heute zum Einsatz kommenden Energietechnologien in aller Regel steigende CO_2-Emissionen. Viele Abschätzungen erwarten unter Status-quo-Annahmen einen Anstieg der CO_2-Emissionen bis 2030 um 50 – 70 %. Diese Erwartungen stehen im Gegensatz zu den Erfordernissen des Klimaschutzes, die treibhausrelevanten Spurengase bis 2050 drastisch zu vermindern. Das Ausmaß der Differenz zwischen Erwartungen und Notwendigkeiten illustriert in besonders eindrucksvoller Weise den Handlungsbedarf bei der Weiterentwicklung einer international abgestimmten Politik für eine nachhaltige Energieversorgung und bei der Entwicklung moderner, umwelt- und klimaverträglicher Energietechnologien.

Für Deutschland führt eine Analyse der Nachhaltigkeit der Energieversorgung zu einem günstigeren Bild [3]:

- Der Primärenergieverbrauch stagniert seit vielen Jahren und weist seit 1990 sogar einen rückläufigen Trend auf (siehe Tab. 1.1),
- die grundlegende Erneuerung des Kraftwerksparks in den neuen Ländern hat die Wirkungsgrade in der Stromerzeugung beträchtlich verbessert und liefert damit eine gute technologische Basis für die anstehende Kraftwerksmodernisierung bei Kohle und Gas in den alten Ländern,
- der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Primärenergiebedarfsdeckung ist gestiegen,
- die lokalen Schadstoffbelastungen durch die Emissionen von SO_2, NO_x, Stäuben und anderen Stoffen wurden deutlich vermindert und
- die energiebedingten klimawirksamen CO_2-Emissionen sind rückläufig und lagen in 2003 rd. 15 % unter dem Niveau des Jahres 1990.

Tab. 1.1: Primärenergieverbrauch in Deutschland

	1990		2003	
	in PJ	**Anteil in %**	**in PJ**	**Anteil in %**
Mineralöl	5.238	35,1	5.214	36,7
Naturgas	2.316	15,5	3.224	22,6
Steinkohle	2.306	15,5	1.964	13,6
Braunkohle	3.201	21,5	1.638	11,4
Kernenergie	1.668	11,2	1.802	12,5
Erneuerbare Energien	163	1,1	448	3,1
Sonstige	24	0,1	44	0,1
Insgesamt	**14.916**	**100**	**14.334**	**100**

Quelle: AG Energiebilanzen; zur Umrechnung in andere Energieeinheiten siehe Anhang D

Trotz dieser Erfolge verbleiben erhebliche Defizite bei der energiewirtschaftlichen Umstrukturierung. Das zeigt besonders deutlich der Vergleich der CO_2-Emissionen pro Kopf, bei denen Deutschland im internationalen Rahmen mit an der Spitze liegt. Die Bundesregierung strebt daher an, den Weg zu einer noch sichereren, wirtschaftlicheren und umweltverträglicheren Energieversorgung weiter vorantreiben.

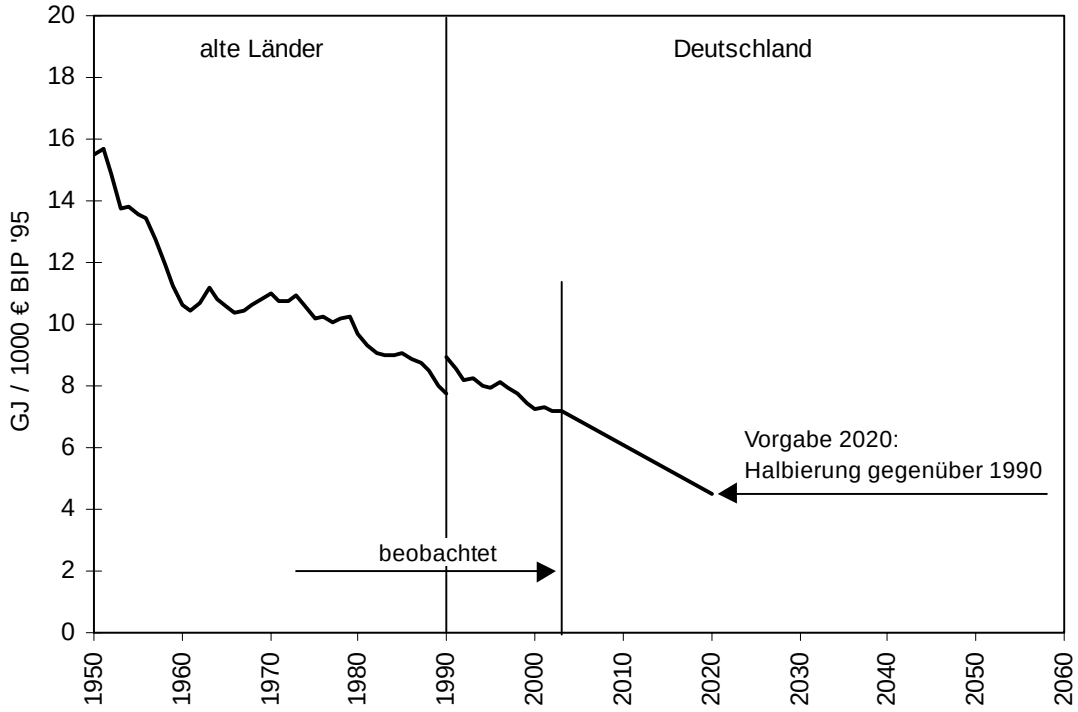
Die Politik der Bundesregierung zielt darauf ab:

- einen ausgewogenen Energiemix aus fossilen und erneuerbaren Energien zur Sicherung der Energieversorgung Deutschlands zu gewährleisten,
- die gesamtwirtschaftliche Energieeffizienz weiter zu steigern und damit zugleich einen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft sowie zum Klimaschutz zu leisten,
- den Beitrag der erneuerbaren Energien zur Primärenergiebedarfsdeckung weiter zu erhöhen und sie so schnell wie möglich zur Wettbewerbsfähigkeit zu führen,
- den Verzicht auf die Kernenergie Schritt für Schritt und ohne Beeinträchtigung einer sicheren und wirtschaftlichen Stromversorgung zu ermöglichen sowie
- die Abgabe der energiebedingten CO_2-Emissionen und der anderen treibhausrelevanten Spurengase in die Atmosphäre im Rahmen der gegenwärtigen und künftigen internationalen Verpflichtungen so kostengünstig wie möglich zu vermindern.

Die Bundesregierung hat mit Blick auf den Klimaschutz zwei dieser Grundlinien durch politische Zielvorgaben herausgehoben. Sie beziehen sich auf die „Steigerung der Energieeffizienz“ und den „Ausbau der erneuerbaren Energien“. Beide Vorgaben sind auch Leitgrößen für die Energieforschungspolitik.

Energieeffizienz: Die Bundesregierung strebt in ihrer Strategie für eine nachhaltige Entwicklung eine Verdopplung der Energieproduktivität der deutschen Volkswirtschaft bis 2020 gegenüber 1990 an. Diese ehrgeizige Vorgabe entspricht einer durchschnittlichen Reduktion des spezifischen Primärenergieverbrauchs von 2,3 % pro Jahr. Sie liegt damit deutlich über dem langfristigen Trend (von 1990 bis 2003 ist der spezifische Primärenergieverbrauch in Deutschland um 1,6 % p. a. zurückgegangen, von 1950 bis 1990 in den alten Ländern um 1,7 % p. a.). Konsequenterweise müssen Maßnahmen zur Verbesserung der Energieproduktivität auf der gesamten Wertschöpfungskette des Energiesystems ansetzen, bei der Gewinnung, beim Transport, bei der Umwandlung (hier insbesondere bei der Stromerzeugung) sowie bei der Energienutzung durch die Industrie, im Gewerbe, im Handel, bei Dienstleistungen, im Verkehr und bei den privaten Haushalten.

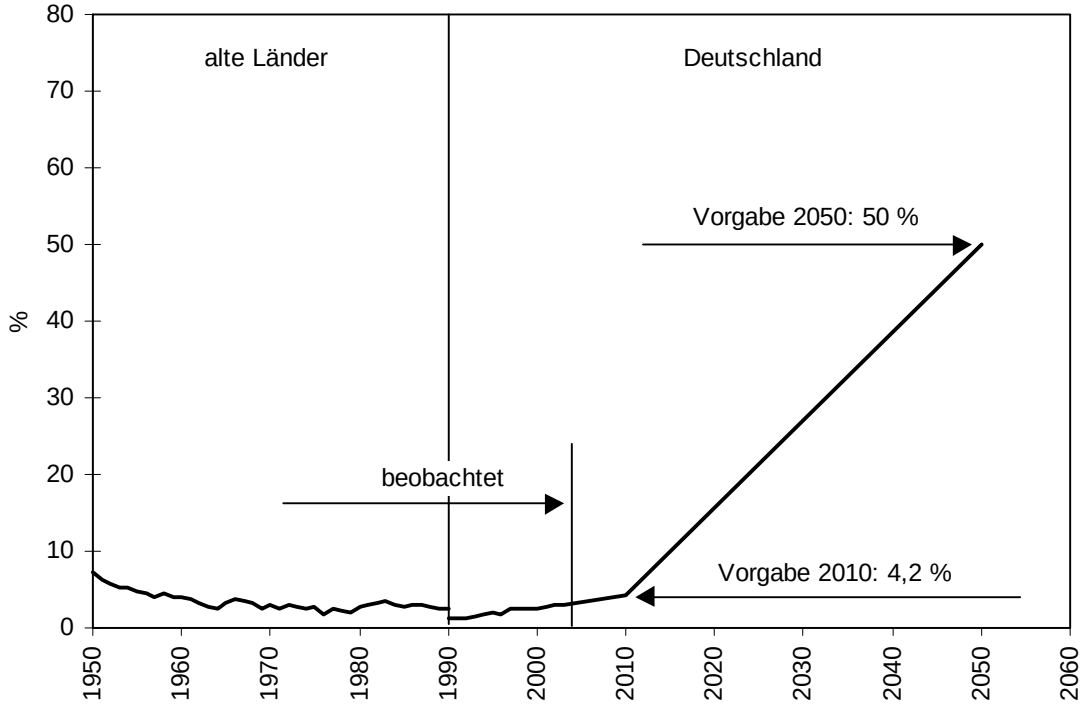
Abb. 1.2: Spezifischer Primärenergieverbrauch in Deutschland



Quelle: AG Energiebilanzen; Statistisches Bundesamt

Erneuerbare Energien: Die Bundesregierung hat sich in ihrer Strategie für eine nachhaltige Entwicklung das Ziel gesetzt, den Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch bis 2010 auf 4,2 % zu erhöhen. Bis 2050 strebt die Bundesregierung einen weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien bis zu einem Anteil von 50 % an. 1990 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch rd. 1,6 % (in den alten Ländern lag der Anteil, insbesondere durch die naturbedingt besseren Möglichkeiten des Zugriffs auf Wasserkraft, etwas höher). Bis 2003 konnte der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch auf 3,1 % erhöht werden.

Abb. 1.3: Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch in Deutschland



Quelle: AG Energiebilanzen (bis 1990 Bewertung des Primärenergieverbrauchs nach Substitutionsmethode, ab 1990 nach Wirkungsgradprinzip)

Bei der angestrebten Steigerung der Energieproduktivität und dem angestrebten Ausbau der erneuerbaren Energien geht die Bundesregierung davon aus, dass diese Ziele im Einklang mit anderen Zielen einer nachhaltigen Entwicklung, vor allem Wachstum und Beschäftigung in Deutschland, realisiert werden können. Insgesamt sind auf beiden Gebieten zusätzliche Anstrengungen notwendig. Forschung und Entwicklung bilden dafür die zentrale Voraussetzung.

Literatur

[1] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland: Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung, Berlin

[2] IEA (2004): World Energy Outlook, Paris
[3] BMWA (2003): Energiedaten 2003, Berlin
[4] EU-Kommission (2003): European Energy and Transport Trends to 2030, Brüssel

1.2 Aufgaben und Ziele der Energieforschungspolitik

Wenn die Energieversorgung das „Rückgrat“ einer modernen Industrie-, Informations- und Dienstleistungsgesellschaft ist, dann sind die Energietechnologien die „Elemente dieses Rückgrates“. Ohne Bohrtürme, Bergwerke, Tagebaue, Kraftwerke, Windräder, Solarkollektoren, Motoren, Beleuchtungskörper, Anlagen zur Informationsverarbeitung (Computer, Telekommunikation) und andere Energietechnologien kann die Energieversorgung ihre Funktion, Dienstleistungen in Form von Wärme, Kraft, Licht und Information für Wirtschaft und Verbraucher bereitzustellen, nicht erfüllen.

Forschung und Entwicklung von Energietechnologien sind in erster Linie eine Aufgabe der Wirtschaft. Die Aufgabe des Staates ist die Schaffung von Rahmenbedingungen für Innovation und technischen Fortschritt. Diese Aufgabenverteilung resultiert aus unserem Verständnis von der generellen Überlegenheit marktwirtschaftlicher Prozesse. Die Wirtschaft hat die besseren Anreize für effektive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten: Sie ist der Hauptnutznießer der Forschungsergebnisse, sie kennt die Stärken und Schwächen der Technologien am besten, und sie muss in einem Wettbewerbsmarkt besonders „überlegt“ agieren.

Darüber hinaus gilt es zu beachten, dass es die Wirtschaft ist, die mitziehen muss, wenn neue Entwicklungen und Produkte auf den Markt gebracht werden sollen. Die Politik hat nicht die Kraft, auf Dauer gegen die Wirtschaft in den technologischen Selektionsprozess einzugreifen und dabei „Gewinner“ und „Verlierer“ zu bestimmen.

Jenseits dieser generellen Aufgabenverteilung gibt es einen spezifischen Bedarf für eine gezielte staatliche Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien. Dieser Bedarf ergibt sich aus den bekannten „Marktdefiziten“ bei Forschung und Entwicklung und ist im Energiebereich insbesondere begründet durch:

- die langen Zeithorizonte energietechnischer Entwicklungen von der „Erfindung“ bis zu einer kommerziellen Nutzung, die z. T. weit außerhalb der betriebswirtschaftlich üblichen Planungs- und Kalkulationsfristen liegen,

- die hohen Risiken von Forschung und Entwicklung ausgewählter Energietechnologien, die vom Markt nicht abgedeckt werden können sowie

- den strategischen Stellenwert des Faktors „Energie“ für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft.

Die Bundesregierung verfolgt mit der Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien **drei Ziele**:

1. Die Förderung soll einen konkreten Beitrag zur Erfüllung der energie- und klimapolitischen Vorgaben leisten. Damit bekommen Technologien eine Priorität, die dazu beitragen, den Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu beschleunigen. Im Mittelpunkt stehen vor allem moderne und innovative Technologien, die in der Lage sind, die Versorgungssicherheit in Deutschland zu gewährleisten, die Energieeffizienz zu verbessern und den Anteil der erneuerbaren Energien an der Primärenergiebedarfsdeckung zu erhöhen.

2. Die Förderung soll durch Sicherung und Erweiterung der technologischen Optionen die Reaktionsfähigkeit und Flexibilität der Energieversorgung Deutschlands verbessern. Das gibt Wirtschaft und Verbrauchern die Möglichkeit, sich an neue Entwicklungen und Veränderungen der energiewirtschaftlichen Rahmendaten anzupassen. Damit leistet die Energieforschungspolitik einen wichtigen Beitrag zu einer gesamtwirtschaftlichen Risikovorsorge.

3. Die Förderung ist Bestandteil der Gesamtpolitik der Bundesregierung. Sie dient auch der Verfolgung anderer politischer Ziele, insbesondere den Zielen der Wachstums- und Beschäftigungspolitik, der Umwelt- und Klimaschutzpolitik und der Forschungspolitik.

Das 5. Energieforschungsprogramm steht im Kontext der „Agenda 2010“ der Bundesregierung und ihrer Strategie für mehr Wachstum und Beschäftigung in Deutschland. Die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien zielt daher auch darauf ab, die Modernisierungs- und Anpassungsprozesse zu beschleunigen und die Attraktivität des Standort Deutschlands für Investition und Produktion zu verbessern.

1.3 Struktur und Leitlinien der Förderpolitik

Die Bundesregierung stützt sich bei der Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien auf zwei Instrumente:

- Die *Projektförderung*, d. h. die Förderung von zeitlich befristeten und inhaltlich definierten Forschungsvorhaben in Unternehmen, Forschungsinstituten und Universitäten, die eher anwendungs- und marktnah orientiert sind und deren erste praktische Anwendung demonstriert werden soll.

- Die *institutionelle Förderung* zielt nicht auf einzelne Vorhaben, sondern auf die Stärkung der Kompetenz der Forschungseinrichtungen und ihre langfristige strategische Ausrichtung in der Energieforschungslandschaft. Sie ist eher grundlagenorientiert angelegt und greift typischerweise Fragen auf, die wegen ihrer Komplexität, ihrer Größe und ihres Bedarfs von spezifischen Forschungsgeräten am Besten in den Großforschungszentren bearbeitet werden können.

Beide Instrumente ergänzen sich und werden oft gemeinsam genutzt. Zur Koordinierung gibt es zwischen den Ressorts standardisierte Abstimmungsprozeduren („Frühkoordinierung“) und speziell eingerichtete Beiräte (z. B. für Wasserstoff, Brennstoffzelle und für das Förderkonzept moderner Kraftwerkstechnologien „COORETEC“). Darüber hinaus gibt es Forschungsverbünde wie etwa den „ForschungsVerbund Sonnenenergie“, den „Kompetenzverbund Kernenergie“ und die AG Turbo, in der die kompetenten Unternehmen und Institute auf dem Gebiet der Gas- und Dampfturbinen zusammenarbeiten.

Der parallele Ansatz von Projektförderung und institutioneller Förderung sowie die damit verbundenen Abstimmungsprozesse haben sich bewährt.

Die Bundesregierung hat die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien wie folgt geordnet:

- Das *BMWA* hat auf Grund seiner Gesamtverantwortung für die Wirtschafts-, Industrie- und Energiepolitik die Federführung für die programmatische Ausrichtung der Energieforschungspolitik und ist zuständig für das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung.

Das BMWA ist weiter zuständig für die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung auf den Gebieten „Nichtnukleare Energieforschung“ (ohne erneuerbare Energien), „Rationelle Energieumwandlung“ sowie „nukleare Sicherheit und Endlagerung“. Diese Zuordnung liefert eine gute Grundlage für eine kohärente Politik der Bundesregierung in den Bereichen Kohle, Öl, Gas, Kernenergie, Strom sowie Energieeinsparung und rationelle Energieverwendung.

- Das *BMU* ist zuständig für die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der „erneuerbaren Energien“ (mit Ausnahme der Bioenergie). Mit dieser Zuordnung ist die Koordinierung und Abstimmung von politischen Maßnahmen im Bereich Forschung/Entwicklung und Markteinführung der erneuerbaren Energien in einem Haus zusammengeführt.

- Das *BMVEL* ist zuständig für die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Bioenergie. Diese Zuordnung ermöglicht eine besonders enge Verzahnung von Forschungspolitik und Landwirtschaftspolitik auf dem Gebiet der energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe.

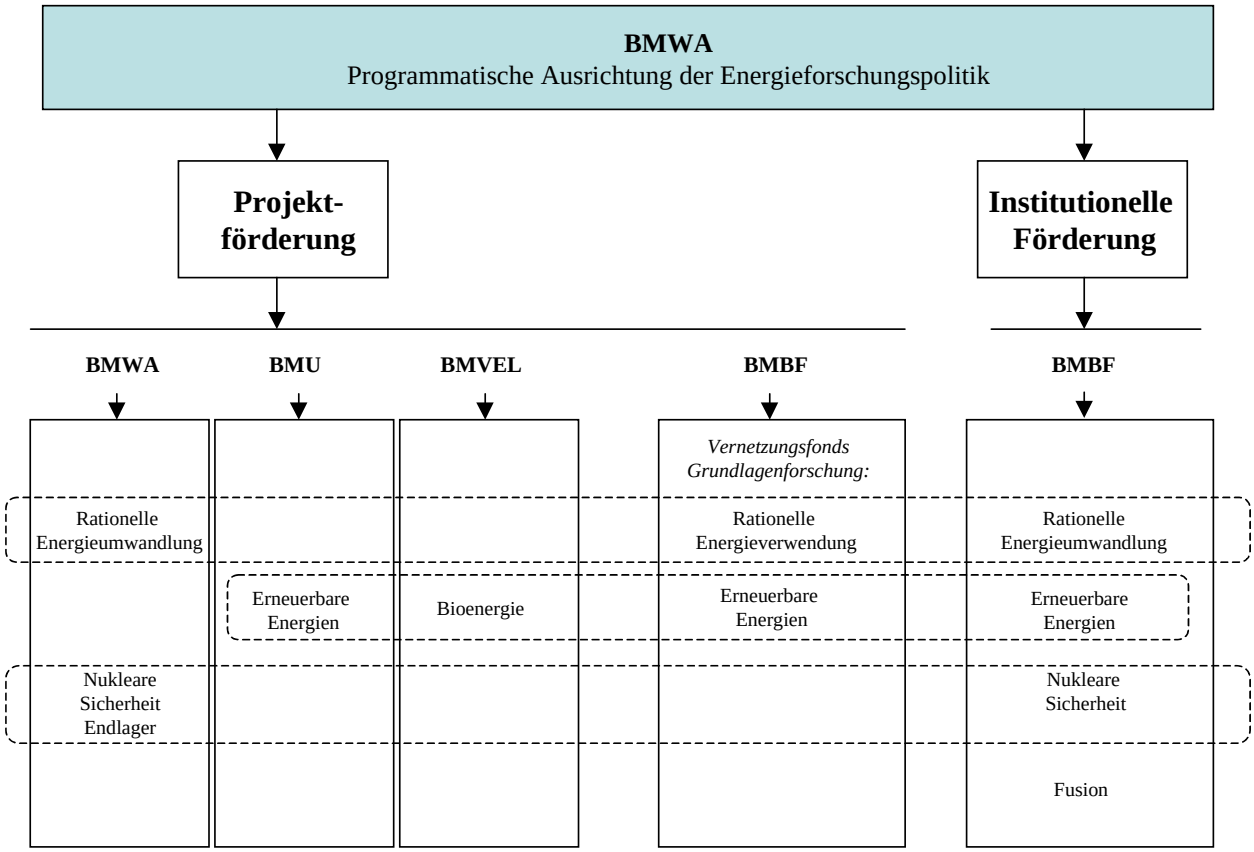
- Das *BMBF* ist zuständig für die institutionelle Förderung der Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft im Forschungsbereich "Energie" sowie für die Grundlagen- und Vorsorgeforschung einschließlich der Forschungsaktivitäten der Netzwerke „Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung“. Dies ermöglicht eine effektive Einbettung wesentlicher Teile der Energieforschung in die allgemeine Forschungspolitik. Von besonderem Gewicht ist die wirksame Vernetzung von Forschungsgebieten, die für Fortschritte im Bereich der Grundlagenforschung wichtig sind (Materialforschung, Nanotechnologie, Lasertechnologie, Mikrosystemtechnik, mathematische Modellierung).

Die Bundesregierung fördert Forschung und Entwicklung von modernen Energietechnologien auch außerhalb des Energieforschungsprogramms. Dabei handelt es sich um Ansätze und Vorhaben, bei denen andere politische oder fachliche Ziele vorrangig sind.

Typische Beispiele sind Forschungsvorhaben im Bereich der Mobilitätsforschung, der Luftfahrtforschung, der Umweltforschung, der Forschung für das Bau- und Wohnungswesen sowie spezifische Vorhaben im Rahmen der individuellen Ressortverantwortung. Sie dienen vielfach der

Politikberatung und sind wesentlicher Bestandteil der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur, die die Bundesregierung bereithält, wie z. B. bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Diese Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte werden in dem Energieforschungsprogramm der Bundesregierung nicht behandelt.

Abb. 1.4: Energieforschungsprogramm der Bundesregierung



Zur Festlegung der vorrangigen Forschungsfelder hat die Bundesregierung übergeordnete Leitlinien festgelegt. Sie zielen vor allem darauf ab, die Effizienz der Förderpolitik zu verbessern und einen möglichst hohen Mehrwert für den aus öffentlichen Mitteln bereitgestellten „Forschungs-Euro“ zu schaffen.

Folgende Überlegungen geben eine Orientierung:

- **Kontinuität**: Die Förderpolitik der Bundesregierung ist langfristig angelegt und gibt Wirtschaft und Wissenschaft Berechenbarkeit und Planungssicherheit für ihre eigenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

- **Fokussierung**: Die Fördermittel werden in erster Linie auf besonders innovative, langfristig Erfolg versprechende Energietechnologien konzentriert, die für den Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung in Deutschland wichtig sind.

- **Flexibilität**: Fortschritte bei Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien sind nicht planbar. Die Bundesregierung trifft daher ausreichende Vorsorge, um gegebenenfalls Mittel an bestimmten strategischen Stellen neu zu konzentrieren, sobald dort Möglichkeiten für einen energiewirtschaftlichen Durchbruch zu einer nachhaltigen Energieversorgung erkennbar werden.

- **Kooperation**: Die Zusammenarbeit von Wirtschaft, Wissenschaft und staatlicher Förderpolitik ist von außerordentlicher Bedeutung für eine erfolgreiche Entwicklung und Markteinführung neuer Energietechnologien. Die Förderpolitik der Bundesregierung im Energiebereich wird gemeinsam mit Wirtschaft, Wissenschaft und den für die Bundesregierung tätigen Projektträgern, die die Projektförderung im Auftrag der Bundesregierung umsetzen, entwickelt und fortgeschrieben. Auch die entsprechenden Förderprogramme der EU sowie der Bundesländer werden bei der Ausrichtung der Förderpolitik der Bundesregierung beachtet.

- **Wettbewerb:** Die Energieforschung muss - so weit wie möglich - im Wettbewerb organisiert werden. Dadurch ist es am besten möglich, neue Ansätze und Technologieverbesserungen zum Durchbruch zu bringen und die Leistungsfähigkeit der Energieforschung insgesamt zu verbessern.

- **Qualitätssicherung**: Um den hohen Stand von Forschung und Entwicklung im Energiebereich in Deutschland zu sichern und auszubauen, bedarf es der regelmäßigen Evaluierung und kontinuierlichen Optimierung von Strukturen, Regelungen und Entscheidungsverfahren. Das 5. Energieforschungsprogramm "Innovation und neue Energietechnologien" unterliegt diesem Evaluierungsprozess.

1.4 Internationale Zusammenarbeit

Alle Länder der Erde stehen heute vor der gleichen energiewirtschaftlichen Frage: Welche Technologien werden die Basis für den notwendigen Übergang zu einer weltweit nachhaltigen Ener-

gieversorgung bilden und welche Investitionen in Forschung und Entwicklung sind dazu notwendig?

Diese Ausgangslage und die Dringlichkeit der Umstrukturierung der weltweiten Energieversorgung im Interesse einer nachhaltigen Entwicklung und des Klimaschutzes legen eine internationale Zusammenarbeit bei Forschung und Entwicklung besonders nahe. Das gilt vor allem für eine Zusammenarbeit im Bereich der Grundlagenforschung und den vorwettbewerblichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Die internationale Kooperation bei Forschung und Entwicklung muss sich an die neuen Rahmendaten anpassen, die sich aus der Globalisierung und der Öffnung der Märkte ergibt. Zwei Trends sind dabei von besonderer Bedeutung:

- Energietechnologien werden heute für den Weltmarkt entwickelt. Durch den Abbau von Handelsschranken, die Liberalisierung des Kapitalverkehrs und die enormen Verbesserungen der Transportsysteme ist es möglich geworden, dass die gleichen Energietechnologien an nahezu jeder Stelle der Erde hergestellt werden können. Konsequenterweise drängen die Hersteller von Kraftwerken, Windkraftanlagen, Solarpaneelen, Feuerungsanlagen, Motoren, Elektrogeräten u. a. immer mehr zu den Standorten, wo diese Anlagen am kostengünstigsten hergestellt werden können.
- Den Veränderungen auf den Produktmärkten entspricht eine ständig wachsende Mobilität des technischen Wissens und der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der weltweit agierenden Industrie. Zu beobachten ist ein immer härterer Wettbewerb um die „Köpfe“ und das damit verbundene „technologische Know-how“.

Beide Entwicklungen sind eng miteinander verbunden. Gute Produktionsstandorte ziehen die mobilen Forschungskapazitäten an und gute Forschungsstandorte sind Grundlage für eine Ansiedlung von Produktionskapazitäten. Die Bundesregierung unterstützt daher die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Energieforschung nicht nur um die Kooperationsmöglichkeiten für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft zu verbessern, sondern auch um Investitionsanreize zu Gunsten von Wachstum und Beschäftigung in Deutschland zu stärken.

Im Einzelnen sind folgende Gesichtspunkte wichtig:

- Forschung und Entwicklung brauchen den Austausch mit der wissenschaftlichen und technologischen Fachwelt im internationalen Rahmen, um Spitzenergebnisse zu erbringen und die Wettbewerbsfähigkeit von Wissenschaft und Wirtschaft zu erhalten.
- Sehr große Vorhaben erzwingen eine internationale Arbeitsteilung, um Entwicklungsrisiken zu minimieren und das Projekt insgesamt finanzierbar zu machen.
- Kooperation ist ein zentrales Instrument, um Doppelarbeit zu vermeiden und die eigenen Ressourcen möglichst effizient zu nutzen.
- Deutschland hat als starke Exportnation ein besonderes Interesse, an den technologischen Standards für Energietechnologien mitzuwirken.

Wesentliche Arbeitsgrundlage für internationale Kooperationen im Rahmen von Forschung und Entwicklung sind die bilateralen WTZ-Abkommen (wissenschaftliche-technologische Zusammenarbeit) im Zuständigkeitsbereich des BMBF. In Rahmenabkommen vereinbaren beide Regierungen z. B. die Finanzierung von Personalaustausch und Erleichterungen bei Zollformalitäten.

Die internationale Zusammenarbeit zwischen Deutschland und seinen Partnern konzentriert sich im Energiebereich auf drei unterschiedliche Ebenen: die Zusammenarbeit im Rahmen der Internationalen Energieagentur (IEA), die Zusammenarbeit im Rahmen der Europäischen Union (EU) sowie die Zusammenarbeit im Rahmen internationaler Kooperationsprojekte mit ausgewählten Ländern (die allerdings in aller Regel direkt oder indirekt in Verbindung zu Forschungsaktivitäten der IEA oder EU stehen).

Die *Internationale Energieagentur* hat seit ihrer Gründung 1974 organisatorische Strukturen für die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Energietechnologien bereitgestellt [2]. Dazu gehören:

- der Ausschuss für Energieforschung und Technologie (Committee on Energy Research and Technology - CERT), der die politische Zusammenarbeit der F&E-Aktivitäten der IEA-Mitgliedsländer koordiniert,
- die sog. „Working-Parties“, in denen der fachspezifische Meinungsaustausch stattfindet (zur Zeit gibt es vier Arbeitsgruppen: Fossile Energietechnologien, erneuerbare Energien, Endverbrauchstechnologien und Fusionsenergie), und

- die spezifischen Forschungsprogramme (Implementing Agreements), in denen die eigentliche Arbeit auf wissenschaftlich/industrieller Ebene geleistet wird. Deutschland ist zur Zeit an 20 der insgesamt 42 „Implementing Agreements“ beteiligt.

Die Bundesregierung betrachtet die Aktivitäten der IEA bei Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien als einen wichtigen Beitrag für den angestrebten Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung und wird die Arbeiten auf diesem Gebiet weiter unterstützen.

Die *Europäische Union* fördert Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien auf der Basis sog. Forschungsrahmenprogramme [1]. Grundlage für die aktuelle Förderpolitik der EU im Bereich der nicht-nuklearen Energieforschung ist das 6. Rahmenprogramm: „Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration als Verwirklichung des Europäischen Forschungsraums und zur Innovation“ und das darin enthaltene Teilprogramm „Nachhaltige Energiesysteme“ (2002 – 2006).

Die strategischen Ziele der Europäischen Energieforschung sind die Reduzierung von Treibhausgasen und anderen Schadstoffen, die Sicherheit der Energieversorgung, der verstärkte Einsatz von erneuerbaren Energien sowie die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit der Europäischen Industrie. Dafür stehen für die gesamte Laufzeit des Programms 810 Mio. € zur Verfügung. Gefördert werden im Bereich „kurz- bis mittelfristiger Maßnahmen“ erneuerbare Energietechnologien, Energieeffizienztechnologien und alternative Kraftstoffe sowie in dem Bereich „mittel- bis langfristiger Maßnahmen“ die Brennstoffzelle, Wasserstoff, neue Konzepte für erneuerbare Energien sowie CO_2-Abtrennung und Speicherung.

Neben Fördermaßnahmen für nicht-nukleare Energietechnologien fördert die EU auch nukleare Energietechnologien auf der Basis des EURATOM-Vertrages. Hierfür stehen über den Zeitraum 2002 – 2006 rd. 1,23 Mrd. € zur Verfügung. Diese Mittel werden genutzt zur Forschung auf dem Gebiet der Kernfusion, der Entsorgung radioaktiver Abfälle, des Strahlenschutzes und für andere Vorhaben aus dem Bereich nuklearer Technologien.

Die Abstimmung der nationalen Energieforschung mit den Programmen der EU ist von großer Bedeutung. Deutschland hat sich an der Aufstellung der EU-Programme aktiv beteiligt und wirkt in den einschlägigen Programmkomitees an der Programmabwicklung mit, um eine stets optimale Arbeitsteilung zwischen nationaler Energieforschung und den EU-Programmen sicherzustel-

len. Dieses Engagement, die gute Betreuung der deutschen Antragssteller durch die von der Bundesregierung finanzierten Kontaktstellen und die – nicht zuletzt durch die staatliche Förderpolitik erreichte - hohe Qualität der deutschen Energieforschung haben dazu beigetragen, dass Deutschland in der ersten Ausschreibungsrunde des 6. Forschungsrahmenprogramms wieder eine herausragende Beteiligung erreichen konnte.

Die Bundesregierung wird die Arbeiten zur Umsetzung des sog. „Europäischen Forschungsraumes“ weiter unterstützen. Bei den Vorbereitungen an dem 7. EU-Forschungsrahmenprogramm (2006 – 2010) wird die Bundesregierung darauf dringen, die Kräfte noch stärker auf Projekte mit klarer „europäischer Dimension“ zu bündeln und wie in Deutschland Technologien und Strategien aus den Bereichen "Energieeffizienz" und "erneuerbare Energien" zu stärken und damit zu einer nachhaltigen Energieversorgung in Europa beizutragen.

Mit Blick auf *internationale Kooperationsprojekte* im Bereich der nicht-nuklearen Energieforschung sind zwei Vorhaben von aktueller Bedeutung:

- *Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF):* Auf Einladung des US-Energieministeriums (DOE) haben 13 Staaten und die EU-Kommission im Juni 2003 das CSLF gegründet mit dem Ziel, die Abtrenn- und Speichertechnologien von CO_2 gemeinsam voranzubringen und deren weltweiten Einsatz auszuloten [3]. Deutschland ist mit Unterzeichung der Charta durch das BMWA im Dezember 2003 beigetreten. Die Laufzeit ist zunächst auf 10 Jahre bis 2013 angelegt.

- *International Partnership for the Hydrogen-Economy (IPHE):* Auf Initiative der US-Ministerien für Energie (DOE) und Verkehr (DOT) wurde diese Partnerschaft im November 2003 von 15 Staaten und der EU-Kommission gegründet [4]. Ziel ist die beschleunigte Entwicklung und Einführung der Wasserstoff-Wirtschaft, insbesondere im Verkehrsbereich, um die Abhängigkeit von Erdölimporten zu verringern. Während das BMWA wegen seiner Zuständigkeit für Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Wasserstoffs bei den Ministertreffen vertreten ist, haben BMWA und BMVBW im Steuerungskomitee Sitz und Stimme. Im „Liason and Implementation Committee“ (LIC), das die technische Kooperation, insbesondere auch mit der Wirtschaft, organisieren soll, hat Deutschland gemeinsam mit Island den Vorsitz. In diesem wichtigen Komitee ist auch ein Bundesland (zunächst NRW) vertreten. Diese internationale Initiative zur Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft hat

seine Entsprechung in gleich gerichteten Aktivitäten bei der IEA (IEA-Hydrogen Coordination Group) und der EU (EU-Hydrogen and Fuel Cell Technology Platform).

Literatur

[1] EU (2002): Sechstes Rahmenprogramm der Europäischen Gemeinschaft im Bereich der Forschung, technologischen Entwicklung und Demonstration als Beitrag zur Verwirklichung des Europäischen Forschungsraumes und zur Innovation, Brüssel
[2] IEA (2003): Implementing Agreements, Background and Framework, Paris
[3] http://www.cslforum.org
[4] http://www.usae.org/iphe.htm

1.5 Finanzieller Rahmen

Die Bundesregierung hat 1974 zum ersten Mal ein Gesamtkonzept für die Energieforschung vorgelegt (Rahmenprogramm Energieforschung 1974 – 1977). Dieses Programm wurde mehrfach fortgeschrieben und den aktuellen Entwicklungen angepasst. Die letzte Fortschreibung stammt aus dem Jahr 1996 (4. Programm: Energieforschung und Energietechnologien).

Der Bund hat von 1974 bis 2003 beträchtliche finanzielle Beträge für die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien zur Verfügung gestellt. Mit diesen Mitteln konnte nicht nur eine leistungsfähige Forschungsinfrastruktur aufgebaut werden, sie sind auch für den hohen Stand der Forschung auf dem Gebiet der Energietechnologien in Deutschland und für die beachtlichen Exporterfolge auf diesem Gebiet verantwortlich. Darüber hinaus wurden beachtliche Vorleistungen erbracht, die heute in vielen Technologiebereichen eine Weiterentwicklung mit geringen Fördervolumina zulassen, ohne dass dadurch der Erfolg der Förderpolitik in Frage gestellt wird.

Allerdings: Fortschritt hat einen Preis. Ohne beständige Investitionen in Forschung und Entwicklung wird man auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung nicht vorankommen. Stetigkeit und Kontinuität der Finanzausstattung sind von zentraler Bedeutung. Die Bundesregierung sieht dabei auch die Wirtschaft in der Verantwortung, einen angemessenen Beitrag für Forschung und Entwicklung zu leisten. Mit der 2004 ins Leben gerufenen „Innovationsinitiative“ hat die Bundesregierung eine neue Grundlage für partnerschaftliches Handeln auf diesem Feld geschaffen.

Im Rahmen des Energieforschungsprogramms wird die Bundesregierung in den kommenden vier Jahren (2005 – 2008) rd. 1,7 Mrd. € für die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien bereitstellen. Damit werden Forschungsinvestitionen in beachtlicher Höhe bei der Wirtschaft, vor allem bei kleinen und mittleren Unternehmen, induziert.

In dem 5. Energieforschungsprogramm „Innovation und neue Technologien" setzt die Bundesregierung deutliche Akzente zu Gunsten der Bereiche „Energieeffizienz" und „erneuerbare Energien". Diese Schwerpunktverlagerung wird bei den Verschiebungen in dem Forschungsbudget sichtbar.

Tab. 1.2: Forschung und Entwicklung im Energieforschungsprogramm (Tsd. €)

	Ist	**Soll**	**Plandaten[1)]**			
	2003	2004	2005	2006	2007	2008
BMWA						
Rationelle Energieumwandlung	65.958	78.496	71.244	70.994	70.994	70.994
Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung	24.125	25.500	23.605	23.480	23.480	23.480
BMU						
Erneuerbare Energien	67.798	60.083	80.394	83.366	88.366	93.366
BMVEL						
Bioenergie	5.422	5.117	10.000	10.000	10.000	10.000
BMBF						
Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft						
Rationelle Energieumwandlung	36.621	39.607	42.155	42.012	42.134	44.270
Erneuerbare Energien	24.396	26.442	28.267	28.307	28.613	30.271
Nukleare Sicherheitsforschung	29.260	31.178	31.147	31.133	31.126	31.022
Fusionsforschung	115.298	115.000	115.000	115.000	115.000	114.900
Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung	6.600	9.830	11.100	10.100	10.100	10.100
Summe	**375.478**	**391.253**	**412.912**	**414.392**	**419.813**	**428.403**

[1)] Zahlen 2005 - 2008 enthalten zum Teil Mittel aus der Innovationsinitiative der Bundesregierung; sie stehen unter dem Vorbehalt der Bewilligung durch das Parlament

Die in dem Energieforschungsprogramm angesetzten Finanzmittel stehen unter dem Vorbehalt der Bewilligung durch das Parlament. Änderungen im Haushalt bzw. der Finanzplanung implizieren Änderungen in der Programmgestaltung.

2. Programmschwerpunkte

Die Bundesregierung verfolgt in ihrem Energieforschungsprogramm eine Doppelstrategie: Die gezielte Förderung von ausgewählten „Schlüsseltechnologien“ mit individuell den jeweiligen politischen Vorgaben angemessenen Fördermitteln und eine „breitere Technologieförderung“ mit geringerem finanziellen Einsatz. Dieses parallele Vorgehen stellt sicher, dass neben den notwendigen Erfolgen in energiewirtschaftlich herausgehobenen Technologiefeldern auch immer wieder neue Produkte, Verfahren und Entwicklungen in die Förderung einbezogen werden können.

Bei den Entscheidungen über „vorrangige“ und „nachrangige“ Förderbereiche hat die Bundesregierung eine Vielzahl von Informationen einbezogen. Zu den wichtigsten gehören:

- Analysen und Bewertungen des 4. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung, wie etwa der Bericht der Evaluierungskommission „Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung“ aus 2000, die Ergebnisse der Evaluierung der Energieforschung in den Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft im Zuge der Einführung der programmorientierten Förderung in 2003 sowie die Bewertung ausgewählter Bereiche des nicht-nuklearen Teils des Energieforschungsprogramms durch den Projektträger Jülich in 2003.

- Empfehlungen und Stellungnahmen zur Weiterentwicklung der Energieforschung, hier insbesondere die Stellungnahme des Wissenschaftsrates zur Energieforschung 1999, die Ergebnisse der Beratungen der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung“ von 2001, die gemeinsame Erklärung von Wissenschaft und Wirtschaft zur Energieforschung vom 2. Oktober 2001, das Eckpunktepapier des „ForschungsVerbunds Sonnenenergie“ für ein neues Energieforschungsprogramm der Bundesregierung vom März 2003, die Empfehlungen der Sachverständigen bei der öffentlichen Anhörung durch den Ausschuss für Bildung, Forschung und Technologiefolgenabschätzung des Deutschen Bundestages zu den „Prioritäten einer innovativen Energieforschung – Stand und Perspektiven“ am 11. Februar 2004 sowie die Empfehlungen des Rates für Nachhaltige Entwicklung vom November 2004.

Die folgenden Fachkapitel geben einen Überblick über die Förderaktivitäten der am Energieforschungsprogramm der Bundesregierung beteiligten Ressorts. Sie erläutern in systematischer

Weise den energiewirtschaftlichen Stellenwert der einzelnen Technologien und informieren über den Stand der Forschung und die künftigen Förderschwerpunkte.

2.1 Energieforschung BMWA

2.1.1 Rationelle Energieumwandlung

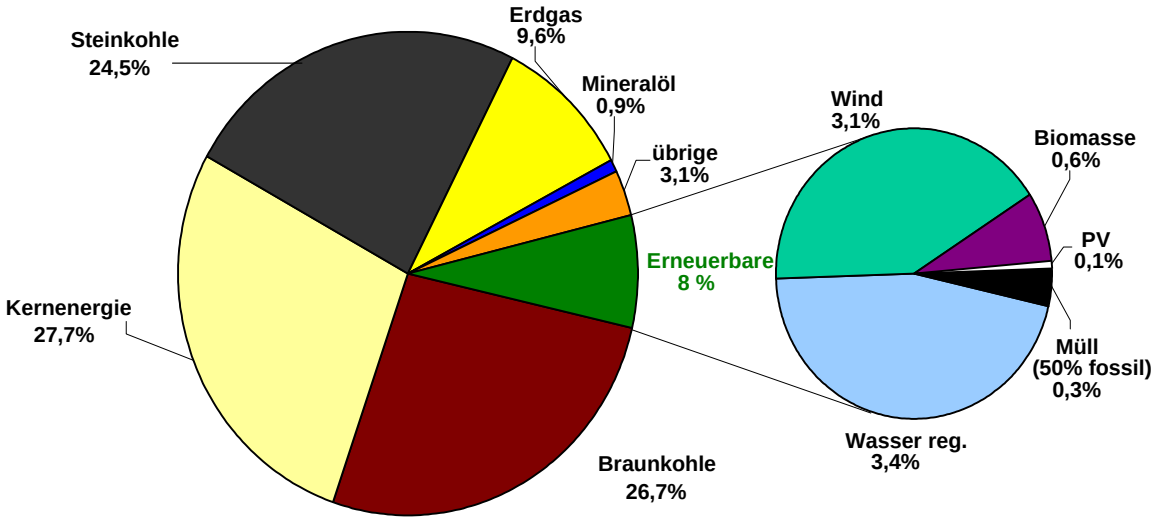
2.1.1.1 Kraftwerkstechnik auf Basis Kohle und Gas

Eine moderne Industrie-, Informations- und Dienstleistungsgesellschaft ist ohne Strom nicht vorstellbar. Das macht den Bereich der Stromerzeugung zu einem wichtigen forschungspolitischen Bereich. Für erste strategische Überlegungen sind vor allem die Ausgangslage bei den heute zur Stromerzeugung eingesetzten Energieträgern sowie die längerfristigen Perspektiven der verschiedenen Stromerzeugungstechnologien wichtig.

Deutschland verfügt über eine differenzierte Struktur der Stromversorgung. Für das Jahr 2003 ergeben sich folgende Daten:

- Stein- und Braunkohle sind die wichtigsten Energieträger. Sie tragen mit rd. 51 % nach wie vor die Hauptlast bei der Stromerzeugung (Braunkohle 27 %, Steinkohle 24 %).
- Der Beitrag der Kernenergie ist tendenziell rückläufig und liegt gegenwärtig bei 28 %.
- Erdgas gewinnt an Bedeutung und trägt mit rd. 10 % zur Stromerzeugung bei.
- Erdöl spielt bei der Stromerzeugung praktisch keine Rolle.
- Der Anteil der erneuerbaren Energien liegt bei 8 %, wobei Wasser und Wind zur Zeit die mit Abstand wichtigsten erneuerbaren Energieträger bei der Stromerzeugung sind.

Abb. 2.1: Bruttostromerzeugung in Deutschland 2003



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

Die Struktur der Stromerzeugung Deutschlands wird sich in den kommenden Jahren stark verändern. Richtung und Dynamik werden vor allem bestimmt durch:

- die Liberalisierung des Strom- und Gasmarktes, die schon seit einiger Zeit ein stärkeres Engagement der Versorgungsunternehmen in Richtung auf Kostendisziplin und Wirtschaftlichkeit zeigt,
- die Vereinbarung der Bundesregierung mit den Energieversorgungsunternehmen vom 11. Juni 2001 zur geordneten Beendigung der Nutzung der Kernenergie, die bis spätestens 2025 einen Ersatz von rd. 20.000 MW notwendig macht,
- die Altersstruktur des gegenwärtigen Kraftwerksparks, die auf einen Ersatzbedarf einschließlich des Ersatzes der Kernenergie von rd. 40.000 MW zwischen 2010 und 2020 hinweist,
- die Zielvorgabe der Bundesregierung, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung bis 2010 auf mindestens 12,5 % bzw. bis 2020 auf 20 % zu steigern sowie
- die Regelungen des nationalen Allokationsplans zum Emissionshandel, der über den Beitrag der Stromwirtschaft zu der von der Bundesregierung angestrebten Verminderung der CO_2-Emissionen und der anderen treibhausrelevanten Spurengase entscheidet.

Wichtigste Aufgabe von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Kraftwerkstechnik ist es, dazu beizutragen, dass die Nutzung von Kohle und Gas zur Stromerzeugung mit den Anforderungen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit zur Deckung gebracht werden kann. Unter dieser Vorgabe verfolgt die Politik zwei sich ergänzende strategische Linien, die in sachgerechter Weise die Ergebnisse der projektorientierten Forschungsförderung des BMWA und die vom BMBF geförderte Grundlagenforschung zusammenführt:

- *Strategielinie 1 (Energieeffizienz)*: Der Prozess der Stromerzeugung muss weiter verbessert werden, mit dem Ziel, Kohle und Gas so effizient wie möglich zu nutzen.

- *Strategielinie 2 (CO_2-Speicherung)*: Das bei der Stromerzeugung entstehende CO_2 muss – soweit wirtschaftlich und ökologisch vertretbar – abgefangen und abgetrennt von der Atmosphäre sicher gespeichert werden.

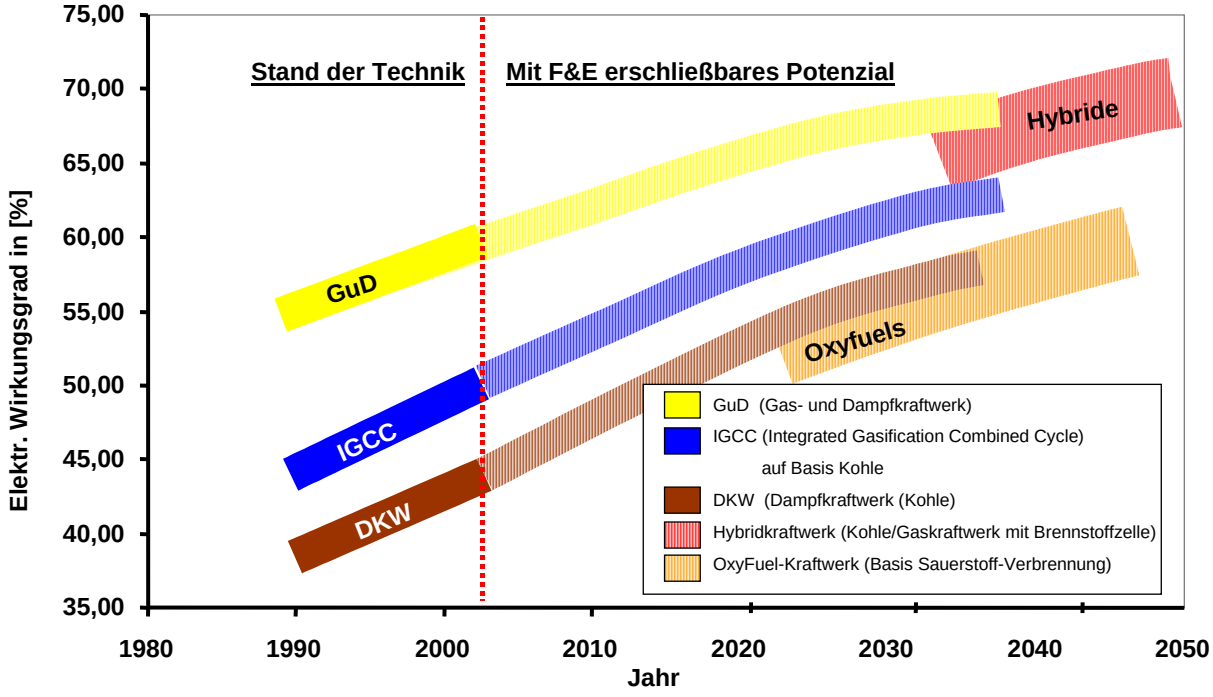
Mit diesem parallelen Vorgehen setzt die Bundesregierung die Empfehlungen des mit Wirtschaft und Wissenschaft gemeinsam entwickelten COORETEC-Konzepts (CO_2-Reduktions-

Technologien) um, das wegen seines wegweisenden Charakters und seinen praktischen Vorschlägen zu den Förderprioritäten auch international Beachtung gefunden hat [1] .

Die Verbesserung der Energieumwandlung stellt die konzeptionelle Fortsetzung der bisherigen Forschungsschwerpunkte dar. Seit 1985 konnten die Wirkungsgrade von Dampfkraftwerken um 20 % verbessert werden. Bei Dampfkraftwerken auf Basis Steinkohle werden heute Wirkungsgrade von 47 % erreicht. Die Wirkungsgrade von Gas- und Dampfkraftwerken liegen bei 58 %, die von Braunkohlekraftwerken bei über 43 %. Das weltweit modernste Braunkohlekraftwerk hat im Herbst 2002 in Niederaußem seinen Betrieb aufgenommen und erreicht einen Wirkungsgrad von 43,5 %. Dieses neue Kraftwerk emittiert pro kWh 30 % weniger CO_2 als die außer Dienst gehenden Altanlagen. Gleichzeitig ist bei der neuen Anlage die nahezu 100 %ige Entstaubung, 90 %ige Entschwefelung und 70 %ige Entstickung gelungen.

Die Bundesregierung will durch Förderung von Forschung und Entwicklung dazu beitragen, dass die Wirkungsgrade der gängigen Kraftwerkstypen bis 2020 um bis zu 20 % gesteigert werden. Das würde ein Wirkungsgradniveau beim Dampfkraftwerk von ca. 55 % und beim GuD-Kraftwerk von ca. 65 % bedeuten. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, die Prozessparameter Druck und Temperatur zu erhöhen und die Verluste über die gesamte Umwandlungskette zu vermindern.

Abb. 2.2: Wirkungsgradpotenziale ausgewählter Kraftwerkskonzepte



Im einzelnen wird sich die Förderpolitik auf folgende Schwerpunkte konzentrieren:

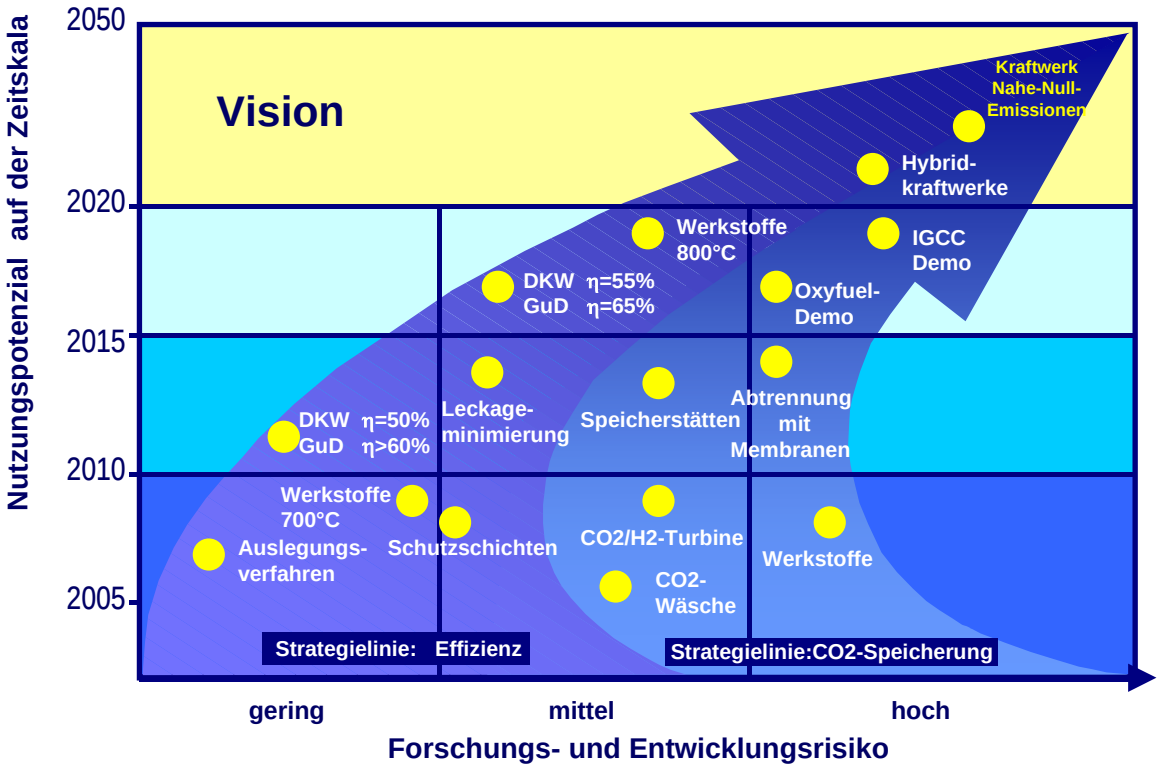
- Für das Dampfkraftwerk werden Werkstoffe benötigt, die Frischdampfzustände von über 700 °C und bis zu 400 bar Druck vertragen können. Für diese Bedingungen müssen neue Verbindungs- und Dichttechniken erforscht werden. Das Thema Dampfkorrosion bekommt bei derartigen Temperaturniveaus eine neue Dimension. Hier müssen neue Schutzschichten als Temperatur- und Korrosionsschutz entwickelt werden. Die angewandte Materialforschung stützt sich hierbei auf die durch das BMBF geförderte institutionelle Forschung bei den Großforschungseinrichtungen. Durch Verbesserung der Simulationswerkzeuge lassen sich die Entwicklungszyklen und -kosten deutlich senken. Dies trägt zur Senkung der Herstellungskosten bei. Die Akzeptanz der neuen Technologien hängt in starkem Maße davon ab, wie störanfällig die Technologie ist. Hier gibt es neue technische Herausforderungen im Bereich der Brennkammer. Die hohen Temperaturniveaus in der Brennkammer bewirken veränderte Entstehungsmechanismen der Stickoxidbildung und der Verschlackung. Dazu kommt die Anforderung, dass die Brennkammer ihre Eignung für unterschiedliche Kohlenqualitäten und -zusammensetzungen nachweisen muss. Das erfordert grundlegende Untersuchungen zum Verständnis der Mineralentstehung, der Abbrandmechanismen sowie der Luft- und Brennstoffverteilung.

- Beim GuD-Kraftwerk kommt zusätzlicher Forschungsbedarf in den Bereichen Gasturbine, Verdichter, Lebensdauer und Betriebszyklen hinzu. Es gilt den Kühlluftbedarf mit neuen Kühlungskonzepten zu reduzieren. Die aerothermodynamischen Eigenschaften der Turbokomponenten sind zu verbessern. Auch hier bildet die institutionelle Forschung des BMBF die Basis für die durch das BMWA unterstützten Forschungsaktivitäten. Aufgrund stetig steigender Anforderungen hinsichtlich Flexibilität sind Wechselwirkungen von Wirkungsgrad, Lebensdauer, Emissionen, Lastwechsel, Lastzustand und Anfahrvorgängen zu untersuchen und in künftige Auslegungsprozeduren zu integrieren.

Analysen zeigen, dass eine Verbesserung der Wirkungsgrade der fossilen Kraftwerke alleine nicht ausreicht, um das Ziel einer sicheren Stromversorgung mit den vorgegebenen klimapolitischen Zielen in Übereinstimmung zu bringen. Die Bundesregierung wird daher ihre Forschungsaktivitäten im Bereich „Kraftwerkstechnik“ auf die Technologien und Verfahren zur Abtrennung des CO_2 am Kraftwerk und seine sichere Speicherung erweitern.

Aus dem Bereich der chemischen Industrie sind Verfahren bekannt, die sich prinzipiell für eine CO_2-Abtrennung am Kraftwerk eignen. Diese Verfahren besitzen aber Nachteile. Die Nachteile bestehen vor allem in Wirkungsgradeinbußen in der Größenordnung von 10 bis 15 %-Punkten und hohen Zusatzkosten, die die Stromgestehungskosten verdoppeln können. Die künftigen Forschungsaktivitäten zielen auf die Minderung dieser nachteiligen Nebeneffekte.

Abb. 2.3: Ausrichtung der Forschung im Bereich Kraftwerkstechnik



In COORETEC werden zwei Konzeptlinien bei der CO_2-Abtrennung verfolgt:

- Wenn das CO_2 am Rauchgasende abgefangen werden soll, bieten sich sogenannte Oxyfuel-konzepte an. Die Luft wird vor dem Kraftwerk in ihre Hauptbestandteile zerlegt und die Kohle mit reinem Sauerstoff verbrannt. Mit diesem Konzept lassen sich dann auch die Stickoxide im Abgas deutlich senken. Schlüsseltechnologien zielen auf kostengünstige Verfahren zur Luftzerlegung. Insbesondere spezielle Sauerstoffmembranen bieten das Potenzial für einen Technologiesprung und Möglichkeiten der Kostenreduktion.
- Eine andere Möglichkeit erschließt sich über die Kohlevergasung. Der Vergasungsprozess gestattet die Abtrennung des CO_2 bereits vor der Verbrennung. Anlagen mit integrierter

Kohlevergasung befinden sich in der Erprobung (Europäische Demonstrationsanlagen in Puertollano, Spanien und Buggenum, Niederlande). Dieses Konzept würde im übrigen eine zusätzliche Option für die Kraftstoffversorgung eröffnen, indem das Synthesegas zur Gewinnung synthetischer Treibstoffe genutzt werden kann. Langfristig wäre damit eine zumindest teilweise Befreiung des Verkehrssektors aus seiner nahezu vollständigen Abhängigkeit vom Erdöl denkbar. Die Fortentwicklung dieser Technologielinie mündet in sogenannte Hybridkraftwerke, in denen man die klassische Kraftwerkstechnik mit der neuen Brennstoffzellentechnologie verbindet. Diese Kombination erlaubt dann die praktisch emissionsfreie Erzeugung von Elektrizität (oder anderen Produkten) auf höchstem Wirkungsgradniveau. Für die Realisierung sind Gas-Trennmembranen für Sauerstoff, CO_2 und Wasserstoff erforderlich. Es sind neue Gasturbinen für Wasserstoff als Arbeitsfluid zu entwickeln. Heute sind die thermophysikalischen Kenntnisse von Sauerstoff, CO_2 und Wasser als Arbeitsmedium noch unzureichend. Gesicherte Kenntnisse über das Werkstoffverhalten auf CO_2/H_2O Gemischen gibt es noch nicht.

Da Abtrenntechnologien von CO_2 nur Sinn in Verbindung mit geeigneten CO_2-Speichern machen, ist die enge Anbindung der Speicheruntersuchungen an die Kraftwerksforschung notwendig. Es fehlen zur Zeit insbesondere gesicherte geologische Daten zu Speicherkapazitäten und deren Langzeit-Sicherheit in Deutschland. Hier muss eine katasterartige Erfassung erfolgen. Der Einschluss des CO_2 und die Thermodynamik der Mineralbildung müssen besser verstanden werden, um Simulationen von Speicherszenarien und Sicherheitsanalysen realitätsnah gestalten zu können.

Literatur

[1] BMWA (2003): Bericht COORETEC der Arbeitsgruppen. BMWA Dokumentationsreihe Nr. 527, Berlin

2.1.1.2 Brennstoffzellen

Die grundlegenden Untersuchungen zur Brennstoffzelle liegen mehr als 150 Jahre zurück. Das Prinzip der Brennstoffzelle ist einfach. Bei der Verschmelzung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser wird in einem einzigen Prozessschritt elektrische Energie und Wärme gewonnen. Die heute üblichen Dampfprozesse benötigen zur Erzeugung elektrischer Energie im Gegensatz dazu

mehrere hintereinander folgende Prozessschritte (Verbrennung der Primärenergie, Dampfturbine, Generator).

Daraus ergeben sich folgende grundsätzliche Vorteile für die Brennstoffzelle:

- hohe elektrische Wirkungsgrade durch die direkte Umwandlung der Kraftstoffe,
- Eignung zur Kraft-Wärme-Kopplung und damit hohe Ausnutzung der Primärenergie,
- potenziell schadstofffreier Betrieb.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Brennstoffzelle erstrecken sich von der Stromversorgung von portablen Systemen über den Antrieb von Fahrzeugen bis zur dezentralen Strom- und Wärmeerzeugung. Der portable Einsatz ist energiewirtschaftlich kaum relevant. Es werden jedoch bei der Marktdurchdringung dieser Systeme erhebliche Synergieeffekte für die Weiterentwicklung der Brennstoffzelle in den anderen Einsatzfeldern erwartet.

Brennstoffzellen werden entweder direkt mit Wasserstoff als Energieträger, der aus vielen Primärenergieträgern gewonnen werden kann, oder mit Erd- oder Biogas versorgt, das in einem vorherigen Reformierungsprozess in ein wasserstoffreiches Gas umgewandelt wird. Letzteres wird für die dezentrale Stromerzeugung bevorzugt, während man für das Brennstoffzellenfahrzeug den direkten Einsatz von Wasserstoff favorisiert. Damit wird von der Brennstoffzelle ein nicht unerheblicher Beitrag zur Verringerung der Abhängigkeit des Verkehrs vom Erdöl erwartet. Bei der Kraft-Wärme-Kopplung können durch den Einsatz von Erd- oder Biogas bereits kurzfristig CO_2-Emissionen reduziert werden. Langfristig sollen durch die Verwendung von regenerativ gewonnenem Wasserstoff sowohl in der mobilen als auch in der stationären Anwendung der Brennstoffzelle die CO_2-Emissionen völlig vermieden werden. Die Brennstoffzelle gilt daher als Schlüsseltechnologie einer nachhaltigen Energieversorgung.

Trotz des breiten Verwendungspotenzials muss sich die Brennstoffzelle in allen Anwendungsfeldern gegen ausgereifte und lange am Markt etablierte Technologien wie Batterien, Verbrennungsmotoren und herkömmliche Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen durchsetzen. Strategische Überlegungen zu einer erfolgreichen Markteinführung müssen sich an folgenden Kostenzielen orientieren:

- portable Brennstoffzelle 1.500 – 2.500 €/kW,
- stationäre Brennstoffzelle 1.000 – 1.500 €/kW,

- mobile Brennstoffzelle 50 – 150 €/kW.

Die heutigen Kosten für Brennstoffzellen liegen noch um den Faktor 5 bis 50 höher. Es sind daher wesentliche Kostensenkungen erforderlich, die nicht allein durch Massenfertigung zu erreichen sind. Dieses bedarf vielmehr erheblicher F&E-Anstrengungen [1]. Vorrangige Ziele sind eine Verlängerung der Lebensdauer der Brennstoffzellen und eine deutliche Senkung der Systemkosten.

Die Entwicklung der Brennstoffzellentechnik wird derzeit weltweit intensiv vorangetrieben. Die Bundesregierung wird die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Brennstoffzellen auf die Technologiefelder und deren Anwendungsbereiche konzentrieren, bei denen aus heutiger Sicht die größten Chancen auf eine schnelle Marktumsetzung bestehen:

- im Hochtemperaturbereich die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) und die Oxidkeramik-Brennstoffzelle (SOFC) und
- im Niedertemperaturbereich die Polymer Elektrolyt Membran Brennstoffzelle (PEMFC) und als eine Variante der PEMFC die Direkt Methanol Brennstoffzelle (DMFC).

Abb. 2.4: Hot Modul der MTU CFC Solutions GmbH

Die MCFC wird seit nahezu 15 Jahren in Deutschland für die stationäre Strom- und Wärmeerzeugung im Leistungsbereich von etwa 250 kW_{el} entwickelt. Sie eignet sich aufgrund ihrer hohen Temperaturen insbes. auch zur Nutzung von Erdgas, Kohle- oder Biogas. Die MCFC gilt als der am weitesten fortgeschrittene Brennstoffzellentyp, dessen Marktreife in wenigen Jahren erreicht sein dürfte. Das von MTU CFC Solutions GmbH als Technologieführer der MCFC ent-

wickelte Konzept des Hot Moduls (Abb. 2.4) wurde zwischenzeitlich um eine eigene Zelltechnologie erweitert, so dass das Know-how für nahezu die gesamte Wertschöpfungskette in Deutschland vorhanden ist. Aus den in den letzten Jahren errichteten Demonstrationsanlagen werden wichtige Erkenntnisse über das Verhalten der Anlagen unter realistischen Betriebsbedingungen erwartet. Trotz aller technologischen Erfolge sind noch erhebliche Verbesserungen notwendig, die auch in Zukunft größere Anstrengungen in Forschung und Entwicklung erforderlich machen.

Die SOFC soll ebenfalls für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Der Entwicklungsstand der SOFC liegt gegenüber der MCFC um einige Jahre zurück. SOFC-Anlagen können sowohl mit röhrenförmigen Zellen (tubulares Konzept) als auch mit flächigen Zellen (planares Konzept) aufgebaut werden. Das Röhrenkonzept hat gegenüber dem planaren Konzept einen etwa zehnjährigen Entwicklungsvorsprung, was den Bau von Pilotanlagen und damit Tests zur Marktakzeptanz zulässt. Erste Demonstrationsanlagen mit elektrischen Leistungen von 100 kW (SiemensWestinghouse) sind zwischenzeitlich realisiert. Druckbetriebene Anlagen in Kopplung mit einer Gasturbine zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads stellen die nächsten Entwicklungsschritte dar.

Es wird erwartet, dass für das planare Konzept einfachere und kostengünstigere Herstellungsverfahren entwickelt werden können. Auch sollten sich kompaktere Bauformen mit höheren Leistungsdichten realisieren lassen. An der Entwicklung dieses Konzepts arbeiten im Wesentlichen Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft und Institute der Fraunhofer Gesellschaft. Die SOFC soll als kleinere Einheit bis 5 kW auch für die Bordstrom-Energiebereitstellung (Auxiliary Power Unit – APU) von Fahrzeugen Anwendung finden.

Als Ersatz für den Verbrennungsmotor eignet sich die PEMFC aufgrund ihrer einfachen Betriebsführung sowie der daraus resultierenden schnellen Startmöglichkeit in hervorragender Weise. Im Vergleich zum batteriebetriebenen Elektrofahrzeug verfügt ein Brennstoffzellenfahrzeug über eine befriedigende Reichweite. Diese günstigen Eigenschaften veranlassten nahezu alle Automobilhersteller, die Entwicklung dieser Technologie mit erheblichem Aufwand voranzutreiben. Mittlerweile sind viele Versuchsfahrzeuge, z. B. von DaimlerChrysler (NECAR), mit bereits erheblichen Fahrleistungen im Testbetrieb. Parallel dazu wird die PEMFC für den Einsatz in Bussen entwickelt. Auch hier sind schon mehrere Prototypen der Firma DaimlerChrysler, z. B. in dem CUTE-Projekt der Europäischen Union, ferner von MAN und Neoplan im Versuchsbe-

trieb. Die Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird allerdings, vor allem wegen notwendiger Kostensenkungen, nicht vor 2010 erwartet.

Die PEMFC wird aufgrund ihrer hohen Dynamik und der Möglichkeit des schnellen Starts bei Raumtemperatur auch für die dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung in Gebäuden entwickelt. Nahezu alle deutschen Firmen des Heizungsanlagenbaus betreiben diese Entwicklung. Die Anlagen liegen im Leistungsbereich von 1 bis 12 kW_{el}. Mittlerweile ist eine Vielzahl von Anlagen in Deutschland und weltweit im Probebetrieb. Ein endgültiger Marktdurchbruch wird durch die noch zu hohen Kosten und technologische Defizite der Anlagen behindert. Zur Überwindung dieser Defizite besteht erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Insbesondere aufgrund der niedrigen Arbeitstemperatur ist die PEMFC und die DMFC für den portablen Bereich geeignet und soll dort die Akkumulatoren ersetzen. Erste Systeme sind mittlerweile am Markt erhältlich.

Auf dem Gebiet der Brennstoffzelle stehen folgende Forschungsschwerpunkte im Mittelpunkt:

- Bei der **MCFC** liegt der F&E-Bedarf weiterhin bei den Materialien, um Standzeiten zu verlängern und Herstellkosten zu senken. Das Zelldesign ermöglicht prinzipiell vereinfachte Herstellprozesse, die noch zu entwickeln und zu erproben sind. Weitere Entwicklungsschwerpunkte sind:
  - innovative Herstellverfahren für Zellkomponenten,
  - hochtemperatur- und korrosionsbeständige Metallwerkstoffe und Beschichtungen,
  - Systemvereinfachung,
  - Subsysteme – wie Inverter, Gasaufbereitung, Pumpen, Gebläse etc.

- Die F&E-Arbeiten bei der **SOFC** konzentrieren sich auf neue Werkstoffe und Designs sowie verbesserte Herstellungsverfahren zur Kostensenkung bei der nächsten Brennstoffzellengeneration. Die F&E-Aufgaben und Ansatzpunkte sind wie folgt:
  - Weiterentwicklung des tubularen als auch planaren Konzepts,
  - Optimierung der internen Reformierung,
  - Kostengünstige Isolationsmaterialien und Wärmetauscher,
  - Optimale Kopplung der SOFC mit der Gasturbine.

- Die Schwerpunkte des F&E-Bedarfs für **PEMFC** konzentrieren sich generell auf die Weiterentwicklung heute verfügbarer und die Entwicklung neuer, zukunftsweisender Technologien. Konkrete Entwicklungsziele bzw. Ansätze sind:
  - Membranmaterialien mit höherer Haltbarkeit und Temperaturverträglichkeit,
  - Katalysatormaterialien mit höheren Umsatzraten, erhöhter CO-Toleranz,
  - Materialien für Bipolarplatten mit der Möglichkeit einer kostengünstigen Massenfertigung,
  - Zellkonzepte mit höher integrierter Funktionalität der Komponenten,
  - Kompaktreformer mit katalytischer Verbrennung, schnellem bzw. effizientem Kaltstart,
  - bessere Integration bzw. Effizienzerhöhung des Reformersystems.

Darüber hinaus gibt es die folgenden übergreifenden Aspekte:

- Brennstoffaufarbeitung (Entschwefelung, Reinigung etc.),
- Vorbereitung zum Aufbau einer Brennstoffinfrastruktur insbesondere für den mobilen und portablen Bereich,
- Modellierung, Invertertechnologien, Recyclingkonzepte,
- Auswertung von Demonstrationsmaßnahmen, Entwicklungen zur Erstellung von Normen, vorbereitende Maßnahmen zur Aus- und Weiterbildung.

Literatur

[1] BMWA (2000): Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich Brennstoffzelle, interne Dokumentation

2.1.1.3 Speichertechnologie und Wasserstoff

Die wirtschaftlichen Aktivitäten der Stromwirtschaft unterliegen bei den heutigen Bedingungen einer zentralen Begrenzung: das Angebot an elektrischer Energie muss zu jeder Zeit der Nachfrage angepasst werden. Das ergibt sich daraus, dass es bis heute keine wirtschaftlich darstellbare Technologie zur Langzeitspeicherung von elektrischer Energie gibt. So müssen die Versorgungsunternehmen zur jederzeitigen Deckung der relativ stabilen Nachfrage entsprechende Reservekapazitäten bereitstellen oder in großflächiger Form Einfluss auf die Nachfrage nehmen.

Das grundsätzliche Problem der Speicherung von Strom ist in den letzten Jahren durch zwei gegenläufige Entwicklungen verschärft worden:

- Einerseits zwingt der zunehmenden Kostendruck durch die Liberalisierung der Märkte die Unternehmen zum Abbau von Reservekapazitäten.
- Andererseits erfordert der starke Anstieg der unregelmäßig anfallenden Stromerzeugung durch Windkraft zusätzliche Reservekapazitäten.

Beide Entwicklungen rücken die Fragen nach Möglichkeiten und Grenzen der Speicherung elektrischer Energie, des Einsatzes neuer geeigneter Technologien und der dazu notwendigen F&E-Strategien in den Mittelpunkt des Interesses.

Speichertechnologien spielen auch im Verkehrssektor eine Rolle. Der Individualverkehr ist heute fast ausschließlich vom fossilen Energieträger Erdöl abhängig. Seit Beginn der Motorisierung des Verkehrs hat es immer wieder Bestrebungen gegeben, die elektrische Energie für das Kraftfahrzeug zu erschließen. Bis auf Anwendungsnischen konnten hierbei keine wesentlichen Fortschritte erzielt werden. Nach wie vor ist es jedoch Ziel der Energieforschungspolitik, einen Beitrag zu leisten, dass auch die Energieversorgung für den Verkehrssektor auf eine breitere Basis gestellt werden kann (siehe hierzu auch Kapitel 2.1.1.1).

Die technologischen und wirtschaftlichen Anforderungen an elektrische Speicher sind für die Stromwirtschaft und den mobilen Bereich sehr unterschiedlich. Während für den Einsatz in Elektrofahrzeugen hohe spezifische Speicherkapazitäten bezogen auf Gewicht und Volumen gefordert werden, spielt dies in der stationären Anwendung der Stromwirtschaft eine untergeordnete Rolle. Andererseits müssen hier die Investitions- und Betriebskosten für einen wirtschaftlichen Einsatz wesentlich geringer als im mobilen Bereich sein.

Generell wird bei der Speicherung elektrischer Energie zwischen der Kurzzeitspeicherung (Leistungsspeicher) und der Langzeitspeicherung (Energiespeicher) unterschieden. Bei den Leistungsspeichern ergibt sich bzgl. des Stands von Wissenschaft und Technik folgendes Bild:

- Pumpspeicher und Druckluftspeicher sind Stand der Technik und werden vielfach eingesetzt.
- Schwungradspeicher sind entwickelt und dürften in absehbarer Zeit ggf. mit verlustfreier supraleitender Lagerung die Wirtschaftlichkeit erreichen.
- Die Einsetzbarkeit der Supraleitenden Magnetischen Energie-Speicher (SMES) scheitert immer noch an Problemen bei der Herstellung der Supraleiter.

- Sogenannte Supercaps haben eine geringe Speicherkapazität, können aber schnell ge- und entladen werden, so dass sie für sehr kurze Speichervorgänge genutzt werden, z. B. in Hybrid-Fahrzeugen zur teilweisen Bremsenergie-Rückgewinnung.

Energiespeicher (Langzeitspeicher) basieren im Wesentlichen auf elektrochemischen Verfahren und haben folgenden Entwicklungsstand:

- Bleibatterien und Systeme auf Nickel-Basis gelten als technisch weitestgehend ausgereift, haben aber technologisch bedingte Nachteile (z. B. geringe Kapazität).
- Speicher mit Lithium-Elektroden haben wegen ihrer sehr hohen spezifischen Speicherkapazitäten Vorteile gegenüber traditionellen Batterien und bieten sich beispielsweise für den Einsatz in Hybridfahrzeugen an; sie befinden sich in der Entwicklungsphase.
- Andere Systeme (z. B. Zink-Luft-System oder Redox-Verfahren) sind für Nischenanwendungen in der Entwicklung, energiewirtschaftlich aber von geringerer Bedeutung.

In den letzten Jahrzehnten wurden erhebliche Mittel in die Entwicklung verkehrstauglicher Speichertechnologien investiert. Die Anforderungen hinsichtlich Platzbedarf, Gewicht, Reichweite und Wirtschaftlichkeit konnten im Vergleich zum Verbrennungsmotor von keiner dieser Technologien erreicht werden. Lediglich bei Hybridfahrzeugen und in Anwendungsnischen (Kleinstfahrzeuge, Flottenverkehr) sind Entwicklungen vielversprechend, die einen zunehmenden Einsatz elektrischer Energie in diesem Marktsegment erwarten lassen (z. B. Zink-Luft-System).

Bzgl. künftiger F&E-Maßnahmen im Bereich Speichertechnologien ist folgende Situation zu berücksichtigen. Viele Technologien, wie z. B. Pumpspeicher, sind entwickelt und am Markt etabliert, so dass eine öffentliche Förderung für deren Weiterentwicklung nicht gerechtfertigt ist. Andere Technologien (Batterien in der Stromversorgung, Supraleitende Magnetische Energie-Speicher (SMES)) konnten sich aus wirtschaftlichen Gründen nicht durchsetzen. Bei diesen Technologien sind z. Z. auch keine neuen technischen Ansätze oder Ergebnisse der Grundlagenforschung erkennbar, die vielversprechend sind und die bei entsprechender Weiterentwicklung einen entscheidenden Durchbruch erwarten ließen.

Die Bundesregierung wird daher bei den Speichertechnologien folgende Schwerpunkte setzen:

- Die sich jetzt in der Entwicklung befindenden Systeme für Nischenanwendungen im Verkehr werden bis zu einem gewissen Reifegrad weiterverfolgt.

- Grundlagenentwicklungen werden sorgfältig beobachtet. Mit Blick auf neue Ergebnisse der Materialforschung, Verfahrenstechnik und anderer Disziplinen, die vielversprechende neue Technologien zur Speicherung elektrischer Energie erwarten lassen, wird Vorsorge für eine schnelle Reaktion zur Weiterentwicklung getroffen, um diese Ansätze möglichst rasch verwerten zu können.
- Die Möglichkeiten und Grenzen einer notwendigen bzw. technisch sinnvollen Integration von Speichertechnologien in Stromnetze, v. a. unter Berücksichtigung der Einspeisung von regenerativen Energien (z. B. Offshore-Windparks), werden im Rahmen von Studien und mit Blick auf den künftigen F&E-Bedarf geprüft.

Wasserstoff ist ein u. a. in der petrochemischen Industrie intensiv genutzter Rohstoff und damit ein kommerzielles Produkt. Heute wird er in überwiegendem Anteil durch die Reformierung von Erdgas gewonnen. Obwohl der Wasserstoff in der Energiewirtschaft heute noch keine Rolle spielt, wird er - neben dem Strom - als idealer Sekundärenergieträger der Zukunft eingestuft. Außerdem wird der Wasserstoff auch als ernstzunehmende Alternative zu herkömmlichen Kraftstoffen für den Verkehr diskutiert. Diese Einschätzung des Wasserstoffs resultiert aus den folgenden grundsätzlich vorteilhaften Eigenschaften:

- Wasserstoff lässt sich aus vielen Primärenergieträgern herstellen,
- er kann relativ einfach gespeichert werden und
- seine Umwandlung in Nutzenergie setzt nahezu keine Schadstoffe frei.

Die Klimaverträglichkeit des Sekundärenergieträgers Wasserstoff wird allerdings ausschließlich durch den Primärenergieträger bestimmt, aus dem er erzeugt wird. CO_2-Neutralität ist nur bei Gewinnung aus erneuerbaren Energien gegeben. Dies ist wirtschaftlich nur langfristig und für einen Teilmarkt darstellbar. Für eine Übergangsphase ist die Gewinnung von Wasserstoff aus Erdgas und Kohle bei gleichzeitiger Abtrennung und Speicherung des CO_2 denkbar. Hierzu werden in dem Bereich Kraftwerkstechnik Forschungsarbeiten unterstützt (siehe 2.1.1.1).

Neben der Frage einer CO_2-freien Herstellung von Wasserstoff ist die Speicherung von Wasserstoff vor allem für den Verkehrseinsatz noch nicht befriedigend gelöst. U. a. werden folgende Technologien eingesetzt bzw. diskutiert:

- Drucktanks und Metallhydride zur Speicherung gasförmigen Wasserstoffs. Sie sind Stand der Technik, werden aber weiterentwickelt (z. B. Verdoppelung des Druckes von 350 auf 700 bar).
- Speichersysteme für flüssigen Wasserstoff sind entwickelt und bereits im Einsatz. Es werden daher ausschließlich Detailentwicklungen zu erwarten sein.
- Die hohen Erwartungen hinsichtlich einer wirtschaftlich interessanten Speicherkapazität von Kohlenstoff konnten bisher nicht bestätigt werden.

Wasserstoff als ernstzunehmender Sekundärenergieträger kann sich nur dann durchsetzen, wenn es gelingt, die Kosten für die erneuerbaren Energien entscheidend zu reduzieren. Die diesbezüglichen F&E-Maßnahmen werden in den entsprechenden Kapiteln zu den erneuerbaren Technologien beschrieben (2.2, 2.3 und 2.4.1.1). Die Technologien zur elektrolytischen Herstellung des Wasserstoffs sind vorhanden und können bei neuen Erkenntnissen aus der Material- und Grundlagenforschung in Detailentwicklungen verbessert werden.

Neue technologische Ansätze zu einer wirtschaftlichen Speicherung des Wasserstoffs sind z. Z. nicht erkennbar. Dennoch wird im Rahmen des Programms Vorsorge für eine schnelle Reaktion auf vielversprechende Erkenntnisse der Grundlagenforschung getroffen. Dies betrifft v. a. neueste Entwicklungen aus der Materialforschung zur Verbesserung der Wirkungsgrade und Zuverlässigkeiten bei der Wasserelektrolyse. Auch bzgl. der Speicherung von Wasserstoff sind die Entwicklungen in der Grundlagenforschung sorgfältig zu beobachten, um ggf. eine industrielle Entwicklung möglichst zügig aufgreifen zu können.

Zu den F&E-Maßnahmen bzgl. der Nutzung des Wasserstoffs wird auf die entsprechenden Kapitel wie z. B. zur Entwicklung der Turbinentechnologie (2.1.1.1) bzw. Brennstoffzelle (2.1.1.2) verwiesen.

Literatur

[1] BMWA (2004): Forschungsbedarf in der Wasserstoff-Energietechnologie, Bericht des Strategiekreises „Wasserstoff“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit

2.1.1.4 Energieoptimiertes Bauen

Mehr als ein Drittel des Endenergieverbrauchs Deutschlands entfällt auf private Haushalte und wird dort vor allem zur Raumwärme (einschließlich Trinkwassererwärmung) genutzt. Die privaten Haushalte sind damit - vor den Sektoren Verkehr und Industrie - der größte einzelne Verbrauchsbereich. Weit über 80 % der in diesem Segment eingesetzten Energie besteht aus fossilen Energieträgern, insbesondere importiertem Erdöl und Erdgas.

Tab. 2. 1: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte 2003

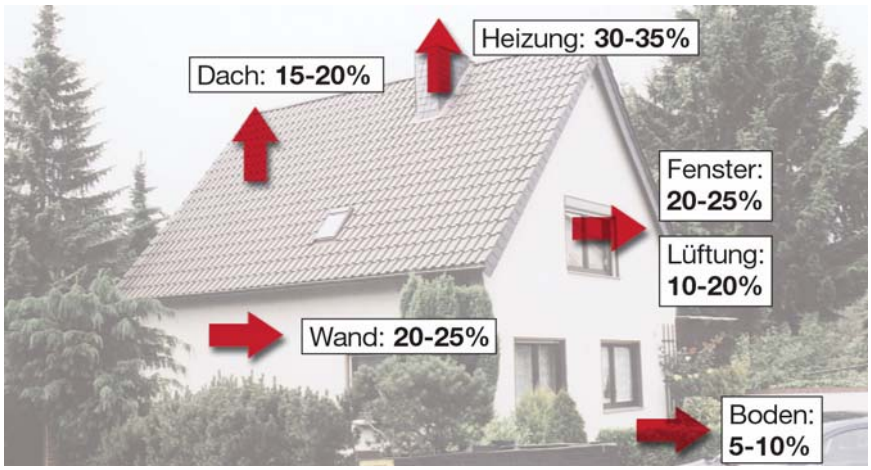
	Gesamtverbrauch (PJ)	**Raumwärme (PJ)**	**Energieanteil Raumwärme (in %)**
Gas	1.061	950	42
Öl	908	834	37
Strom	511	115	5
Fernwärme	162	141	6
Sonstige	286	217	10
Summe	**2.835**	**2.257**	**100**

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, prognos

Die Höhe des Energiebedarfs für Raumwärme wird in erster Linie durch die Zahl der Wohnungen und den Umfang der zu beheizenden Wohnfläche bestimmt. Deutschland verfügt bei rd. 83 Mio. Einwohnern über ca. 39 Mio. Haushalte und ca. 3,3 Mrd. m^2 Wohnfläche. Für energiepolitische Überlegungen sind weitere Daten wichtig. Dazu gehören insbesondere die Altersstruktur und die durchschnittliche Lebensdauer des Gebäudebestandes.

Fast 90 % der Gebäudesubstanz Deutschlands ist vor 1990 erbaut worden. Diese sehr spezifische Altersstruktur ergibt sich aus der langen Lebenszeit von Gebäuden. Wohngebäude haben eine Lebensdauer von über 100 Jahren mit einem Renovierungszyklus von ca. 30 – 60 Jahren. Innerhalb dieser Fristen werden in aller Regel energierelevante Gebäudeteile wie Fenster, Außenwände und Dächer, aber auch die Heizungsanlagen mindestens einmal renoviert oder ersetzt. Im Zuge dieser Sanierung können abhängig vom Baujahr, Gebäudetyp und Zustand des Gebäudes Energieeinsparungen von 50 bis 80 % erzielt werden. Ansatzpunkte sind insbesondere die Wärmeverluste durch ungenügend gedämmte Außenwände, Dachflächen und Bodenflächen, veraltete Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen sowie alte Fensterkonstruktionen, die zu schlechten Energiekennziffern dieser Gebäude beitragen (Abb. 2.5).

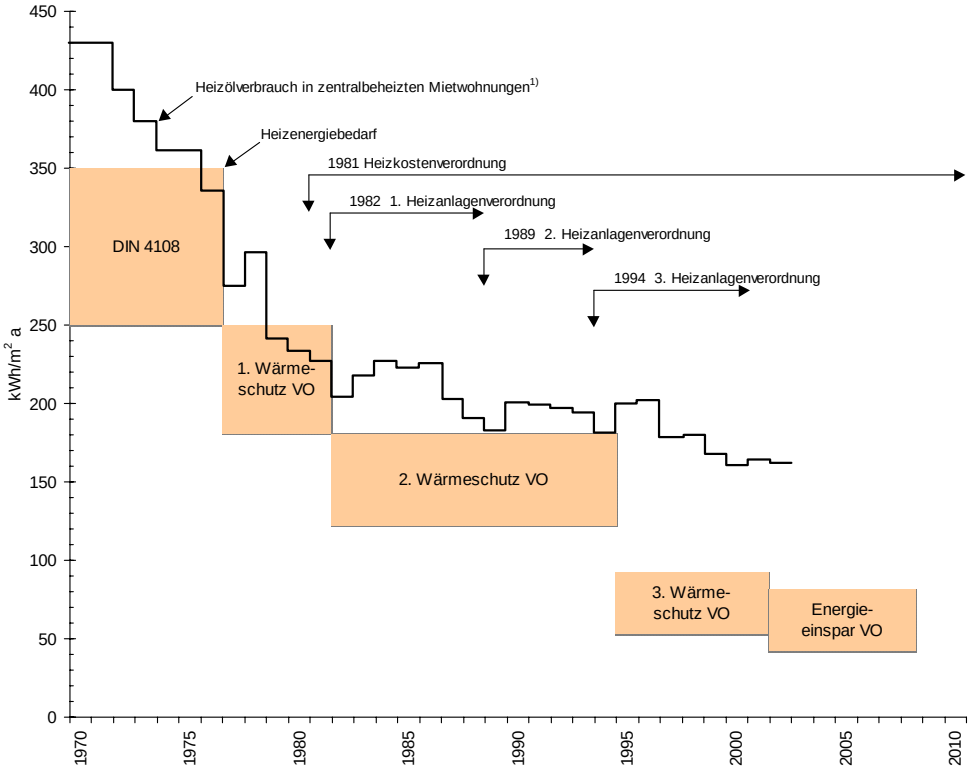
Abb. 2.5: Typische Wärmeverluste eines Einfamilienhauses (Baujahr vor 1984)



Diese Zusammenhänge machen deutlich, dass die energiegerechte Sanierung älterer Gebäude eine Schlüsselrolle bei der Modernisierung der Energieversorgung Deutschlands spielt. Im Gebäudebereich liegen große technische und zum Teil auch wirtschaftlich zu erschließende Energieeinsparpotentiale [1]. Durch rationelle Energieverwendung, effiziente Versorgungssysteme und Nutzung der Solarenergie kann man den Bedarf nach fossiler Energie - ohne Komfortverlust - deutlich zurückführen. Das belegen die großen Erfolge, die in den letzten Jahren bei der Reduktion des Wärmebedarfs im Gebäudebereich erzielt worden sind. So hat sich etwa der spezifische Heizölverbrauch in zentral beheizten Mietwohnungen seit 1970 von ursprünglich über 400 kWh/m^{2}a bis Ende der 90‘er Jahre auf Werte um 200 kWh/m^{2}a halbiert. Heute liegt er bei etwa 170 kWh/m^{2}a (Abb. 2.6).

Der Trend zur Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs im Gebäudebereich wird sich fortsetzen. Ursache sind die vielfältigen Möglichkeiten für noch sehr viel weitergehende Energieeinsparungen. Sie reichen von sog. Passivhäusern mit einem Heiz-Wärmebedarf von weniger als 15 kWh/m^{2}a bis hin zu experimentellen energieautarken Solarhäusern, die die gesamte im Gebäude benötigte Energie - thermisch und elektrisch - aus der auf die Gebäudehülle eingestrahlten Sonnenenergie beziehen. Allerdings steigen dabei Aufwand und Kosten überproportional. Künftige Anstrengungen müssen sich daher vor allem darauf konzentrieren, technisch und insbesondere wirtschaftlich akzeptablere Lösungen für diese zukunftsfähigen Modelle zu finden.

Abb. 2.6: Spezifischer Heizenergieverbrauch von Mietwohnungen



1) Alte Bundesländer, ohne Temperaturbereinigung
Quellen: Techem AG, 2004; BMBF, 1996; ISI, 1999

Die Bundesregierung hat durch die in 2002 in Kraft getretene Energieeinsparverordnung (EnEV) neue Akzente für die Energieeinsparung im Gebäudebereich gesetzt. Zentrale Elemente der EnEV sind:

- Anhebung des Anforderungsniveaus für den Neubau um durchschnittlich 30 % gegenüber dem in der bisherigen Wärmeschutzverordnung gültigen Standard,
- Übergang von der Begrenzung des Jahresheizwärmebedarfs auf den jährlichen Primärenergiebedarf sowie
- verschärfte energetische Anforderungen für den Gebäudebestand bei bestimmten baulichen und anlagentechnischen Änderungen sowie unmittelbar wirkende Verpflichtungen zur Nachrüstung von Gebäuden und Anlagen.

Die Bundesregierung hat diese Neuordnung des ordnungsrechtlichen Regelwerkes im Gebäudebereich über Jahre durch eine gezielte Förderung von Forschung und Entwicklung begleitet und damit die Verschärfung der Standards vorbereitet bzw. überhaupt erst möglich gemacht. Hervorzuheben sind insbesondere die Fortschritte auf folgenden Gebieten:

- Verstärkter Wärmeschutz für alle Gebäudeumfassungsflächen, hocheffiziente Fenster- und Fassadentechnik unter Einbeziehung von Tageslicht- und Solarenergienutzung,
- energieeffiziente Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen, auch in der Kombination mit der Gewinnung von Umweltenergie, stromsparende Beleuchtungstechnik,
- Nah- und Fernwärmesysteme mit verbesserter Technik und Betriebsführung unter Nutzung von Abwärme und Umweltenergiequellen,
- EDV-gestützte Planungshilfsmittel und deren Einführung in die Praxis.

Die Bundesregierung wird diese Linie fortsetzen und ihre F&E-Politik im Gebäudebereich künftig noch stärker an einem Leitbild für das „Gebäude der Zukunft“ ausrichten. Aus heutiger Sicht sind zukunftsfähige Gebäude architektonisch anspruchsvolle Bauwerke mit hohem Nutzerkomfort, minimalem Primärenergiebedarf, optimierter Technikausstattung, sinnvoller Integration in größere Energieversorgungssysteme sowie insgesamt wirtschaftlicher Energiebedarfsdeckung. Um diesem Leitbild näher zu kommen, verfolgt die Bundesregierung bei ihrer Forschungspolitik eine Parallelstrategie zur energetischen Optimierung auf den Gebieten des Neubaus und der Substanzverbesserung:

- Beim Neubau ist es Ziel, den Primärenergiebedarf, d. h. den Energiebedarf, der für Beheizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Klimatisierung und Beleuchtung sowie Hilfsenergien (z. B. Antriebe für Pumpen und Ventilatoren) notwendig ist, gegenüber dem heutigen Stand der Technik nochmals zu halbieren. Das Fernziel sind Nullemissionshäuser.
- Bei der Gebäudesubstanz geht es um weitere grundlegende Verbesserung der Möglichkeiten einer konsequenten und nachhaltigen energetischen Sanierung.

Die künftige Förderpolitik wird sich auf folgende Schwerpunkte konzentrieren:

- Umsetzung der Ergebnisse von Forschung und Entwicklung in Demonstrationsprojekten mit dem Ziel, die verschiedenen Elemente auf ihre Effizienz, Praxistauglichkeit und künftige Marktfähigkeit zu prüfen sowie die Übertragung der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse in die Aus- und Weiterbildung von Fachplanern, Architekten und Handwerkern.
- Fortsetzung der F&E-Arbeiten bei Erfolg versprechenden Materialien, Komponenten und Systemen der Baukonstruktion und der technischen Gebäudeausrüstung. Dazu gehören die weitere energetische Verbesserung der baulichen Hülle (z. B. hocheffiziente Wärmedämmungen mit Vakuum-Elementen) auch in Verbindung mit Solarenergienutzung über Fassa-

den und Fenster (z. B. schaltbare und selbst regelnde Verglasungen, Licht lenkende Strukturen zur optimalen Tageslichtnutzung) sowie innovative Konzepte der Wärmeerzeugung und –verteilung (Niedrig-Exergie-Systeme mit großflächigen Wärmetauschern zum Heizen und Kühlen, dezentrale Heizungspumpen, fortgeschrittene Wärmepumpentechnik, passive und hybride Systeme zur Luftkonditionierung).

- Weiterentwicklung der netzgebundenen Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden mit Nah- und Fernwärme aus gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung (auch: Modellversuche mit Brennstoffzellen), aus industrieller Abwärme, Umweltenergie und Biomasse. Damit verbunden sind auch die Modernisierung und Anpassung älterer Netze sowie die Erprobung neuartiger Strukturen (z. B. mobile Fernwärme, Fernkälte).
- Entwicklung und Erprobung aussichtsreicher Techniken der kurz- und längerfristigen Wärme- und Kältespeicherung für die Beheizung und Klimatisierung (z. B. thermische Untergrundspeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Speicherverfahren).
- Optimierung der zugehörigen Mess-, Steuer- und Regelungstechnik für den effizienten Betrieb der Anlagen unter Nutzung moderner Kommunikationstechniken. Dazu gehört die Weiterentwicklung von Methoden und Instrumenten zur energetischen Optimierung des „Gesamtsystems Gebäude“ in der Planungsphase, bei der Inbetriebnahme und in der Betriebsführung.
- Übertragung der Techniken und Methoden auf die Anwendung bei der Altbausanierung (z. B. standardisierte bauliche Lösungen, angepasste Haustechnik, spezielle Baustoffe).

Literatur

[1] BINE (2002): Energieeffiziente Wohngebäude – Einfamilienhäuser mit Zukunft; Bonn, Karlsruhe

2.1.1.5 Energieeffizienz in der Industrie, im Gewerbe, im Handel und bei Dienstleistungen

Technik spielt bei der Optimierung des Energieeinsatzes eine wichtige Rolle. Mit der Wahl der Technik wird entschieden, wie viel Primär- bzw. Endenergie notwendig ist, um die bei den Produktionsprozessen geforderten Energiedienstleistungen (Wärme, Kraft, Licht und Information) bereitzustellen [1]. Wenn man sich mit Überlegungen zur generellen Verbesserung der Energieeffizienz in Deutschland befassen will, muss man das Augenmerk vor allem auf die Technolo-

gien richten, die in der Industrie, bzw. im Gewerbe, Handel und Dienstleistungsbereich eingesetzt werden.

Das belegen die folgenden Strukturmerkmale:

- Der Energieverbrauch in der Industrie („Verarbeitendes Gewerbe und übriger Bergbau“) lag 2003 bei rd. 2.300 PJ und betrug damit 25 % des gesamten Endenergieverbrauchs. Zu den größten Energieverbrauchern gehören die Metallerzeugung, die Grundstoffchemie und die Verarbeitung von Steinen/Erden, die mehr als 40 % des Energieverbrauchs der Industrie auf sich vereinigen. Je $^1/_3$ des Endenergieverbrauchs der Industrie entfallen auf Strom und Gas. Der Rest des Energiebedarfs wird durch Heizöl, Kohle und sonstige Energieträger gedeckt.
- Der Energieverbrauch des Sektors „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ betrug rd. 1.500 PJ. Das entspricht 16 % des gesamten Endenergieverbrauchs. In diesem Sektor spielen Strom und Gas die zentrale Rolle. Sie decken zusammen rd. 65 % des gesamten Endenergiebedarfs. Der Beitrag des Heizöls liegt bei etwa 20 %.

Durch moderne Technologien – aber auch durch Änderungen der Produktpalette und durch den Strukturwandel – ist es in den letzten Jahren gelungen, den spezifischen Energieverbrauch in der Wirtschaft deutlich zu vermindern. Das zeigt exemplarisch die Entwicklung in der Industrie (Abb. 2.7). Hier konnte der spezifische Brennstoffbedarf in den letzten 10 Jahren um mehr als 30 % vermindert werden. Der spezifische Stromverbrauch in der Industrie ist dagegen nahezu konstant geblieben. Ursache für diese „Sonderentwicklung“ ist der zunehmende Einsatz von Informationstechnologien, die weitergehende Automatisierung und oft auch eine Substitution von Brennstoffen durch Strom („Strom als Modernisierungsenergie“).

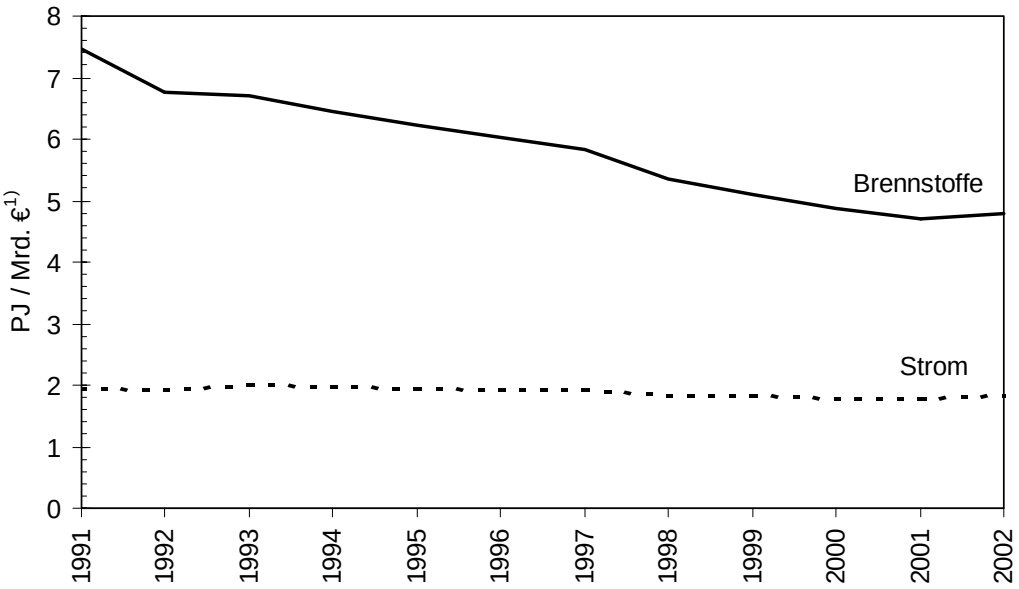
Die Optimierung des Energieeinsatzes ist für die Wirtschaft eine Daueraufgabe. Ihr Interesse und ihre Verpflichtungen sind:

- die Energiekostenbelastung zu senken und damit die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft zu stärken sowie
- den Verbrauch natürlicher Ressourcen und die damit verbundenen Umweltbelastungen, insbesondere durch die Emission von treibhausrelevanten Spurengasen, zu vermindern.

Aufgabe der Energieforschungspolitik ist es, diese Bemühungen der Wirtschaft zu flankieren und F&E in den Fällen zu unterstützen, in denen die Wirtschaft wegen langer Vorlaufzeiten oder

hoher technischer bzw. wirtschaftlicher Risiken nicht selbst in dem erforderlichen Umfang investieren kann.

Abb. 2.7: Spezifischer Energieverbrauch in der Industrie



1) Bruttowertschöpfung in Preisen von 1995
Quelle: prognos

Die Förderung von Forschung und Entwicklung durch die Bundesregierung zur Verbesserung der Energieproduktivität in der Industrie, im Gewerbe, im Handel und bei Dienstleistungen konzentrierten sich in den letzten Jahren auf:

- Thermoprozessanlagen, Trockner, Prozessgasnutzung,
- Querschnittstechnologien wie Kältetechnik, Drucklufterzeugung, Ventilatoren, Pumpen und Trennverfahren,
- Einsatzmöglichkeiten neuer Werkstoffe, Sensortechnik, Mikroelektronik und Lasertechnologien sowie
- moderne Simulationstechnologien zur Vermeidung hoher Aufwendungen für Versuchsstände und zur Optimierung der Prozessführung.

Die Bundesregierung wird auch künftig die Forschung und Entwicklung moderner Energieeffizienztechnologien fördern. Neben energiepolitischen Überlegungen sind auch die ökonomischen Aspekte zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und zur Sicherung von Wachstum und Beschäftigung in Deutschland und Europa wichtig. Zielgruppen für die Forschungspolitik sind vor allem

mittelständische Unternehmen, die mit aussichtsreichen High-Tech Entwicklungen zur Modernisierung der Energieversorgung beitragen können.

Die künftige Förderpolitik wird sich auf folgende Schwerpunkte konzentrieren:

- innovative Entwicklungen für Thermoprozesse (neuartige Brennertechnik, effizientere Prozessgasnutzung),
- Innovationen bei der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik zur Optimierung von Prozessen und Fertigungsverfahren,
- neue Technologien zur Reduktion des Energieeinsatzes bei mechanischen, thermischen und physikalisch-chemischen Trennverfahren,
- neue Technologien zur Bereitstellung von Kälte auf der Basis FCKW-freier und besonders energieeffizienter Systeme,
- Entwicklung neuer Technologien zur rationellen Stromnutzung (vor allem: hocheffiziente Elektromotoren, Optimierung der Wärme/Kälteerzeugung mit Strom),
- Optimierung der Energieflüsse durch neue Technologien zum verstärkten Recycling energieintensiver Produkte.
- Effizientere Techniken zur Nutzung industrieller Abwärme (neuartige Wärmetauscher, Hochtemperaturwärmepumpe, Wärmespeicher).

Literatur

[1] Jochem, E. (2004): Steps towards a sustainable development – A White Book for R&D of energy efficient technologies, Zürich

2.1.1.6 Systemanalyse und Informationsverbreitung

Die Bundesregierung fördert Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien auf breiter Front. Die begrenzten Fördermittel erzwingen aber immer wieder Entscheidungen über prioritäre und nachrangige Förderbereiche. Diese Entscheidungen müssen, so weit es geht, auf der Basis von Daten, Fakten, wissenschaftlichen Analysen und Risikoüberlegungen getroffen werden. Dazu leistet die Systemanalyse einen wichtigen Beitrag.

Anfang der 90er Jahre hat das damalige Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) systemanalytische Arbeiten zur Weiterentwicklung der Energieforschungspolitik initiiert. Mit dem Projekt „IKARUS“ (Instrumente-Klimagas-Reduktions-Strategien) sollten die

Grundlagen für eine Neuausrichtung der Politik in Richtung auf einen verstärkten Schutz der Erdatmosphäre geschaffen werden [1].

Die Bundesregierung wird auch künftig systemanalytische Untersuchungen zur Anpassung und Optimierung ihrer Förderpolitik nutzen. Im Mittelpunkt der künftigen Aktivitäten auf diesem Feld wird das Projekt „EduaR&D“ (Energie-Daten und Analyse R&D) stehen. Bei diesem Vorhaben geht es darum, neue wissenschaftliche Ansätze zu nutzen, um:

- aussichtsreiche Technologiefelder oder Einzeltechnologien zu identifizieren,
- ihren möglichen Beitrag zu einer sicheren, wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Energieversorgung in Deutschland zu bewerten und
- auf dieser Basis Hinweise für Förderempfehlungen zu geben.

Im Rahmen des Projektes „EduaR&D“ wird die Bundesregierung systemanalytische Forschungsvorhaben fördern, die sich auf folgende Schwerpunkte konzentrieren:

- Konzepte und Erklärungsansätze aus der Innovations- und Diffusionsforschung und deren Übertragung bzw. Anwendung auf Energietechnologien,
- methodische Ansätze zur Beurteilung technisch-ökonomischer Entwicklungspotenziale innovativer Energietechniken,
- vergleichende Bewertungsmethoden und Schlussfolgerungen für die Entwicklung von Förderstrategien.

Zu den Aufgaben der Energieforschungspolitik gehört auch die Verbreitung der Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben und deren Umsetzung in die Praxis. Dazu ist ein gezielter Wissenstransfer von den Forschern und Entwicklern zu den Multiplikatoren und Nutzern von Forschungsergebnissen unabdingbar. Informationsverbreitung ist das Bindeglied zwischen Forschung und praktischer Anwendung. Voraussetzung für eine gezielte Informationsverbreitung ist eine sachgerechte Aufarbeitung der F&E-Ergebnisse, so dass dem potenziellen Anwender wissenschaftlich-technische Informationen zeitnah, kompakt und leicht zugänglich sind.

Die Bundesregierung unterstützt die Ergebnisaufarbeitung und gezielte Informationsverbreitung im Energiebereich vor allem durch den BINE Informationsdienst [2]. BINE ist der zentrale, bundesweite Informationsvermittler für Ergebnisse der Bundesenergieforschung auf den Gebieten

Energieeinspartechniken und erneuerbare Energien. Wissenschaftlich-technische Fachinformationen werden der mittelständischen Wirtschaft, beruflichen Experten, privaten Investoren und der allgemeinen Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Aktuelle Informationen aus Forschung und Technik werden durch die BINE-Fachredaktion recherchiert, zielgruppenorientiert aufbereitet und in verschiedenen Inforeihen publiziert. Die BINE-Publikationen werden im Internet systematisch mit weiteren Informationen und Angeboten vernetzt und durch das BINE-Expertentelefon ergänzt.

Die Bundesregierung wird die Förderung der Informationsverbreitung durch BINE fortsetzen und die Möglichkeiten einer Weiterentwicklung nutzen. Dabei geht es insbesondere um:

- Ausbau des bestehenden Informationsangebots durch Integration aller Medien,
- Einbeziehung anderer Institutionen, Verbände und Publikationsorgane der relevanten Branchen; Verbesserung der Multiplikatorwirkung,
- Unterstützung des internationalen Informationstransfers sowie
- Nutzung neuer Verbreitungswege (z.B. Integration in E-Learning-Tools) und neuer Formate wie Video-Stream- und Audio-Files.

Literatur

[1] Markewitz, P., Stein, G. (2003): Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland, Jülich
[2] http://www.bine.info

2.1.1.7 Haushaltsmittel

Die Bereitstellung der Fördermittel im Bereich „Rationelle Energieumwandlung“ spiegelt die forschungspolitischen Prioritäten wieder. Im Jahr 2003 wurden für die einzelnen Technologiefelder folgende Mittel bereit gestellt: Kraftwerkstechnologien 8,0 Mio. €, Brennstoffzellen 27,6 Mio. €, Speichertechnologien/Wasserstoff 4,6 Mio. €, energieoptimiertes Bauen 14,4 Mio. €, Energieeffizienz in der Wirtschaft 5,9 Mio. € sowie Systemanalyse und Informationsverbreitung 5,9 Mio. € (einschließlich der Kosten für den Projektträger).

Für den Zeitraum 2005 – 2008 sind für die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet „Rationelle Energieumwandlung“ Mittel in Höhe von rd. 284 Mio. € vorgesehen. Diese Mittel sollen für Einzelprojekte, Verbundvorhaben und für eine Verstärkung

der Verbindung von Grundlagenforschung und anwendungsnaher Forschung sowie für erste Demonstrationsvorhaben genutzt werden.

Tab. 2.2: BMWA-Projektförderung „Rationelle Energieumwandlung“ (in Tsd. €)

Ist	**Soll**	**Plandaten[1)]**			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
65.958	78.496	71.244	70.994	70.994	70.994

[1)] Zahlen 2006 - 2008 enthalten Mittel aus der Innovationsinitiative der Bundesregierung; sie stehen unter dem Vorbehalt der Bewilligung durch das Parlament.

2.1.2 Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung

Die Bundesregierung und die Energieversorgungsunternehmen haben sich am 11.06.2000 auf eine Regelung zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Stromerzeugung in Deutschland verständigt. Dem entspricht die Novelle des Atomgesetzes. Dabei wurde die Freiheit der Forschung auf dem Gebiet der Kerntechnik, insbesondere der Sicherheit, nicht eingeschränkt. Unter diesen Aspekten bleiben zentrale Programmpunkte in der nuklearen Energieforschung der Bundesregierung die Gewährleistung der Sicherheit der Kernkraftwerke für die verbleibenden Betriebszeiten sowie Planung und Bau von nationalen Zwischen- und Endlagern für radioaktive Abfälle.

Auch unter Ausstiegsbedingungen müssen für den Betrieb und die Entsorgung von Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren höchste Sicherheitsanforderungen auf dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik gelten. International wird der Stand von Wissenschaft und Technik unter maßgeblicher Mitwirkung deutscher Wissenschaftler ständig vorangetrieben. Die Einwirkungsmöglichkeiten Deutschlands auf die Sicherheitskultur kerntechnischer Anlagen weltweit müssen durch gezielte Fortführung der internationalen Kooperationen mit westlichen und östlichen Partnern langfristig erhalten bleiben. Die dafür erforderliche sicherheitstechnische Kompetenz kann nur auf der Basis einer eigenen, von Industrie- und Verbandsinteressen unabhängigen Forschung erhalten werden. Daher ist es ein Gebot staatlicher Verantwortung und Vorsorge, dass die Bundesregierung auch in Zukunft eine intensive Forschung auf den Gebieten der Reaktor- und Endlagersicherheit fördert. Selbst Staaten, die keine Reaktoren (mehr) haben, fördern die Forschung in diesem Bereich, um die internationale Entwicklung selbst beurteilen zu können. Die Verantwortung der Anlagenbetreiber für die Schadensvorsorge und die insoweit erforderlichen Untersuchungen bleiben davon unberührt.

Die Förderschwerpunkte „Reaktorsicherheitsforschung“ und „Endlagerforschung“ wurden im Jahr 2000 durch die Evaluierungskommission „Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung“ des BMWA neu bewertet und im Jahr 2003 durch den Kompetenzverbund Kerntechnik für den Themenbereich Reaktorsicherheitsforschung bis 2006 fortgeschrieben. Die Kommission hat vor dem Hintergrund gekürzter Finanzmittel und unter Berücksichtigung der Erhaltung der forschungspolitischen Funktionsfähigkeit und der Sicherung des Know-hows Empfehlungen zur fachlichen Prioritätensetzung und zur Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen erarbeitet. Mit deren Umsetzung wird eine abgestimmte und effiziente Fortführung der Forschungsarbeiten

zur Reaktorsicherheit zur Erhaltung der deutschen kerntechnischen Sicherheitskompetenz in den betreffenden Forschungseinrichtungen ermöglicht.
Das BMWA unterstützt die Bewahrung kerntechnischer Kompetenz weiterhin in seiner Initiative „Kompetenzerhalt Kerntechnik“, durch die Forschungsvorhaben junger Wissenschaftler zu aktuellen Fragestellungen der kerntechnischen Sicherheit gefördert werden. Durch die Gründung des “Kompetenzverbunds Kerntechnik” im Jahr 2000 wurde sichergestellt, dass die deutschen Forschungseinrichtungen im Bereich Reaktorsicherheits- und Endlagerforschung möglichst effizient zusammenarbeiten.

2.1.2.1 Reaktorsicherheitsforschung

Die intensive Förderung der Reaktorsicherheitsforschung durch die Bundesregierung in den letzten Jahrzehnten hat entscheidend dazu beigetragen, dass deutsche Reaktoren zu den sichersten der Welt gehören. Die Förderung der Reaktorsicherheitsforschung konzentriert sich heute auf die in Deutschland noch betriebenen Reaktortypen. Für deren restliche Betriebszeit müssen die wissenschaftlich-technischen Grundlagen der Sicherheitsbewertung der Anlagen entsprechend dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik weiterentwickelt werden. In den zurückliegenden Jahren haben solche Forschungsarbeiten wichtige Ergebnisse und damit Anstöße für eine ständige Verbesserung der Sicherheitstechnik erbracht.

Auch die künftigen Arbeiten müssen alle sicherheitsrelevanten Fragestellungen in Betrieb befindlicher Kernkraftwerke beinhalten:

- Alterung von Komponenten und Materialien.
- Realistische Beschreibung der Abläufe im Reaktorkern und in den Kühlkreisläufen bei Stör- und Unfällen.
- Integrität des Sicherheitsbehälters als letzter Barriere gegen den Austritt radioaktiver Stoffe in die Umgebung.
- Probabilistische Methoden zur Verbesserung der Werkzeuge für die Identifizierung von Schwachstellen in Anlagenauslegung und Prozessführung; Verringerung der bestehenden Bewertungsunsicherheiten.

2.1.2.2 Endlagerforschung

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist eine Sicherheitsaufgabe, deren Lösung für viele kommende Generationen Bedeutung besitzt und deswegen eine besondere Herausforderung für die derzeitige Wissenschaft und Technik darstellt. Um langzeitlich einen bestmöglichen Schutz von Mensch und Umwelt zu gewährleisten, muss der erreichte Kenntnisstand daher durch weitere Forschung und Entwicklung ständig abgesichert, ergänzt und vertieft werden:

- Untersuchung der Eigenschaften des geologischen Systems als der wichtigsten Langzeitbarriere.
- Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern.
- Nachweis der Langzeitsicherheit des Multi-Barrieren-Konzepts.
- Verminderung oder Vermeidung radioaktiver Abfälle, insbesondere von langlebigen Nukliden, z.B. mittels Partitioning (gezielte Abtrennung) und Transmutation (Umwandlung in kurzlebige Nuklide durch Bestrahlung mit Neutronen); Verbesserung der Methoden der Abfallcharakterisierung.
- Weiterentwicklung der Kernmaterialüberwachung und Anpassung an die Bedingungen der direkten Endlagerung.

2.1.2.3 Kompetenzerhaltung und internationale Kooperation

In der Reaktorsicherheits- und Endlagerforschung werden modernste analytische und experimentelle Verfahren entwickelt und angewandt. Die Ergebnisse stehen allen mit Fragen der nuklearen Sicherheit befassten Institutionen zur Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik (anwendungsorientierte Grundlagenforschung) zur Verfügung. Die Arbeiten stellen hohe Ansprüche an die Kreativität der Forscher, erfordern eine wissenschaftlich kritische Arbeitsweise und technische Anwendbarkeit der Ergebnisse.

Die Effektivität der deutschen Forschung wird erhöht, indem intensiv die Möglichkeiten der internationalen Zusammenarbeit und des wissenschaftlichen Austausches genutzt werden. So werden deutsche Forschungsstellen ausdrücklich darin unterstützt, sich an den Ausschreibungen der Europäischen Union zu beteiligen und sich in Konsortien einzubringen, in denen wechselseitige Nutzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse, eine die Projekte überdauernde Zusammenarbeit

und Integration sowie schließlich die führende Rolle Europas in Fragen der kerntechnischen Sicherheit angestrebt werden. Dies gilt insbesondere auch für die intensive themenspezifische Zusammenarbeit zur Erhöhung der Sicherheit von Kernkraftwerken sowjetischer Bauart.

Der Gefahr eines gravierenden Mangels an qualifiziertem Nachwuchs auf dem Gebiet der Kerntechnik und eines damit einhergehenden einschneidenden Know-how- und Kompetenzverlustes bei deutschen Behörden, Gutachtern und in Forschungseinrichtungen muss entgegengewirkt werden. Daher wird die Initiative „Kompetenzerhalt in der Kerntechnik (KEK)“ des BMWA fortgeführt. Mit diesem Angebot zu anspruchsvoller Forschungsfähigkeit wird jungen diplomierten Ingenieuren und Naturwissenschaftlern die Gelegenheit gegeben, sich durch Mitarbeit in Vorhaben der projektgeförderten Reaktorsicherheitsforschung weiter zu qualifizieren.

Durch intensive Mitwirkung deutscher Fachleute in internationalen Institutionen wie der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO), der Nuklear-Energie-Agentur (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) sowie der Europäischen Union (EU) nimmt Deutschland heute auf die internationalen Sicherheitsdiskussionen zur Kerntechnik als kompetenter Partner gestaltenden Einfluss.

Den OECD-Projekten gemeinsam ist das Interesse vieler Länder an der Lösung einer gemeinsam erkannten sicherheitstechnischen Fragestellung und an der effizienten, gemeinsamen Nutzung der international noch verfügbaren experimentellen Ressourcen durch gemeinsame Finanzierung der erforderlichen Arbeiten.

Die Projekte erbringen einen hohen wissenschaftlichen Mehrwert. Experten aus verschiedenen Ländern diskutieren gemeinsam bis in technische Details die Planung der Projekte, beeinflussen zielgerichtet deren Durchführung und interpretieren die Ergebnisse in ihren sicherheitstechnischen Auswirkungen.

2.1.2.4 Haushaltsmittel

Für den Forschungsbereich „Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung“ sind für den Zeitraum 2005 –2008 Mittel in Höhe von rd. 94 Mill. € vorgesehen.

Tab. 2.3: BMWA-Projektförderung “ Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung” (in Tsd. €)

Ist	**Soll**	**Plandaten**			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
24.125	25.500	23.605	23.480	23.480	23.480

Literatur

[1] Bericht der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) berufenen Arbeitsgruppe (Evaluierungskommission) (2000): Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung in Deutschland

[2] Kompetenzverbund Kerntechnik (2003): Themen der nuklearen Sicherheits- und Endlagerforschung in Deutschland 2002-2006, Reaktorsicherheitsforschung

2.2 Energieforschung BMU

Erneuerbare Energien wie Solarenergie, Windkraft, Geothermie, Biomasse und Wasserkraft sind nahezu unerschöpfliche und umweltschonende Energiequellen und stellen deshalb eine der großen Optionen für eine zukunftsfähige Energieversorgung dar. Ihre beginnende breite Nutzung zur Stromversorgung und zur Wärmebereitstellung leistet bereits jetzt einen wichtigen Beitrag zur Ressourcenschonung, insbesondere dem Klimaschutz, aber auch zur Stärkung des Innovationsstandortes Deutschland.

Die Bundesregierung hat sich mit ihrer Politik für eine zukunftsfähige Energieversorgung darauf verständigt, den Anteil der erneuerbaren Energien bis 2010 auf mindestens 12,5 % an der Stromerzeugung und 4,2 % am Primärenergieverbrauch zu erhöhen. Mittel- und langfristige Ziele der Bundesregierung sind 20 % Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung bis 2020 und 50 % Anteil am Primärenergieverbrauch 2050 [1, 2]. Derzeit haben erneuerbare Energien einen Anteil von rund 8 % an der Stromerzeugung und gut 3 % am Primärenergieverbrauch [3].

Tab. 2.10: Beitrag der erneuerbaren Energien zur Energiebereitstellung im Jahr 2003

	Beitrag der erneuerbaren Energien[1] (PJ)	**Anteil der erneuerbaren Energien (%)**
Stromerzeugung	205,1	7,9
Wärmeerzeugung	219,0	4,1
Kraftstoffe	24,2	0,9
Primärenergieverbrauch	448,3	3,1

[1]Primärenergieäquivalent nach Wirkungsgradmethode

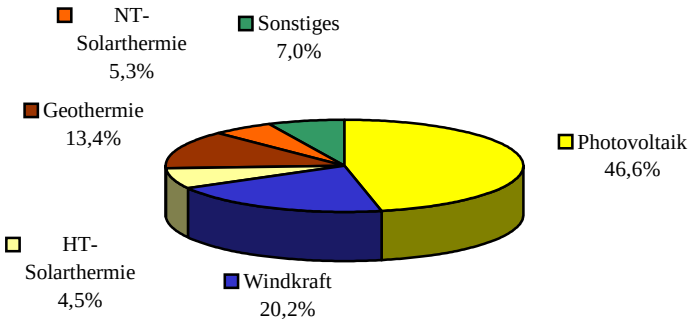
Für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sind derzeit (2003) vor allem die Wasserkraft mit 44 % und die Windenergie mit 40 % Anteil von großer Bedeutung. Bei der Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien stellt die Biomasse mit 93 % den Hauptanteil.

Durch die Nutzung der erneuerbaren Energien wurden 2003 rund 53 Mio. Tonnen CO_2 eingespart. Dieser wichtige Beitrag zum Klimaschutz ist den günstigen politischen Rahmenbedingungen zu verdanken. Zu nennen sind insbesondere das Erneuerbare-Energien-Gesetz, das im Zu-

sammenhang mit der ökologischen Steuerreform stehende Marktanreizprogramm für erneuerbare Energien sowie die jahrelange intensive Forschungsförderung.

Die Schwerpunkte der Forschungsförderung lagen und liegen auch künftig in den Technologiebereichen mit hohem Ausbau- und Innovationspotenzial: der Photovoltaik und der Windkraft, insbesondere im Wind-Offshore-Bereich. Daneben fördert das BMU die Forschung zur Hochtemperatur-Solarthermie, zur Niedertemperatur-Solarthermie, zur Geothermie und zur Wasserkraft. Die Bioenergieforschung erfolgt in der Zuständigkeit des BMVEL (vgl. Kapitel 2.3).

Abb. 2.8: Verteilung der Fördermittel für die Energieforschung des BMU im Durchschnitt der Jahre 2001-2004



An dieser Schwerpunktsetzung wird sich die Forschungsförderung des BMU auch in den kommenden Jahren orientieren, wobei in begrenztem Umfang auch Mittel für die Erforschung neuer, besonders innovativer Lösungen zur Nutzung erneuerbarer Energien eingesetzt werden sollen.

Zentrales Ziel der Forschungsförderung ist es, die Kosten der erneuerbaren Energien weiter zu senken und so die Ausgangsbedingungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien zu verbessern. Um dieses übergeordnete Ziel zu erreichen, müssen zum einen die Wirkungsgrade von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien weiter gesteigert werden. Zum anderen geht es darum, den Produktionsprozess effizienter und damit kostengünstiger zu gestalten. Schließlich muss in verschiedenen Bereichen die Lebensdauer von Anlagen bzw. einzelnen Komponenten verlängert werden.

Zu den weiteren Zielen der Forschungsförderung gehört es,

- die Wettbewerbsfähigkeit in allen Bereichen der erneuerbaren Energien zu erhöhen,

- die Technologieführerschaft in besonders innovativen Bereichen, wie z.B. der Photovoltaik und der solarthermische Kraftwerke, zur Sicherung des High-tech Standortes Deutschland und seiner Exportchancen zu halten und auszubauen,
- den Ausbau der erneuerbaren Energien möglichst umwelt- und naturverträglich zu gestalten.

Darüber hinaus besteht in allen Bereichen der erneuerbaren Energien ein hoher Nachholbedarf in spezifischer Bildung, Ausbildung und Training, um den wachsenden Bedarf dieser jungen und sich dynamisch entwickelnden Branche an qualifizierten Arbeitskräften decken zu können.

Aus diesen Gründen setzt die Bundesregierung im Rahmen der Energieforschung einen klaren Schwerpunkt bei den erneuerbaren Energien. Die hierfür im Haushaltsjahr 2005 zur Verfügung stehenden Mittel wurden gegenüber den Vorjahren deutlich erhöht. Nur mit Hilfe einer intensiven Forschungsförderung können die erneuerbaren Energien mittel- bis langfristig wettbewerbsfähig werden und in einem ausgewogenen Energiemix einer nachhaltigen Energieversorgung einen wachsenden Beitrag leisten.

Welches Potenzial die erneuerbaren Energien langfristig zur Energiebereitstellung haben, ist in vielen Studien wissenschaftlich untersucht worden. Neben der Studie „Ökologisch optimierter Ausbau der erneuerbaren Energien“ des DLR u. a. [4], die aktuelle Szenarienbetrachtungen sowohl unter ökologischen als auch unter ökonomischen Gesichtspunkten bewertet, liefert auch das Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) „Energiewende zur Nachhaltigkeit“ [5] wissenschaftliche Aussagen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien. Sie kommen zu folgenden Ergebnissen:

- Die Photovoltaik wird in Deutschland erst langfristig mit einem höheren Anteil zur Stromversorgung beitragen, gleichwohl hat sie unter allen erneuerbaren Energien das höchste Innovationspotential und bedarf verstärkter Forschungsförderung. Ihr Anteil am Stromverbrauch in Deutschland könnte von jetzt 0,1 % auf 1,1 % in 2020 und 5 % in 2050 steigen [4]. Weltweit wird der Anteil der Solarenergie (Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke zusammen) nach Angaben des WBGU bis 2050 auf rd. 28 % steigen. So könnte zusammen mit Solarstromimporten, z. B. aus solarthermischen Kraftwerken, der Anteil des Solarstroms bis 2050 in Deutschland auf rd. 18 % der Stromerzeugung steigen [4].

- Für die Windenergie, die in 2003 über 3,1 % zur Stromerzeugung in Deutschland beiträgt, geht die o. g. DLR-Studie von Steigerungen auf bis zu 18 % bis 2020 und 29 % bis 2050 aus [4].
- Die Geothermie könnte in Deutschland bis 2020 zu 0,5 % zur Stromerzeugung und zu 0,9 % zur Wärmebereitstellung beitragen. Bis 2050 könnten diese Anteile auf 3,1 % bzw. 7,7 % in Deutschland steigen [4].
- Der Anteil der Niedertemperatur-Solarthermie an der Wärmebereitstellung könnte in Deutschland von derzeit noch 0,2 % auf 2 % in 2020 und auf 10 % in 2050 steigen [4].

Vor dem Hintergrund dieser Ausbaupotenziale und insbesondere unter Berücksichtigung des Innovationspotenzials der einzelnen erneuerbaren Energieformen wird der im Folgenden dargestellte Forschungsbedarf abgeleitet.

2.2.1 Photovoltaik

Die Photovoltaik ist eine Hochtechnologie, bei der Solarzellen das Sonnenlicht direkt in elektrischen Strom umwandeln. Obwohl sich zur Herstellung von Solarzellen grundsätzlich eine Vielzahl von Halbleitermaterialien eignen, haben sich nur einige wenige technisch durchgesetzt. Heute bestehen weltweit 99 % aller kommerziell gefertigten Solarzellen aus Silizium.

In dem noch jungen Photovoltaik-Markt ist Deutschland nach Japan sowohl in der produzierten Leistung als auch im erreichten Stand der Technologieentwicklung führend. Gemessen an der in 2003 neu installierten Leistung führt Japan mit 219 MW vor Deutschland mit 128 MW und den USA mit 66 MW. Dem Erfolg des 100.000 Dächer-Solarstrom-Programms, des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes und der bisherigen Forschungsförderung ist zu verdanken, dass in Deutschland bis Ende 2003 insgesamt 405 MW Photovoltaik-Leistung installiert wurden. Das bedeutet eine Verzehnfachung der installierten PV-Solarstromleistung von 1997 bis 2003. Um die Technologieführerschaft Deutschlands bei dieser innovativen Hochtechnologie zu halten und auszubauen, bedarf es der Verstärkung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Um den Anteil der Photovoltaik-Solarstromproduktion zu erhöhen, müssen die Kosten deutlich gesenkt werden. Das Kostensenkungspotenzial ist bei der Photovoltaik unter allen erneuerbaren Energien am größten. Dies liegt zum einen daran, dass die Lücke zwischen den im Labor erziel-

ten und in der Produktion erreichten Wirkungsgraden noch erheblich ist. Zum anderen führt die Erhöhung der Produktion zu sinkenden Kosten. Bei einer Fortsetzung des Marktwachstums mit durchschnittlich 25 % pro Jahr wird prognostiziert, dass die derzeit mit 0,7 – 0,9 €/kWh noch sehr hohen Stromgestehungskosten sich bis 2010 auf 0,2 – 0,4 €/kWh reduzieren und im Jahr 2020 bei 0,2 €/kWh und damit im wettbewerbsfähigen Bereich liegen. Bis 2050 wird eine Kostenreduktion um 80 % verglichen zum Jahr 2000 erwartet [4].

Die gegenwärtigen Entwicklungsarbeiten in der Photovoltaik-Forschung konzentrieren sich auf die Verbesserung bestehender Solarzellen, Module und Systemkomponenten, sowie auf die Entwicklung neuer Solarzelltypen im Dünnschichtbereich. Um die angestrebte Kostensenkung zu erreichen, stehen die folgenden drei Förderschwerpunkte im Mittelpunkt:

- die Wirkungsgrade müssen sowohl im Labor, vor allem aber bei den kommerziell produzierten Solarzellen weiter erhöht werden,
- der Materialeinsatz muss durch neue Materialien und –kombinationen reduziert werden und
- die Fertigungstechnologien müssen weiter automatisiert und energie- und kosteneffizienter werden.

Da gegenwärtig nicht klar ist, welche der derzeit untersuchten Technologien und Materialien in Zukunft marktbeherrschend sein werden, ist es notwendig mehrere als aussichtsreich erscheinende technologische Linien hinsichtlich ihres Kostenreduktions- und Effizienzpotentials zu untersuchen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich dabei auf alle nachfolgend genannten Fertigungsstufen.

Silizium-Wafertechnik

Der Rohstoff Silizium bildet die Basis der Fertigungskette. Er wird derzeit ganz überwiegend aus Silizium-Abfällen der Elektronikindustrie gewonnen. Da absehbar ist, dass bereits in wenigen Jahren auf Grund des weltweit starken Wachstums des Photovoltaikmarktes und der damit einhergehenden erhöhten Nachfrage nach Silizium die Rohstoffbasis nicht mehr allein über diesen Weg gedeckt werden kann, sind bereits Entwicklungsarbeiten an einer auf den Bedarf der PV-Produktion zugeschnittenen Silizium-Rohstoffversorgung begonnen worden.

Aus den in einem Kristallisationsprozess gewonnen multikristallinen Silizium-Blöcken oder einkristallinen Silizium-Stäben werden die für die Herstellung von Solarzellen notwendigen Scheiben (Wafer) herausgeschnitten. Die Waferdicke konnte in den vergangenen Jahren von 400 µm

auf ca. 200-300 µm reduziert werden. Der nachfolgende Prozess erfolgt entweder über die Drahtsägetechnologie, die in den letzten Jahren hinsichtlich der Kostenreduktion beachtliche Fortschritte erzielt hat, oder über die Kristallisation der Siliziumscheiben in Form von dünnen Bändern direkt aus der Siliziumschmelze. Alternativ erfolgt auch die Abscheidung von dünnen Schichten aus der Gasphase auf preisgünstigere Substrate, was im Vergleich zum Sägeprozess zu deutlichen Materialeinsparungen und damit Kostensenkungen führt. Zur Abscheidetechnologie besteht allerdings noch Entwicklungsbedarf.

Durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten konnten die Wirkungsgrade von Solarzellen aus beiden Materialien, multi- bzw. monokristallinem Silizium, erhöht werden. Im Labor werden bereits über 20 % erreicht, in der Produktion 14 bis 17 %. Der anschließende Prozessschritt der Weiterverarbeitung der Solarzellen zu Modulen ist weitgehend ausgereift. Die typischen Modulgrößen von 125 cm x 125 cm erreichen Modulwirkungsgrade von 10 % bis 15 %.

Dünnschichtsolarzellen

Im Vergleich zu den Dickschichtsolarzellen (200 - 300 µm), die derzeit mit einem Anteil von rd. 95 % den Photovoltaikmarkt beherrschen, haben die Dünnschichtsolarzellen (0,5 - 2 µm) derzeit nur einen Marktanteil von 5 %. Trotz intensiver Forschung und Entwicklung in den vergangenen Jahren konnten die theoretischen Kostenvorteile der innovativen Dünnschicht-Technologie bislang noch nicht in der Produktion umgesetzt werden. Den Vorteilen der Dünnschicht-Technologie, wie großflächige Beschichtung, integrierte Serienverschaltung, hohe Materialeinsparung und größere Flexibilität bei der Verwirklichung innovativer Zellkonzepte, stehen gegenwärtig Nachteile, wie z. B. der Rückstand in der technologischen Entwicklung und industriellen Umsetzung sowie mangelnde Langzeiterfahrungen, gegenüber. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass mittelfristig die Dünnschicht-Technologie und langfristig die kristalline Silizium-Dünnschicht-Technologie die größten Entwicklungsperspektiven haben. Derzeit befinden sich verschiedene Technologielinien in Entwicklung:

- Dünnschichtsolarzellen aus amorphem Silizium – Die Produktionskapazitäten in Deutschland liegen derzeit bei ca. 3 MW/a, der Wirkungsgrad bei 6 %.
- Chalkopyrit-Dünnschichtzellen (CIS) – Die Produktionskapazitäten liegen bei 1 MW/a, der Wirkungsgrad bei über 10 %.
- Dünnschichtsolarzellen aus Cadmiumtellurid (CdTe) – Die Produktionskapazität liegt bei 10 MW/a, der Wirkungsgrad bei ca. 5 %.

- Polykristalline Silizium-Dünnschichtzellen befinden sich derzeit noch im Forschungsstadium; eine Produktionsreife ist erst mittelfristig zu erwarten.

Diese Schwerpunkte in der projektorientierten Forschungsförderung des BMU ergänzen die stärker grundlagenorientierte Förderung des BMBF bei der Entwicklung von Dünnschichtsolarzellen (vgl. hierzu Kapitel 2.4). Die Förderprogramme sind aufeinander abgestimmt.

Systemtechnik

Die Systemtechnik zur Einspeisung von Solarstrom ins Elektrizitätsnetz ist technisch ausgereift. Entwicklungsarbeiten konzentrieren sich deshalb auf dezentrale Einspeisesysteme auf der Niederspannungsebene sowie auf Inselsysteme, für die ein Energiemanagementsystem und kostengünstige Elektrizitätsspeicher entwickelt werden müssen.

Aus dem dargestellten Stand der Entwicklung ergeben sich in den einzelnen Bereichen folgende Forschungsziele:

Silizium-Wafertechnologie

Um den Bedarf der Photovoltaik-Industrie an Silizium decken zu können, müssen Technologien zur kostengünstigen Herstellung von Solarsilizium entwickelt und entsprechende Produktionskapazitäten aufgebaut werden. Hinsichtlich des oben dargestellten Kristallisationsprozesses geht es vor allem darum, die Materialqualität zu verbessern und den Energieaufwand bei der Fertigung zu reduzieren.

Kurzfristiges Entwicklungsziel der Wafertechnik ist es, die Scheibenfertigung durch neue Sägetechnologien zu optimieren, um Schnittverluste zu reduzieren und die Bruchfestigkeit zu erhöhen. Weiterhin geht es um den Übergang zu größeren (von jetzt 100 mm^2 zu 400 mm^2) und dünneren (von jetzt 200 - 300 µm zu 100 µm) Waferformaten. Mittel- bis langfristiges Ziel ist die Entwicklung neuer Techniken zur Waferherstellung ohne Sägeprozess, z. B. durch Silizium-Folienziehen und Silizium-Gießen, damit die für die Massenproduktion notwendigen Materialeinsparungen und Kostenreduktionen realisiert werden können.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bei den Silizium-Solarzellen konzentrieren sich darauf, die bereits im Labor erreichten Wirkungsgradsteigerungen durch verbesserte Prozesstechniken auch in der Produktion zu realisieren. Darüber hinaus sind neue Solarzellenkonzepte zu erforschen, die die Anforderungen an die künftige Massenproduktion erfüllen. Die Zell- und Mo-

dulherstellung ist insgesamt darauf auszurichten, dass der Energieeinsatz in der Produktion reduziert und umweltbelastende Stoffe vermieden werden. Neben diesen technischen Entwicklungen ist die Qualitätssicherung bei Modulen zu verbessern. Ziel ist es, über eine Lebensdauer von mindestens 25 Jahren eine Produktionsnennleistung von mindestens 90 % aufrecht zu erhalten. Schließlich sind auch Fragen des Recyclings zu untersuchen.

Dünnschichttechnik

Die gegenwärtig in Entwicklung befindlichen Technologielinien zeichnen sich durch eine sehr heterogene technologische Reife aus. Am weitesten entwickelt ist die des a-morph/mikrokristallinen Siliziums. Hier zielt die Weiterentwicklung auf die Verbesserung des noch zu geringen Modulwirkungsgrades und der noch unbefriedigenden Abscheiderate. Bei den Cadmiumtellurid-Modulen werden die Entwicklungspotenziale, unabhängig von den zu beachtenden ökologischen Aspekten beim Cadmium, als nicht sehr groß eingeschätzt. Die CIS-Technologie befindet sich zur Zeit noch weit von der industriellen Umsetzung entfernt, wird aber langfristig neben der kristallinen Silizium-Dünnschicht-Technologie mit am aussichtsreichsten eingeschätzt. Sie bilden daher einen Schwerpunkt der Forschungsförderung.

Insgesamt muss die künftige Forschung bei der Dünnschicht-Technologie darauf ausgerichtet werden, den bisherigen Rückstand in der produktionstechnischen Reife gegenüber den marktbeherrschenden Dickschicht-Silizium-Solarzellen aufzuholen. Ein grundsätzlicher Entwicklungsbedarf besteht bei den Fertigungstechniken. Zum einen sind die Prozesse auf größere Flächen, höhere Prozessausbeute und auf die Weiterentwicklung der Anlagentechnik auszurichten. Zum anderen geht es darum, die Abscheiderate zu erhöhen und den Material- und Energieverbrauch zu senken. Wie bei den Dickschicht-Solarzellen sind Aspekte der Langzeitstabilität zu untersuchen und stabilere Dünnschichtstrukturen zu entwickeln.

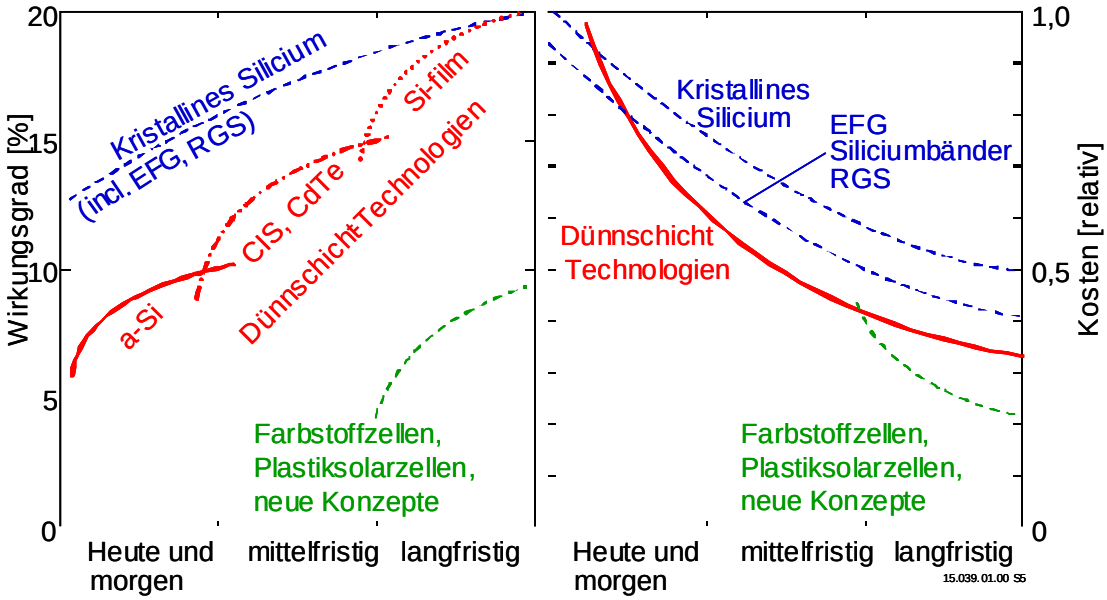
Bei den kristallinen Silizium-Dünnschichtsolarzellen sind die im Labor auf teuren Wafersubstraten erzielten hohen Wirkungsgrade zu übertragen auf preiswertere und großflächige Fremdsubstrate, damit auch hier eine industrielle Umsetzung realisiert werden kann.

Eine wichtige Rolle in der Forschung werden auch künftig neue, innovative Zellkonzepte spielen. Dazu gehören z. B. Multispektralzellen, Tandemzellen, Injektionszellen, organische Solarzellen sowie Farbstoffzellen. Um langfristig auch diesen Solarzellen-Konzepten eine Entwicklungschance zu bieten, werden die hierzu notwendigen Aktivitäten vor allem auch in der Grund-

lagenforschung (vgl. BMBF-Kapitel) weitergeführt. Forschungsziele sind dabei die Übertragbarkeit in einen industriellen Fertigungsmaßstab, die Dauerbeständigkeit und die Umweltverträglichkeit.

Die nachfolgende Grafik verdeutlicht, welche Solarzellenkonzepte kurz-, mittel- bzw. langfristig zur technologischen Reife geführt werden können.

Abb. 2.9: Perspektiven verschiedener Technologielinien der Photovoltaik



Systemtechnik

Künftige Forschungsarbeiten sind insbesondere auf die Systemtechnik für dezentrale Netzstrukturen, auf die Anpassung der Leitungselektronik an die künftigen Modulgenerationen und auf die Standardisierung großer und mittelgroßer Inselsysteme sowie die Entwicklung von sicheren, umweltfreundlichen und preiswerten Energiespeichern mit ausreichender Lebensdauer auszurichten.

Ökologische Begleitforschung

Insbesondere für Photovoltaikanlagen auf Freiflächen sind ökologische Begleitforschungsarbeiten auf die Erfassung von Auswirkungen des Baus und Betriebs der Anlagen, einschl. ökologische Mindestanforderungen und begleitende Akzeptanzforschung auszurichten.

2.2.2 Windenergie

Die Stromerzeugung aus Windenergie hat in den letzten Jahren in Deutschland einen beträchtlichen Zuwachs erfahren. Ende 2003 waren in Deutschland Anlagen mit einer Leistung von ca. 15.000 MW installiert, das neunfache gegenüber 1996. Die Energieerzeugung aus Windstrom betrug im Jahr 2003 über 3,1 % des Stromverbrauches Deutschlands. Es wird erwartet, dass die Stromgestehungskosten von derzeit rd. 12 ct/kWh insbesondere im Wind-Offshore-Bereich bei zügigem Ausbau stark sinken und 2020 zwischen 3 und 5 ct/kWh liegen könnten.

Die bis heute in Deutschland vorherrschende Technik der Windenergieanlagen (WEA) ist durch den Einsatz von WEA an Land geprägt und kann nur auf Betriebserfahrungen von gut einem Jahrzehnt zurückblicken. Dieser für Technologieentwicklung relativ kurze Zeitraum war mit einem schnellen Wachstum der Rotordurchmesser (von 15 auf 90 m) sowie größeren Nabenhöhen (von 25 auf über 100 m) und damit einer enormen Leistungssteigerung verbunden. Die durchschnittliche Leistung neuer WEA ist pro Anlage von 160 kW im Jahr 1990 auf über 1.500 kW im Jahr 2003 gestiegen.

In wichtigen Bereichen (z. B. Windkraft an Land, Gründung und Montage, Aerodynamik bei Rotoren, Generatoren) ist die Technik inzwischen ausgereift. Dies ging einher mit dem Trend zur Installation von leistungsstarken WEA im Bereich der 2 - 3 MW-Klasse. Erste Prototypen mit 4,5 - 5 MW installierter Leistung befinden sich im Probebetrieb.

Mit dem Übergang auf See ist für die Windenergieerzeugung eine große technologische Herausforderung und ein notwendiger Quantensprung in ihrer Entwicklung verbunden. Bisher liegen weltweit nur wenige Erfahrungen bei der Windstromerzeugung auf See vor. Diese Erfahrungen wurden mit Onshore-WEA in überwiegend küstennahen Bereichen gewonnen und sind nur eingeschränkt auf die deutschen Windparkgebiete in Nord- und Ostsee übertragbar. Diese befinden sich in der ersten Ausbaustufe größtenteils in einer Entfernung von 40 bis 100 km von der Küste bei Wassertiefen von bis zu 40 m. Es ergeben sich somit zahlreiche neue technische und nichttechnische Anforderungen, die vor allem aus den geophysikalischen Bedingungen auf hoher See, der großen Entfernung zu den Servicezentren und der Netzanbindung resultieren.

Im Mittelpunkt der künftigen Windenergie-Forschung stehen vor diesem Hintergrund zum einen die technologiespezifischen Probleme beim Ausbau im Offshore-Bereich und zum anderen die

Verbesserung der gesellschaftliche Akzeptanz sowie der naturverträgliche Ausbau der Windenergienutzung auf See und an Land.

Technikforschung

Künftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Technik sind insbesondere auf die Kostenreduktion und die Steigerung des Ertrags von WEA on- und offshore sowie auf die verstärkte Automatisierung bei der Herstellung und Errichtung der WEA auszurichten.

Im Offshore-Bereich sind Aussagen zur Technik der Windenergieanlagen sowie zu deren Wirtschaftlichkeit, Betriebskosten bzw. Wartungsmanagement gegenwärtig noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Bevor Windparks im großen Maßstab errichtet werden, muss sichergestellt sein, dass die Anlagen unter den rauen Bedingungen auf See dauerhaft zuverlässig betrieben werden können. Das erfordert sowohl die Anpassung der WEA an die Bedingungen auf hoher See als auch die Entwicklung offshore-spezifischer Technologien, die zur Minimierung der auf See gegebenen höheren Kosten und Risiken für die Stromerzeugung führen. Entwicklungen der Offshore-Windkraft werden in der Regel auch dem Onshore-Bereich zugute kommen.

Unter den Gesichtspunkten Kostensenkung und Ertragssteigerung stehen on- und offshore Forschungsaktivitäten im Vordergrund, die auf eine höhere Verfügbarkeit der Anlagen abzielen. Dazu gehören Vorhaben zur Regelungs-, Steuerungs- und Überwachungstechnik (z. B. Fehlerfrüherkennung), die Materialforschung (z. B. im Hinblick auf Gewichtsreduzierung und Langlebigkeit) sowie das Wartungs- und Reparaturmanagement.

Weitere zentrale Ansatzpunkte zur Kostensenkung insbesondere im Offshore-Bereich sind Forschungsaktivitäten auf folgenden Gebieten:

- Tragstrukturen wie Fundament und Turm (ca. 25-50 % der Investition einer WEA im Offshore-Bereich),
- Reduktion des Anlagengewichts (vorwiegend der Gondel bzw. des Triebstranges),
- neue Gründungskonzepte (z. B. sichere Verankerung im Boden, schwimmende Gründung),
- Reduktion von Strukturbelastungen im Triebstrang und in der Turmkonstruktion,
- Automatisierung bei Herstellung (z. B. Rotorblätter), Montage, Betriebsführung und Wartung der Windenergieanlagen,
- Konzepte zur Montage- und Logistik.

Von entscheidender Bedeutung für den weiteren Ausbau der Windenergie ist darüber hinaus die Integration ins Netz. Forschungsbedarf besteht hier zur Netzanbindung von Offshore-Windparks, zu Fragen des Last- bzw. Engpassmanagements, zu windenergiespezifischen Fragen der Speicherung (vgl. hierzu auch BMWA-Forschung zu Speichertechnologien, Kapitel 2.1) sowie zu verbesserten Windprognosen.

Weitere wichtige Themenfelder für Forschung und Entwicklung sind:

- die Recyclingfähigkeit der Anlagen,
- die Verknüpfung von Windenergieanlagen mit anderen Aktivitäten (z. B. Wellenkraft, Wasserstoffherstellung, Meerwasserentsalzung, Fischzucht),
- extreme Wind- und Wellenereignisse (Vorhersage, Berücksichtigung bei der Konzeption der Anlagen),
- sowie die Weiterentwicklung kleiner Windanlagen für dezentrale Energiekonzepte in Entwicklungsländern.

Ökologische Begleitforschung

Von entscheidender Bedeutung ist, dass der Ausbau der Windenergie umwelt- und naturverträglich erfolgt. Daher wird der ökologischen Begleitforschung ein hoher Stellenwert im Rahmen der Forschungsaktivitäten eingeräumt.

Im Bereich der Offshore-Windenergienutzung stehen dabei mögliche Auswirkungen von Windenergieanlagen auf den Vogelzug (z. B. Beeinflussung der Routen, Kollisionsrisiko), auf Seevögel (z. B. durch Lebensraumverlust), auf Meeressäuger (z. B. durch Schallemissionen), auf die Tier- und Pflanzenwelt des Meeresbodens (Benthos), sowie auf Fische im Vordergrund. Zur Bewertung der Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme (u. a. durch Lärm, elektromagnetische Felder, Erschütterungen) und den Vogelzug sollen bau- und betriebsbegleitend Untersuchungen durchgeführt und Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen entwickelt und auf ihre Wirksamkeit überprüft werden.

Bedeutend ist darüber hinaus die Erforschung von kumulierenden Wirkungen, die u. a. durch Windparks, Schiffe, die Fischerei und die Gewinnung von Bodenschätzen verursacht werden. In diesem Zusammenhang sollen sowohl Emissionen als auch Veränderungen des Lebensraumes betrachtet werden. Ziel ist es, auf der Basis einer Bestandsaufnahme Bewertungsmodelle und

Maßnahmen zur Vermeidung- und Verminderung möglicher Auswirkungen zu entwickeln und Belastungsgrenzen zu erarbeiten.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Vernetzung von Forschungsvorhaben und Daten (Einrichtung von Datenbanken und Verknüpfung mit geographischen Informationssystemen, digitaler ökologischer Atlas). Dabei ist die Gewährleistung einer hohen Qualität der Daten von besonderer Bedeutung.

Bei den Windenergieanlagen an Land gilt es, vor dem Hintergrund der wachsenden Höhe der Anlagen und einer weiteren Zunahme von Standorten die Auswirkungen auf Vögel und Fledermäuse (u. a. Meideverhalten, Kollisionshäufigkeiten) weiter zu untersuchen und geeignete Vermeidungs- und Verminderungsmaßnahmen zu entwickeln. Gerade bei den Windenergieanlagen an Land spielen im übrigen Akzeptanzfragen eine wichtige Rolle.

Forschungsplattformen in Nord- und Ostsee

Eine wichtige Rolle für den Offshore-Bereich spielt die Forschung auf Plattformen. Auf der in der Nordsee stehenden Forschungsplattform FINO 1 sind Messdaten zu Windereignissen, Zeitreihen von Gezeiten, Seegang und Strömung zu erheben und auszuwerten. Daraus sind Modelle für eine optimierte Bemessung der Gesamtkonstruktion aus Gründung und WEA abzuleiten. Weitere Messplattformen in Nord- und Ostsee sind in Planung.

Auch im Rahmen der ökologischen Begleitforschung kommt den Plattformen eine bedeutende Rolle zu. Die Erfassung des maritimen Lebensraums (u. a. Vogelzuggeschehen) kann räumlich in den für die Offshore-Windenergienutzung vorgesehenen Meeresgebieten und zeitlich vor dem Bau von Windparks sowie im Rahmen des Genehmigungsprozesses erfasst werden. Darauf aufbauend gilt es dann, naturschutzfachliche Bewertungsgrundlagen und Prognosemodelle weiterzuentwickeln.

Abb. 2.10: Forschungsplattform FINO 1 in der Nordsee

2.2.3 Hochtemperatur-Solarthermie

In solarthermischen Kraftwerken wird Sonnenlicht durch Spiegelsysteme auf einen Absorber gebündelt und die dort erzeugte Hochtemperaturwärme mit Hilfe konventioneller Technik (z. B. Dampfturbinen) zur Stromproduktion genutzt. Je nach Art der Spiegelsysteme werden Parabolrinnenkraftwerke, Turmkraftwerke und dezentrale Einheiten wie Dish-Stirling-Systeme unterschieden. Die verschiedenen Technologien zur solarthermischen Stromerzeugung befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. In allen Bereichen sind deutsche Unternehmen bzw. Forschungseinrichtungen beteiligt und nehmen teilweise eine internationale Spitzenposition ein.

Als Standorte kommen hauptsächlich die trockenen und heißen Zonen der Erde südlich des 40. Breitengrades mit einem hohen Direktstrahlungsanteil in Frage. Dort sind solarthermische Kraftwerke die effizienteste Technik, um die Energie der Sonne zur Stromerzeugung zu nutzen. Sie werden daher in der Energieversorgung der Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Für Mitteleuropa bietet die Technologie langfristig die Option, nachhaltig erzeugten Strom durch Importe aus den Ländern des Sonnengürtels der Erde zu beziehen. Solarthermische Kraftwerke können einen wichtigen Beitrag leisten, die langfristig weltweit erforderlichen Minderungen der Treibhausgasemissionen zu erreichen.

In Regionen mit einem hohen Anteil von diffusem Sonnenlicht, wie z. B. Deutschland, sind solarthermische Kraftwerke nicht geeignet, da nur die direkte Sonnenstrahlung mittels Spiegeln gebündelt werden kann. Dennoch hat Deutschland unter klimapolitischen wie auch unter industriepolitischen Gesichtspunkten ein hohes Interesse an Solarkraftwerken. Neben den USA ist Deutschland führend in der Technologieentwicklung. In Deutschland können nicht nur die High-Tech-Komponenten solarthermischer Kraftwerke hergestellt, sondern auch System- und Standortanalysen bis hin zur vollständigen Systemauslegung durchgeführt werden.

Um die weltweite Markteinführung solarthermischer Kraftwerke zu ermöglichen und deren Stromgestehungskosten von jetzt rd. 12-15 ct/kWh auf unter 6 ct/kWh zu reduzieren, wurde die „Global Market Initiative“ auf den Weg gebracht. Diese verfolgt das Ziel, bis 2015 weltweit solarthermische Kraftwerke mit einer Kapazität von etwa 5000 MW zu errichten. Auf der Weltkonferenz für erneuerbare Energien im Juni 2004 in Bonn wurde die Initiative durch multilaterale Vereinbarungen unterstützt und in das internationale Aktionsprogramm aufgenommen.

Forschung und Entwicklung im Bereich solarthermischer Kraftwerke umfasst sowohl die Grundlagenforschung (vgl. BMBF-Kapitel) als auch die anwendungsorientierte Forschung bis hin zur Demonstration innovativer Technologien.

Im Fokus künftiger Forschungsaktivitäten steht die Weiterentwicklung marktnaher Technologien mit dem Ziel, die Kosten weiter zu senken bzw. die Erträge – z. B. über höhere Wirkungsgrade - zu steigern. Wichtig ist, darüber hinaus eine hohe Zuverlässigkeit der Anlagen zu gewährleisten sowie die Lebensdauer der Systeme und einzelner Komponenten zu erhöhen.

Als entscheidende Voraussetzung für die Markteinführung aller Technologielinien gilt es, die Realisierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen voranzutreiben. Diese liefern Betriebserfahrungen und damit die notwendigen Erkenntnisse für die Qualifizierung und für weitere Optimierungen. Dies umfasst auch Herstellungs-, Fertigungs- und Montageverfahren sowie die Automatisierung von Betriebs- und Wartungsabläufen.

Technologieübergreifend ist die Energiespeicherung als Forschungsschwerpunkt relevant. Speicher erhöhen die Kapazität der Kraftwerke sowie die Verfügbarkeit der Solarenergie und wirken somit ertragssteigernd. Forschungsbedarf besteht bei thermischen Speichern für sämtliche Technologielinien solarthermischer Stromerzeugung sowie bei der chemischen Speicherung konzent-

rierter Solarstrahlung. Die bei der chemischen Speicherung erzeugten Brennstoffe (z. B. Wasserstoff) können einem konventionellen Kraftwerksprozess zugeführt werden.

Von entscheidender strategischer Bedeutung für Forschung und Entwicklung im Bereich konzentrierender Solarsysteme ist der Zugang zum spanischen Forschungszentrum Plataforma Solar de Almería in Andalusien. Die langjährige Forschungskooperation zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und mit dem spanischen Betreiber CIEMAT gilt es zu sichern und im Hinblick auf zukünftige Projekte auszubauen.

Über diese grundsätzlichen Ausführungen hinaus stellen sich für die einzelnen Technologiefelder die Forschungsaktivitäten wie folgt dar:

Parabolrinnenkraftwerke

Parabolrinnenkollektoren verwenden als Wärmeträgermedium ein synthetisches Thermoöl, das sich beim Durchgang durch den Kollektor auf knapp 400 °C erwärmt und dann durch einen Wärmeüberträger zur Dampferzeugung fließt. Diese Technologie ist zurzeit am nächsten an der Markteinführung. Deutsche Hersteller haben das in den kalifornischen Solarkraftwerken erprobte Kollektordesign unter dem Namen EuroTrough weiterentwickelt und bei laufenden Betrieb wissenschaftlich untersucht. Es wurden Wirkungsgradverbesserungen von bis zu 10 % erzielt.

Im Hinblick auf die Ziele Ertragssteigerung und Kostensenkung ist bei der Parbolrinnentechnologie die Erhöhung der Kollektorbetriebstemperatur von derzeit 400 ^{0}C auf über 500 ^{0}C ein wichtiges Forschungsziel. Dabei besteht Forschungsbedarf einerseits in der Grundlagenforschung, z. B. in der Entwicklung hocheffizienter und temperaturbeständiger Absorberschichten. Andererseits gilt es, in der anwendungsnahen Forschung Kollektorsysteme zur direkten Dampferzeugung zu untersuchen und weiter zu entwickeln.

Ein weiteres wichtiges Forschungsanliegen ist es, den Bau und Betrieb des ersten Parabolrinnen-Demonstrationskraftwerks in Spanien (ANDASOL) wissenschaftlich zu begleiten. Dabei geht es darum, Erfahrungen beim Betrieb eines kommerziellen Kraftwerkes zu sammeln und einzelne Komponenten wie auch das Gesamtsystem weiterzuentwickeln.

Vielversprechende Ergebnisse lieferten die bisherigen Untersuchungen zu dem der Parabolrinne ähnlichen Konzept der Fresnel-Kollektoren. Bislang konnten hierzu aber noch keine praktischen

Erfahrungen zu Wirkungsgraden, Kosten und Zuverlässigkeit des Systems gesammelt werden. Weitere Forschungsarbeiten setzen an diesen Punkten an, zielen auf die technisch-wirtschaftliche Optimierung von Fresnel-Kollektoren und sehen einen Prototyptest vor.

Solarturmkraftwerke

Bei Solarturmkraftwerken wird die Sonnenstrahlung durch ein Feld einzeln nachgeführter Spiegel (Heliostate) auf die Spitze eines Turms konzentriert, wobei Temperaturen bis 1.000 °C entstehen können. In der Turmspitze befindet sich ein Strahlungsempfänger (Receiver), der die Strahlung in Wärme umwandelt. Diese wird in einem konventionellen Kraftwerksprozess zur Stromerzeugung genutzt. Bislang steht jedoch die Markteinführung von Turmkraftwerken noch aus. Das größte Hindernis besteht darin, dass noch keine Referenzanlage existiert, die das technische und finanzielle Risiko für ein breites privatwirtschaftliches Engagement kalkulierbar macht.

Es gilt, die technische Demonstration von Turmkraftwerken unter realistischen Betriebsbedingungen umzusetzen und wissenschaftlich zu begleiten. Im Vordergrund stehen dabei effiziente Luftreceiversysteme, die in Deutschland entwickelt und auf der Plataforma Solar de Almería erfolgreich getestet wurden. Forschungsbedarf besteht in der Optimierung von solaren Kraftwerkskomponenten sowie bei der Einkopplung der Hochtemperaturwärme in Dampf- bzw. Gasturbinenprozesse.

Dish-Systeme

Bei dieser Technik werden ein Paraboloid-Spiegel Konzentrator und eine kleine stromerzeugende Einheit (z. B. Stirlingmotor) in einem System kombiniert und der Sonne zweiachsig nachgeführt. Paraboloid-Dish-Anlagen stehen als Prototypen im Leistungsbereich zwischen 5 und 50 kW_e zur Verfügung. Derzeit werden auf dem Gebiet der Dish-Stirling Systeme neben Komponentenentwicklungen auch Demonstrationsanlagen an fünf unterschiedlichen Standorten weltweit von der Bundesregierung unterstützt.

2.2.4 Niedertemperatur-Solarthermie

Mit Sonnenkollektoren wird die Strahlung der Sonne im Niedrigtemperaturbereich zur Wassererwärmung und Raumheizung, zur solaren Klimatisierung oder für Prozesswärme in der Industrie genutzt. Die thermische Solartechnik hat in Deutschland insbesondere dank des Marktanreiz-

programms der Bundesregierung zur Förderung erneuerbarer Energien in den vergangenen Jahren einen deutlichen Aufschwung erreicht. Mit derzeit insgesamt 5,6 Millionen m^2 installierter Kollektorfläche ist Deutschland europaweit führend. Allein in 2003 stieg die installierte Fläche gegenüber dem Vorjahr um 54 %. In den vergangenen 12 Jahren hat sich die installierte Solarkollektorfläche verzehnfacht und haben sich die Anlagenkosten halbiert. Die größten Potenziale werden dabei bis 2020 zu rd. 60 % im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser und zu rd. 30 % im Mehrgeschosswohnungsbau zusammen mit dem Ausbau solarer Nahwärmenetze erwartet. Darüber hinaus wird sich ihre Anwendung zunehmend auch auf den gewerblichen Prozesswärmemarkt ausdehnen.

Der bislang erreichte Stand der Niedertemperatur-Solarthermie ist Ergebnis der langjährigen Forschungsarbeiten unter dem Förderkonzept „Solarthermie2000“, bei dem insbesondere Technologien für Großanlagen, d. h. größer als 100 m^2 Kollektorfläche, entwickelt und umfassend erprobt wurden. Die Ergebnisse dieser Langzeituntersuchungen werden wie folgt zusammengefasst:

- Die Lebensdauer solarthermischer Systeme liegt bei über 20 Jahren.
- An großen Solaranlagen zur Wassererwärmung wurden Energieerträge von 450 bis 600 kWh/m^2 erzielt, die solaren Nutzwärmekosten lagen bei 0,13 €/kWh.
- An den Demonstrationsanlagen zur solarunterstützten Nahwärmeversorgung von Neubausiedlungen mit Ganzjahreswärmespeicher und hohen solaren Deckungsanteilen von 30-50 % am Gesamtwärmebedarf lagen die Nutzwärmekosten je nach Anlagengröße zwischen 0,17 und 0,45 €/kWh.
- Damit konnten große solarthermische Anlagen zur solar unterstützten Warmwassererwärmung zur Marktreife geführt werden. Die Ergebnisse haben zudem gezeigt, dass bei einer effizienten Systemauslegung günstige solare Erträge und solare Nutzwärmekosten nahe an der Wirtschaftlichkeit (0,12 €/kWh) erreichbar sind.

Darüber hinaus haben die bisherigen Erkenntnisse gezeigt, dass eine isolierte Betrachtung der solarthermischen Anlage und darauf abzielende Forschungsarbeiten zu kurz greifen und stattdessen eine Gesamtbetrachtung erforderlich ist. Zunächst gilt es, den Wärmebedarf zu reduzieren. Danach muss das konventionelle Energieversorgungssystem unter Berücksichtigung der Einbindung einer Solaranlage an den reduzierten Bedarf angepasst werden.

Die unter dem o. g. Förderkonzept „Solarthermie2000“ durchgeführten Messprogramme haben diese Systemmängel erkannt und Möglichkeiten zur technischen und ökonomischen Optimierung der Solartechnik selbst als auch zu deren Einbindung in die konventionelle Heiztechnik aufgezeigt.

Die Systemtechnik für große solarthermische Anlagen zur solar unterstützten Warmwasserbereitstellung ist mittlerweile weitgehend ausgereift. Systemschaltungen mit Solarpufferspeicher und Entladung über externe Wärmetauscher haben sich besonders bewährt. Darüber hinaus sollte eine Funktions- und Ertragskontrolle bei größeren Anlagen Stand der Technik sein.

Zentrales Ziel künftiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist die weitere deutliche Reduzierung der Kosten. Dazu bedarf es neuer Materialien, verbesserter Komponenten und kostengünstigerer Systeme sowie einer optimierten Auslegung des Gesamtsystems. Darauf aufbauend ist es erforderlich, Großanlagen für höhere solare Deckungsanteile (10-30 % am Gesamtwärmebedarf bzw. bis 60 % für Anlagen mit saisonaler Speicherung) zu entwickeln und zu erproben. Hierfür müssen Wassererwärmung, Raumheizungsunterstützung und Systeme zur solaren Klimatisierung miteinander kombiniert werden. Nur so ist ein höherer Anteil der Solarthermie am Gesamtwärmeverbrauch zu erreichen.

Die Forschungsförderung konzentriert sich deshalb auf drei große Anwendungsgebiete: Solarthermie in Einzelgebäuden, solare Nahwärme und solare Prozesswärme.

Solarthermie im Einzelgebäude

Generelle Ziele der Weiterentwicklung solarthermischer Anlagen für Gebäude sind sparsamer Ressourcenverbrauch, hohe Qualität sowie Langlebigkeit der Systeme. Zusätzlich ist die Entwicklung standardisierter Prüfverfahren für Wirkungsgrade bzw. Energieeinsparung sowie Langzeitstabilität voranzubringen.

Bei der Kollektorherstellung sind angesichts zu erwartender Kupferverknappung alternative Materialien mit guter thermischer Leitfähigkeit, hoher Temperaturbeständigkeit und Korrosionsfestigkeit zu untersuchen. Neben den Kollektoren sind die Speicher als zentrale Komponente der Erschließung erneuerbarer Energien zu verbessern. Die Entwicklungen zielen auf höhere Energiedichte im Speicher und nahezu verlustfreie, langfristige Speicherung durch Einsatz von Phasenwechselmaterialien und Vakuumdämmung. Da die derzeitige Solarsystemtechnik als eigen-

ständiges System ausgelegt ist, muss deren Weiterentwicklung auf die Integration der Solaranlage in das Gesamtwärmesystem im Gebäude ausgedehnt werden.

Besonderer Forschungsbedarf besteht im Zusammenhang mit der Altbausanierung. Hier stellt die Integration solarthermischer Anlagen besonders bei Mehrfamiliengebäuden erheblich höhere Anforderungen als beim Neubau, da der bauliche Aufwand größer ist und die Solaranlage in das bereits vorhandene Energieversorgungs- und -verbrauchssystem eingebunden werden muss.

Solare Nahwärme

Künftiger Forschungsbedarf besteht hier vor allem bei der hydraulischen bzw. regelungstechnischen Einbindung großer Kollektorfelder in bestehende Nah- und Fernwärmenetze, der Erschließung und technischen Weiterentwicklung von solaren Nahwärmenetzen, der konzeptionellen Forschung mit dem Ziel der Kostensenkung auf dem Gebiet der Langzeit-Wärmespeicherung und der Entwicklung integraler Konzepte in Richtung einer CO_2–freien Energieversorgung.

Hierzu bedarf es der Entwicklung hocheffizienter Kollektoren, um die Wärmeversorgung auf höherem Temperaturniveau mit hohem solarem Deckungsanteil bei guter Wirtschaftlichkeit erschließen zu können. Während die gegenwärtige Kollektortechnik auf maximalen Solarertrag ausgerichtet war, ist zukünftig die Bereitstellung eines jahres- und tageszeitabhängigen Vorlauftemperaturniveaus notwendig, was neue Ansätze für die Hydraulik und Regelungstechnik erfordert.

Um hohe solare Deckungsanteile von mehr als 50 % zu erreichen, sind Langzeit-Großspeicher zu entwickeln, deren Wirtschaftlichkeit mit dem Volumen zunimmt (z. B. hocheffiziente Erdbecken-Wärmespeicher).

Die Entwicklung der Systemtechnik in diesem Anwendungsbereich ist zum einen auf die bestmögliche Kombination solarthermischer Systeme mit anderen CO_2–freien Wärmeerzeugungstechniken ausgerichtet, z. B. mit Biomasse-Heizkesseln, zum anderen auf die optimale Einbindung der Solarenergie in die bestehenden Wärmenetze. Dies kann mit Simulationsrechnungen zur Auslegung und Ertragsprognose unterstützt werden.

Solare Prozesswärme

Der Einsatz solarthermischer Systeme für die Prozesswärme bei Temperaturen von ca. 100 °C bis ca. 250 °C erfordert weitere Entwicklungsarbeiten an hocheffizienten Kollektoren, um die Wärmeverluste deutlich zu senken. Hier müssen die Erfahrungen aus der Prozesstechnik in die solare Anwendung übertragen werden. Neben der Kollektorweiterentwicklung müssen kostengünstige und hochtemperaturgeeignete Solarfluide entwickelt werden. Auch hinsichtlich der Speichertechnik und der Systemintegration besteht weiterer Forschungsbedarf zur Nutzung der Solarthermie als Prozesswärme. Weitergehende künftige Anwendungsfelder sind z. B. Systeme zur solaren Meereswasserentsalzung oder auch energieautarke Komplettsysteme.

2.2.5 Geothermie

Die Nutzung der Erdwärme steht in Deutschland noch weitgehend am Anfang. Hier sind die in Japan, Island oder den USA vorhandenen günstigen geologischen Bedingungen nicht in gleichem Umfang gegeben. Auf Grund der relativ günstigen Temperaturcharakteristik, der geologischen Situation aber auch der wirtschaftlichen Struktur ist auf absehbare Zeit für kommerzielle geothermische Kraftwerke in erster Linie der Oberrheingraben von Interesse. Im Norddeutschen Becken sowie im Süddeutschen Molassebecken, aber auch in Regionen mit kristallinem Gestein zielt die Forschung vor allem darauf ab, auch bei niedrigeren Fließraten oder/und geringeren Temperaturen einen wirtschaftlichen Betrieb von Geothermieanlagen zu ermöglichen.

Um die geothermische Stromerzeugung näher an den Markt heranzuführen, müssen die Kosten und Risiken bei der Erschließung der geothermischen Energie weiter gesenkt werden. Die Forschungsförderung kann hierzu wichtige Beiträge leisten. Den entscheidenden Kostenblock der geothermischen Stromerzeugung bildet die Bohrung. Bis durch Bohrungen verlässlich nachgewiesen wird, in welchem Umfang Wärmeenergie und später Strom gewonnen werden können, sind bereits bis zu 80 % der gesamten Investitionskosten angefallen. Die Bohrungen stellen daher ein hohes Investitionsrisiko dar. Ein Schwerpunkt der bisherigen Förderung liegt darin, dieses Risiko zu reduzieren.

Dazu müssen die Verfügbarkeit der geologischen Grunddaten verbessert und die geophysikalischen Methoden zur Lagerstättenerkundung optimiert werden. So gibt es eine Fülle von Daten aus Bohrungen der Öl- und Gasexploration, die für die Anforderungen der Geothermie entspre-

chend gesichert und aufbereitet werden müssen. Auch gilt es, die Verfahren zur Bestimmung der Größe und der Eigenschaften nutzbarer Lagerstätten weiterzuentwickeln.

Um die Bohrkosten zu senken, muss darüber hinaus die Untertagetechnik weiter verbessert werden. Dazu müssen die heute vor allem aus der Erdöl- und Erdgasexploration verfügbaren Techniken und Verfahren weiterentwickelt und an die spezifischen Erfordernisse der Geothermieexploration bekannten Techniken und Verfahren angepasst werden. Neue Verfahren zur Nutzung geothermischer Energie, u. a. zur Stimulation der hydraulischen Bedingungen, - müssen anforderungsspezifisch entwickelt werden. Dabei müssen sie insbesondere auch im Hinblick auf Kosten und Wirkungsgrade optimiert werden.

Im Einzelnen stellt sich der diesbezügliche Forschungsbedarf wie folgt dar:

- Ergänzung und Überarbeitung der Temperatur-Datenbank durch Temperaturmessungen in Bohrungen, durch Bereitstellung unveröffentlichter Temperaturdaten sowie die verfeinerte Kartierung der Untergrundtemperaturen;
- Erfassung und Kartierung aller verfügbaren Daten zu den hydraulischen Eigenschaften der Heißwasser-Aquifere, auch unter Einsatz geostatistischer Methoden;
- Entwicklung und Erprobung von Untersuchungsverfahren und Berechnungsmodellen in der Bohrlochphysik zur Entwicklung naturwissenschaftlicher Vorhersageverfahren;
- Ermittlung und Monitoring von seismischen Risiken, ökologische Begleitforschung;
- Weiterentwicklung von Explorationsverfahren zur Prognose der Aquifereigenschaften und damit des nutzbaren Wärmestroms;
- Weiterentwicklung von Technologien zu mechanischen (Frac) und chemischen (Säure) Methoden zur Konditionierung geothermisch interessanter Gebiete;
- Erprobung von Stimulationsverfahren in Pilot- und Demonstrationsvorhaben bei unterschiedlichen Standortbedingungen. Dazu finanziert das BMU ein von der BGR und dem GGA durchgeführtes Projekt "GeneSys" (Generierte Geothermische Energie Systeme), bei dem unter Anwendung moderner Frac-Technik aus der HotDryRock-Forschung nachgewiesen werden soll, dass die Gewinnung geothermischer Energie aus tiefen Sedimentgesteinen auch an vielen Orten/Lokationen in Norddeutschland möglich ist.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich des dauerhaften Betriebs eines Geothermie-Projektes (z. B. Reservoirmanagement, d. h. optimale Nutzung einer Lagerstätte) und der Projektentwicklung (z. B. Standortwahl).

Angesichts der hohen Kosten der einzelnen Geothermieprojekte ist eine Konzentration auf ausgewählte Forschungsvorhaben mit umfassender wissenschaftlicher Begleitung unerlässlich. Diese Vorhaben müssen zum einen hydrothermale Verfahren abdecken und zum anderen Verfahren berücksichtigen, bei denen Wärmetauschersysteme künstlich geschaffen werden (Hot-Dry-Rock-Verfahren). Parallel zu den Mehrlochverfahren sind Methoden zur Erdwärmegewinnung aus gering permeablen Gesteinen mit Einbohrlochverfahren zu untersuchen. Hierdurch kann insbesondere eine weitgehende Standortunabhängigkeit für eine breite Nutzung ermöglicht werden.

In der aktuellen Lernphase ist eine ganzheitliche und lückenlose wissenschaftliche Betreuung von technologisch und geologisch anspruchsvollen Projekten zwingend erforderlich. Erst auf der Basis umfassend bewerteter Vorhaben in den verschiedenen geologischen Strukturen und mit unterschiedlichen geothermischen Technologien und Nutzungsmöglichkeiten können Modelle für Übertragungsmaßstäbe abgeleitet werden, die eine Entscheidungsfindung bei der kommerziellen Nutzung der Geothermie erleichtern.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt bei der Energieumwandlung. Die anlagetechnischen Systeme der geothermischen Stromerzeugung befinden sich noch weitgehend im Entwicklungs- und Optimierungsstadium. Bei der Kraftwerkstechnik gibt es anlagentechnische Optimierungs- (ORC-Prozess) und Weiterentwicklungspotenziale (Kalina-Prozess) die unter den realen Bedingungen in Deutschland abzuarbeiten sind. So dient auch das 2003 in Betrieb gegangene erste geothermische Kraftwerk mit einer elektrischen Leistung von max. 230 kW in Neustadt-Glewe vorrangig dazu, Betriebserfahrungen mit dieser Technologie zu gewinnen.

Im Rahmen der ökologischen Begleitforschung geht es vor allem um Untersuchungen der Beeinträchtigungen von Grundwassersystemen und eventuelle Rückwirkungen auf grundwasserabhängige Lebensräume sowie um umwelterhebliche Auswirkungen durch Veränderungen geologischer Gegebenheiten (z. B. auf das Bodengefüge) oder durch oberflächennahe Anlagen. Die Wirkung der geologisch begründeten natürlichen Radioaktivität der genutzten Medien ist zu untersuchen.

2.2.6 Wasserkraft und Nutzung der Meeresenergie

Die Wasserkraft ist für die Stromversorgung neben der Windenergienutzung die wichtigste regenerative Energiequelle in Deutschland. Im niederschlagsarmen Jahr 2003 betrug ihr Anteil am Stromverbrauch 3,5 % (bei Pumpspeicherkraftwerken nur Stromerzeugung aus natürlichem Zufluss) bzw. 20.350 GWh. Insbesondere im Grundlastbereich nimmt die Wasserkraftnutzung im Energiemix eine wichtige Rolle ein.

Die Technik der Wasserkraftanlagen ist weitgehend ausgereift. Technische Neuerungen bei Turbinen und der Generatorenanordnung verbessern insbesondere den Wirkungsgrad. Im Vordergrund der Forschungsaktivitäten steht allerdings die umwelt- und naturverträglichere Gestaltung von Wasserkraftanlagen.

In den letzen Jahren wurden dazu verschiedene technische Gestaltungsweisen von Wasserkraftanlagen untersucht und erprobt, z. B. sog. fischfreundliche Turbinen, über- und unterströmbare Wasserkraftwerke oder Staudruckmaschinen. Diese können z. T. ökologische Vorteile gegenüber herkömmlichen Wasserkrafttechniken aufweisen. Es gibt jedoch bisher in der Praxis noch keine neuen Techniken, die eine vollständige Durchgängigkeit des Gewässers gewährleisten.

Auch künftig bedarf es daher der Forschung zur ökologischen Optimierung von Wasserkraftanlagen. Dazu gehören neben den Auswirkungen auf Fische auch die Auswirkungen auf sensible Auenbereiche.

<u>Sonderformen der Wasserkraftnutzung - Energie aus dem Meer</u>

Im Gegensatz zur konventionellen Wasserkraftnutzung auf dem Festland befindet sich die Nutzung der Energie des Meereswassers weltweit noch im Anfangsstadium, obwohl das globale Potential, aus Gezeiten-, Strömungs- und Wellenkraftwerken Energie zu gewinnen, sehr hoch ist. Sowohl der Tidenhub (das periodische Fallen und Steigen des Wassers) als auch der Energiegehalt der Wellen können für die elektrische Energiegewinnung genutzt werden.

Die bestehenden Systeme zur Wellenenergienutzung befinden sich alle mehr oder weniger in der Entwicklungsphase, so dass noch nicht abzusehen ist, welche Technologien sich durchsetzen können. Dementsprechend groß ist hier noch der Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Ein neuer Ansatz besteht darin, Meeresströmungen, seien sie von den Gezeiten, von Wassertemperatur-

gefällen oder von unterschiedlichen Salzgehalten in den Meeren hervorgerufen, mit Hilfe von Strömungsgeneratoren, ähnlich wie bei einem Windrad, zur Stromerzeugung zu nutzen. Ein Vorteil dieser Energiequellen gegenüber der regenerativen Energienutzung aus Wind und Sonne besteht in der zeitlich recht konstanten Bereitstellung von Energie.

Die Zukunft solcher Anlagen liegt insbesondere in Regionen mit einem relativ konstanten, starken Strömungsmuster und Wellenklima. Als geeignete Standorte in Europa gelten die Küsten Großbritanniens, Irlands, Norwegens, Spaniens, Frankreichs und Portugals. Aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten, der geringen Wellenhöhe und des geringen Tidenhubs ist die Gewinnung von Energie aus Meeresströmung in der deutschen Nord- und Ostsee wirtschaftlich nicht vielversprechend.

International angelegte Forschungsvorhaben, die sich u. a. mit der Anpassung der Windkraft-Technologie an die spezifischen Verhältnisse im Meer auseinandersetzen, sollten verstärkt gefördert werden. Als gelungenes Beispiel für ein solches Forschungsvorhaben ist ein britisch-deutsches Projekt zu nennen, das die durch Gezeiten verursachten Meeresströmungen vor der Küste Cornwalls nutzt. Hier wird mit einer 300 kW-Anlage die Gezeitenströmung in 20 Metern Tiefe zur Stromerzeugung genutzt.

2.2.7 Ökologische Begleitforschung

Ziel der Bundesregierung ist es, den Ausbau der erneuerbaren Energien umwelt- und naturverträglich zu gestalten. Der Erhalt der biologischen Vielfalt, des Naturhaushaltes und des Landschaftsbildes sowie ein naturverträglicher Hochwasserschutz spielen daher im Rahmen der Ausbaustrategie der Bundesregierung für erneuerbare Energien eine wichtige Rolle. Damit wird auch eine breite Akzeptanz für den Ausbau der erneuerbaren Energien gewährleistet.

Vor diesem Hintergrund wurde die ökologische Begleitforschung im Rahmen der Forschung für erneuerbare Energien in den vergangenen Jahren verstärkt und wird auch künftig auf hohem Niveau fortgesetzt. Zur ökologischen Begleitforschung gehören die Erprobung und Entwicklung langfristig wirksamer Vorkehrungen und Standards, um einen naturverträglichen Ausbau der erneuerbaren Energien sicherzustellen, einschließlich geeigneter Ausgleichsmaßnamen sowie die ökologische Optimierung der Technologien.

Dabei werden folgende Schwerpunkte gesetzt:

- Naturschutzfachliche Abschätzung der Auswirkungen des Ausbaus und der Nutzung erneuerbarer Energien auf die biologische Vielfalt, auf den Naturhaushalt und das Landschaftsbild;
- Abschätzung der Wertschöpfungspotentiale erneuerbarer Energien für naturverträgliche Regionalentwicklung;
- Naturschutzfachlich und landschaftsästhetisch verträglicher Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung (inkl. Akzeptanzforschung);
- Untersuchung und Ermittlung möglicher Synergien zwischen Naturschutz/ Landschaftspflege und der energetischen Nutzung von Landschaftspflegeschnitt – Potenzialabschätzung und Nutzungsmöglichkeiten;
- Festlegung von naturschutzverträglichen Entnahmegrenzen von Reststoffen, insbesondere von Waldrestholz;
- Ökologische Begleitforschung zu Windenergie, Solarenergie, Geothermie und Wasser (siehe Unterkapitel 2.2.1 – 2.2.6).

2.2.8 Übergreifende Forschungsthemen für erneuerbare Energien

Neben den o. g. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den einzelnen Sparten der erneuerbaren Energien sind Querschnittsfragen zunehmend von Bedeutung. Dabei geht es um die ökologische Optimierung des Ausbaus der erneuerbaren Energien, um wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Untersuchungen und um die optimale Integration der erneuerbaren Energien in das Gesamtenergiesystem.

<u>Ökologisch optimierter Ausbau der erneuerbaren Energien:</u>

- Szenarien zur Erschließung der Potenziale der erneuerbaren Energien unter Beachtung der Anforderungen von Umwelt- und Naturschutz und zur Erreichung quantitativer Ziele des Ausbaus der erneuerbaren Energien, einschl. Fragen der Ökobilanzen und Stoffstromanalysen sowie der Umweltverträglichkeit,
- Aufbau eines Monitoring- und Zielerreichungssystems zum Ausbau der erneuerbaren Energien unter Gesichtspunkten des Umwelt- und Naturschutzes,
- Fragen der Technikbewertung, Technikentwicklung und der Technikfolgenabschätzung,

Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Untersuchungen:

- Kosten der erneuerbaren Energien im Vergleich zu anderen Techniken,
- Erarbeitung von Lernkurven hinsichtlich zeitlicher Entwicklung der Technik und der Degression der Kosten,
- Berücksichtigung externer Effekte, wie Umwelt- und Klimakosten,
- Auswirkungen der erneuerbaren Energien auf Produktions- und Dienstleistungsmärkte sowie auf die Beschäftigung,
- Methodologische Fragen von Daten und Statistiken im Bereich der erneuerbaren Energien,
- Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz von erneuerbaren Energien,
- Sozialwissenschaftliche Konzepte zur Erhöhung des Bewusstseins für erneuerbare Energien.

Integration der erneuerbaren Energien in das Gesamt-Energiesystem:

- Einordnung in die gesamte Energieversorgungsstruktur,
- Zusammenwirken des Ausbaus der erneuerbaren Energien mit stärkerer Energieeffizienz und Energieeinsparung,
- Integration der erneuerbaren Energien im Stromsektor: Angebots- und Nachfragemanagement, Vernetzung und Einsatz von Kommunikations- und Informationstechniken zur Regelung, Regelenergie, Reserveenergie, Energiespeicherung und Versorgungssicherheit des Stromsystems,
- Umstrukturierung des Kraftwerksparks im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien,
- Erneuerbare Energien und Wärmeversorgung,
- Dezentralisierung, Vernetzung und Harmonisierung in der Energieversorgung,
- Untersuchungen zum Einsatz von Kraftstoffen und Antrieben im Verkehr,
- Wechselwirkungen mit anderen Politikfeldern.

2.2.9 Haushaltsmittel

Für die Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der „erneuerbaren Energien“ sind für den Zeitraum 2005 - 2008 insgesamt Mittel in Höhe von 345,5 Mio. € vorgesehen. Diese Mittel sollen für anwendungsorientierte Einzelprojekte, Verbund- und Clustervorhaben sowie Demonstrationsvorhaben genutzt werden.

Tab. 2.5: BMU-Projektförderung „erneuerbare Energien“ (in Tsd. €)

Ist	**Soll[1)]**	**Plandaten[2)]**			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
67.798	60.083	80.394	83.366	88.366	93.366

[1)] inkl. Mittelverstärkung bis zu einer Höhe von 15,0 Mio. € durch Einsparungen bei Kapitel 1602 Titel 686 24 „Förderung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien“ (Marktanreizprogramm)
[2)] ab 2005: inkl. Mittelverstärkung bei Kapitel 1602 Titel 686 24 „Förderung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien“ (Marktanreizprogramm)

Literatur

[1] Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelegung des Rechtes der erneuerbaren Energien, 2004
[2] Bundesregierung (2002): Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung
[3] BMU (2004): Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung
[4] Nitsch, J.; et. al. (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, Studie des DLR, ifeu, WI im Auftrag des BMU
[5] Wissenschaftlicher Beirates der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2003): Welt im Wandel - Energiewende zur Nachhaltigkeit

2.3 Energieforschung BMVEL

2.3.1 Ausgangslage

Die Energieversorgung Deutschlands und der meisten anderen Industriestaaten basiert heute noch weitgehend auf fossilen Energieträgern. Insbesondere die Endlichkeit der fossilen Energieträger und ihre Wirkungen auf Umwelt und Klima machen die verstärkte Erschließung erneuerbarer Energien zur Sicherung der künftigen Energieversorgung notwendig. Bedingt durch steigende Preise für fossile Energieträger und die durch die Bundesregierung deutlich verbesserten Rahmenbedingungen hat die Nutzung regenerativer Energieträger in den vergangenen Jahren in Deutschland deutlich zugenommen. Ihr Anteil am Primärenergieverbrauch konnte von 1,3 % in 1990 auf 3,1 % im Jahre 2003 mehr als verdoppelt werden. Im Konzert der erneuerbaren Energien ist die Bioenergie derzeit die wichtigste Energiequelle. 62 % (einschl. Klärgas) der im Jahre 2003 erzeugten regenerativen Endenergie stammt aus Biomasse. Damit liegt die Biomasse deutlich vor der Wasserkraft (17,9 %) und der Windkraft (16,3 %). Energie aus Biomasse trug 2003 mit 1,9 % zur Deckung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland bei. Von der erzeugten Bioenergie entfielen 80,4 % auf die Wärme, 10,0 % auf den Strom und 9,5 % auf Kraftstoffe.

Unter den Biomasse-Energieträgern kommt Holz die weitaus größte Bedeutung zu. **Holz** trägt zu ca. 50 % zur regenerativen Energieversorgung in Deutschland bei. Die energetische Nutzung von Holz ist damit wichtiges Element einer nachhaltigen und ökonomisch sinnvollen Nutzung unserer Wälder. **Rapsmethylester** (Biodiesel) als bisher einziger in größerem Umfang auf dem Markt verfügbarer Biokraftstoff machte im Jahre 2003 5,9 % des Aufkommens der erneuerbaren Energien aus. Die Produktionskapazität wächst sehr schnell und hat inzwischen die 1 Mio. Tonnen-Marke in Deutschland überschritten. Die Anbaufläche von Raps für die Biodieselherstellung ist in den letzten Jahren rasch gestiegen. Im Jahre 2003 wurde allein auf 540.000 ha, das sind rund 4,6 % der Ackerfläche, Raps zur Biodiesel-Erzeugung angebaut. Stark steigende Bedeutung zeigt auch die **Biogaserzeugung**, die vor allem zur Stromerzeugung genutzt wird. Die Zahl der Anlagen hat sich seit 1999 von ca. 850 auf über 2.000 Anlagen mehr als verdoppelt. Der größte Teil der Anlagen wurde dabei in landwirtschaftlichen Betrieben errichtet.

Die Erzeugung von Bioenergie ist für viele Land- und Forstwirte inzwischen zu einem wichtigen **wirtschaftlichen Standbein** geworden. Darüber hinaus stärkt sie Wertschöpfung und Beschäftigung im ländlichen Raum. Im Bioenergiesektor insgesamt wurden in 2003 aus dem Anlagenbe-

trieb Umsatzerlöse von schätzungsweise 510 Mio. € bei der Stromerzeugung, ca. 490 Mio. € beim Biodiesel und mindestens 280 Mio. € bei der Erzeugung von Wärme erzielt. Im Bereich der Bioenergie wurden im Jahre 2003 1,6 Mrd. € investiert. Der Gesamtumsatz der Bioenergiebranche (Erlöse plus Investitionen) betrug 2003 rund 2,9 Mrd. €. Ca. 29.000 Arbeitsplätze sind hier entstanden.

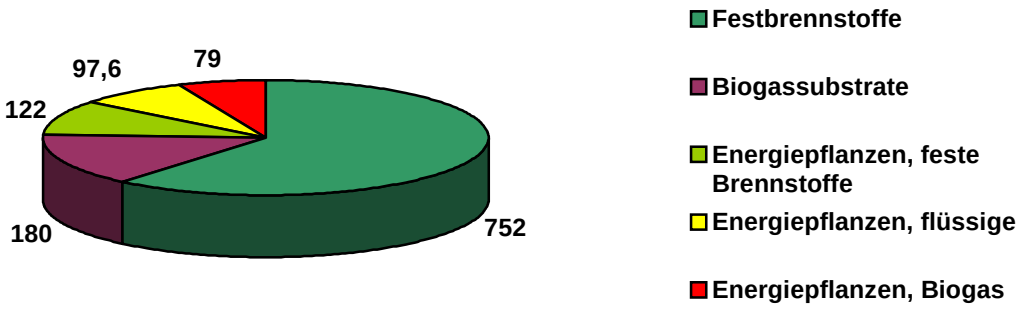
2.3.2 Potenziale der Bioenergie

Das technisch erschließbare einheimische Potenzial der energetischen Nutzung von Biomasse in Deutschland beträgt ca. 1.230 PJ/a. **Das sind rund 8,5 % des derzeitigen Primärenergieverbrauchs.** Dieses Potenzial resultiert aus folgenden Quellen:

- Die größten Potenziale liegen im Holzbereich. Die tatsächliche Holznutzung für stoffliche und energetische Zwecke beträgt nur etwa zwei Drittel des jährlichen Holzzuwachses. Nur die energetische Nutzung von Gebrauchtholz und Altholz ist heute bereits insbesondere aufgrund der Anreize des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) weitgehend ausgeschöpft. Waldrestholz wird dagegen bisher nur zu einem Bruchteil genutzt.
- Zusätzliche Potenziale, die bisher nicht ausgeschöpft werden, liegen im Anbau von schnellwachsenden Baumarten. Im Bereich der festen Biomasse könnten außerdem durch energetische Verwertung von Stroh, Ganzpflanzen und minderwertigem Getreide weitere Potenziale erschlossen werden.
- Diese Potenzialbetrachtung unterstellt zusätzlich den Anbau von Energiepflanzen auf 2 Mio. ha/Jahr, wobei jeweils 1/3 der vorgenannten Fläche zur Bereitstellung der festen, flüssigen und gasförmigen Biobrennstoffe genutzt werden.
- Das bedeutendste Substrat der **Biogaserzeugung** ist die Gülle. Biogas aus Gülle ermöglicht zugleich eine deutliche Verminderung von klimaschädlichen Emissionen und Geruchsemissionen. Ein zusätzliches Potenzial zur Biogaserzeugung kann durch die Verwertung von speziell angebauten Energiepflanzen genutzt werden. Durch die aktuelle Änderung des EEG wird dieser Weg zur Erzeugung von Biogas voraussichtlich deutlich zunehmen. Die derzeitige Potenzial-Ausschöpfung bei Biogas wird auf lediglich rund 4 % geschätzt.
- **Flüssige Brennstoffe** wie Pflanzenölmethylester werden über den gezielten Anbau von Energiepflanzen erzeugt. Der Anbau von 2 Mio. ha Energiepflanzen – das sind rund 17 % der Ackerfläche in Deutschland – ist möglich. Davon könnte ein großer Teil für die Treibstofferzeugung genutzt werden. Zum Vergleich: Im Jahr 2004 wurden in Deutschland auf mehr

als 700.000 ha Energiepflanzen zur Erzeugung flüssiger Treibstoffe angebaut. Das Potenzial der Biokraftstoffe erhöht sich erheblich, wenn auch biogene Reststoffe zur Herstellung von synthetischen Biokraftstoffen verwendet werden.

Abb. 2.11 Potenziale für die Bioenergie in Deutschland in PJ/a



Annahme: Der Anbau von Energiepflanzen erfolgt auf 2 Mio. ha/Jahr, wobei jeweils 1/3 der vorgenannten Fläche zur Bereitstellung der festen, flüssigen und gasförmigen Biobrennstoffe genutzt werden. Quelle: [1]

Die tatsächliche Nutzung von Bioenergie ist bisher im Wesentlichen auf Rest- oder Abfallstoffe beschränkt. Ausnahmen bildet die Verwertung bestimmter Holzsortimente und der Kraftstoffbereich. In dieser Entwicklung spiegeln sich die unterschiedlichen Kosten der Bioenergieträger wider. Neuere Untersuchungen [2] liefern Hinweise für deutlich höhere Potenziale, die unter geeigneten Rahmenbedingungen erreicht werden können.

2.3.3 Forschungsbedarf bei der Bioenergie

Damit die Bioenergie ihren möglichen Beitrag zur nachhaltigen Deckung des Energiebedarfs zukünftiger Generationen leisten kann, ist die Entwicklung von modernen Verfahren und Technologien zu deren Nutzung erforderlich. Die Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben im Bereich der Bioenergie ist seit 2003 Bestandteil des Programms "Nachwachsende Rohstoffe" des BMVEL [3]. Bioenergietechnologien können mithelfen, Deutschland als Wirtschafts- und Technologiestandort zu stärken und neue Exportmärkte zu erschließen. Gerade im Hinblick auf die Energieversorgung der wachsenden Weltbevölkerung ist es eine wichtige Aufgabe für die Industrieländer, geeignete Technologien auch für die Energieversorgung der Schwellen- und Entwicklungsländer zu erforschen.

Die Bioenergie spielt in vielen Ländern der Welt noch eine besondere Rolle. Sehr häufig ist die Bioenergie die einzige Energieform, die zur Verfügung steht. Die Technologien zur Bioenergienutzung sind dabei in der Regel nicht weit entwickelt, so dass ineffiziente Energienutzung und erhebliche Gesundheitsbeeinträchtigungen sowie Umweltbelastungen mit der Bioenergienutzung verbunden sind.

Insgesamt ist festzustellen, dass in Deutschland eine eigenständige wissenschaftliche Forschungstradition für Bioenergie geringer entwickelt ist als in anderen EU-Mitgliedstaaten wie Finnland, Schweden, Dänemark oder Österreich, bei denen die Bioenergie traditionell eine größere Rolle spielt. Die Struktur der Wirtschaft im Sektor Bioenergie in Deutschland ist gekennzeichnet durch überwiegend kleine und kleinste Unternehmen, die sehr häufig über die Entwicklung eines Bioenergieprodukts erst entstanden sind. Deren Forschungsmöglichkeiten sind begrenzt. Die deutschen Großunternehmen der traditionellen Energiewirtschaft haben sich bisher weniger um die Bioenergie bemüht. Um ihren Bedarf an modernen Erzeugnissen für die Bioenergiemärkte zu decken, werden die benötigten Produkte von Kleinunternehmen zugekauft. In jüngster Zeit ist aber eine zunehmende Forschungs- und Entwicklungstätigkeit im Bioenergiesektor auch bei großen Energietechnikunternehmen festzustellen.

Um vorhandene Lücken zu schließen und die Bioenergie für Wärme-, Strom- und Treibstoffzwecke energetisch effizient, kostengünstig und auf einem hohen Umweltschutzniveau nutzen zu können, ist insgesamt eine deutliche Intensivierung der Forschung erforderlich.

Unter Berücksichtigung energiewirtschaftlicher und agrarpolitischer Fragestellungen sieht die Bundesregierung insbesondere dort Forschungsbedarf, wo es um die Erschließung bisher weitgehend ungenutzter Bioenergiepotenziale und um neue effiziente, umweltfreundliche und kostengünstige Verfahren zur Bereitstellung und Nutzung von Bioenergieträgern geht. Schwerpunkte für die zukünftige Forschungstätigkeit werden beispielsweise in folgenden Bereichen gesehen:

- *Entwicklung neuer Kraft-, Wärme- (Kälte) Kopplungstechniken*
  Die Stromerzeugung mit Bioenergie erfolgt in der Regel in kleinen Anlagen, deren Wirkungsgrade im Vergleich mit Großanlagen noch bescheiden sind. Es bestehen Ansätze für innovative Technologien, die erhebliche Entwicklungspotenziale bieten.

- *Weiterentwicklung von Anbau- und Ernteverfahren für spezielle Energiepflanzen*
  Während die Pflanzenbautechnologien für die Nahrungsmittelerzeugung einen hohen Stand erreicht haben, fehlen für viele Energiepflanzen noch optimierte Technologien von der Saat über die Ernte bis zur Bereitstellung am Ort der Nutzung.
- *Demonstration erfolgreicher Bioenergieverfahren in der Praxis*
  Neu entwickelte Verfahren begegnen sehr oft Misstrauen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit. Daher besteht Bedarf der Förderung derartiger Demonstrationsanlagen.
- *Grundlegende Erforschung des Verbrennungs- und Vergasungsverhaltens von Biomasse*
  Während das Verbrennungsverhalten der fossilen Energieträger intensiv erforscht wurde, fehlen derartige Arbeiten für die Biomasse weitgehend. Um zu optimalen Technologien zu gelangen, ist eine vertiefte Kenntnis der besonderen Verbrennungs- und Vergasungseigenschaften von Biomasse notwendig.
- *Verringerung der Emissionen von Biomasseanlagen, insbesondere von Kleinanlagen*
  Bioenergieanlagen sind unter Umweltaspekten nur akzeptabel, wenn sie möglichst schadstoffarm arbeiten. Die deutliche Zunahme von kleinen Biomassefeuerungen in der Beheizung von Wohnungen erfordert noch weitere Verbesserung der Emissionen dieser Kleinanlagen.
- *Verbesserung der Vergasungstechnologie von Biomasse*
  Weltweit werden Versuche unternommen, die Vergasung von Biomasse zu einem zuverlässigen Verfahren zu entwickeln. Dies erscheint interessant, weil die Wirkungsgrade der Stromerzeugung aus Biomasse über die Technologie der Gasmotoren bzw. Gasturbinen deutlich effizienter sein kann als die traditionellen Verfahren. Außerdem wächst das Interesse zur Erzeugung von synthetischen Fahrzeugtreibstoffen über die Vergasung von Biomasse.
- *Wasserstofferzeugung aus Biomasse*
  Als langfristige Option einer schadstofffreien Energienutzung wird Wasserstoff gesehen. Biomasse bindet viel Wasserstoff, allerdings sind derzeit noch keine Verfahren entwickelt, diesen Wasserstoff bedarfsgerecht aus der Biomasse zu lösen. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf.
- *Weiterentwicklung synthetischer BtL-Treibstoffe*
  Derzeit arbeiten mehrere Gruppen an der Herstellung synthetischer Fahrzeugtreibstoffe durch die Vergasung von Biomasse und Herstellung von Fischer-Tropsch-Kraftstoffen bzw. Methanol. Die Verfahren haben bislang aber noch nicht die für die Praxiseinführung not-

wendige Reife erreicht. Angesichts der erheblichen Bedeutung der Mobilität für unser Gesellschaftssystem ist hier dringend Entwicklungsbedarf gegeben.

- *Mikrobiologische Grundlagenforschung beim Biogasprozess*
  Der derzeitige Stand der Biogasnutzung wurde überwiegend von den Erfahrungen aus dem Bau von Anlagen gewonnen. Vertiefte wissenschaftliche Kenntnisse über die mikrobiologischen Prozesse fehlen bisher. Um die Anlagen effizienter betreiben zu können, müssen diese Lücken geschlossen werden.
- *Weiterentwicklung der Biogastechnologie*
  Der derzeitige Stand der Biogastechnik ist empirisch gewachsen. An vielen Stellen deutet sich noch ein Optimierungspotenzial an, das durch Forschung und Entwicklung erschlossen werden muss.

2.3.4 Haushaltsmittel

Für die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet „Bioenergie“ sind für den Zeitraum 2005 – 2008 Mittel in Höhe von 40 Mio. € vorgesehen.

Tab. 2.6: BMVEL-Projektförderung „Bioenergie“ (in Tsd. €)

Ist	**Soll**	**Plandaten**			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
5.422	5.117	10.000	10.000	10.000	10.000

Literatur

[1] Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (2002): Biomasse als erneuerbarer Energieträger, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 3, Münster
[2] Nitsch, J.; et. al. (2004): Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland, Studie des DLR, ifeu, WI im Auftrag des BMU
[3] BMVEL (2003): "Nachwachsende Rohstoffe", Programm zur Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben

2.4 Energieforschung BMBF

Der Schwerpunkt des BMBF in der Energieforschung liegt bei der institutionellen Förderung. Das BMBF ergänzt damit in enger Abstimmung die Projektförderung des BMWA, BMU und BMVEL. Projektförderung und institutionelle Förderung bilden eine Symbiose, wobei die institutionelle Förderung sich vorwiegend auf langfristige Aspekte, wichtige wissenschaftliche Fragestellungen und auf komplexe Probleme konzentriert, die nur in einer größeren Forschungseinrichtung gelöst werden können und aufgrund relativ großer Marktferne besonderes staatliches Handeln notwendig machen.

Das Hauptgewicht der institutionellen Förderung des BMBF liegt mit mehr als 210 Mio. € in 2004 bei den Großforschungseinrichtungen, die sich zur Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) zusammengeschlossen haben. Zu einem geringeren Teil bearbeiten die Wissenschaftsorganisationen Max-Planck-Gesellschaft, Fraunhofer-Gesellschaft oder Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz energieforschungsrelevante Themen. Daneben fördert das BMBF im Rahmen seiner Projektförderung Netzwerke zum Thema „Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung“ (Vernetzungsfonds) und weitere Vorhaben in einer Reihe von Fachprogrammen, die jährlich zusammen mit mehr als 15 Mio. € zu Buche schlagen.

2.4.1 Institutionelle Förderung

Die Helmholtz-Zentren haben die Aufgabe, große und drängende Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft unter Einsatz wissenschaftlicher Infrastrukturen und Großgeräte sowie im Verbund mit Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen zu lösen. Die HGF verfügt über die Kapazitäten, um komplexe Probleme in der notwendigen fachlichen Breite und der nötigen Intensität der Bearbeitung anzugehen.

Die institutionelle Förderung im Rahmen der HGF folgt den Prinzipien einer programmorientierten Förderung. Dazu wurden insgesamt sechs Forschungsbereiche gebildet, darunter der Forschungsbereich „Energie“. Innerhalb des letzteren wirken sechs Forschungszentren zusammen: Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum Jülich (FZJ),

das Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), das GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ), das Hahn-Meitner Institut (HMI) und das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP).

Der Forschungsbereich „Energie“ der HGF stimmt sich in Verbünden und in Netzwerken durch Konzentration auf großforschungsspezifische Aspekte arbeitsteilig und kooperativ ab, insbesondere im ForschungsVerbund Sonnenenergie (FVS), im Kompetenzverbund Kerntechnik und damit verbundenen internationalen Kooperationen und Gremien sowie im Rahmen der europäischen Fusions-Assoziationen.

Im Forschungsbereich „Energie“ werden vier Programme verfolgt:

- Erneuerbare Energien
- Rationelle Energieumwandlung
- Nukleare Sicherheitsforschung
- Fusionsforschung

Systemanalytische Arbeiten zur Nutzung und Bereitstellung von Energie werden in den Zentren DLR, FZJ und FZK durchgeführt. Sie befassen sich mit Fragen wie dem Übergang von der gegenwärtigen zu einer primär durch erneuerbare Ressourcen bestimmten zukünftigen Energiewirtschaft oder mit der Rolle, die die Fusion langfristig spielen kann. Wirtschaftliche, soziale und ökologische Aspekte, d.h. die drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung, sowie institutionelle Randbedingungen werden dabei möglichst gleichwertig berücksichtigt.

Die in Programmen bearbeiteten Themen sind bestimmt durch ihren Disziplinen übergreifenden Charakter und ihre hohe Komplexität. Dies prädestiniert sie für eine interdisziplinäre und kontinuierliche Bearbeitung in großen Arbeitsgruppen, denen investitionsaufwändige Ausrüstung zur Verfügung steht wie Großgeräte, Testanlagen für Großkomponenten, hochleistungsfähige Analysesysteme und Rechnerkapazitäten.

In engem Verbund mit den HGF-Zentren leisten die Institute der anderen Wissenschafts- und Forschungsorganisationen MPG, FhG und WGL wichtige Beiträge.

Die strategische Ausrichtung des Forschungsbereichs „Energie“ orientiert sich an den forschungspolitischen Vorgaben der Zuwendungsgeber von Bund und Ländern vom November 2002 [1]. Sie tragen insbesondere auch der Tatsache Rechnung, dass die Forschungseinrichtun-

gen gemäß ihrem Gründungsauftrag in erster Linie großforschungsspezifische Themen bearbeiten sollen, die eine langfristige Perspektive haben und aufwändige experimentelle Anlagen erfordern. Sie sehen für die Programmlaufzeit 2004 bis 2008 einen jährlichen Aufwuchs der finanziellen Ausgaben von **1 %** vor, der ausschließlich auf die Programme „Erneuerbare Energien“ und „Rationelle Energieumwandlung“ konzentriert werden soll. Dies ermöglicht für beide Programme zusammen einen Aufwuchs während der fünfjährigen Programmlaufzeit um mehr als 15 % (zusätzlich rd. 10 Mio. €). Gleichzeitig haben die Zuwendungsgeber festgelegt, dass die Fusionsforschung ohne steigenden Ansatz durchzuführen ist. Die Programme sollen in angemessener Weise auf Systemanalysen, Markteinschätzungen und auf Überlegungen der praktischen Technologieverwertung gegründet sein.

Den Programmen des Forschungsbereichs liegt eine gemeinsame Strategie zugrunde. Sie ist ausgerichtet auf anspruchsvolle Herausforderungen der Stromerzeugung mit klaren „Zielprodukten“: Strom aus Dünnschicht-Photovoltaik-Zellen, Solarkraftwerken sowie mit Hilfe der Geothermie, hocheffiziente Kraftwerke mit sauberer Verbrennung, Brennstoffzellen, Fusionskraftwerke und Sicherheit bestehender Kernkraftwerke – inklusive deren Entsorgung sowie Endlagerung von radioaktiven Abfallstoffen.

Flankierend werden im Programm „Nachhaltige Entwicklung und Technologie“ des Forschungsbereichs „Erde und Umwelt“ ausgewählte Themen bearbeitet, die auch einen klaren Bezug zur Energieforschung haben. Dazu gehören z.B. die Vergasung trockener und nasser Biomasse, die energetische und stoffliche Nutzung von Abfällen sowie Kohlenstoffmanagement. Ferner integriert das Programm bei der systemanalytischen Forschung zur nachhaltigen Entwicklung viele Technologien, insbesondere auch die der künftigen Energieversorgung.

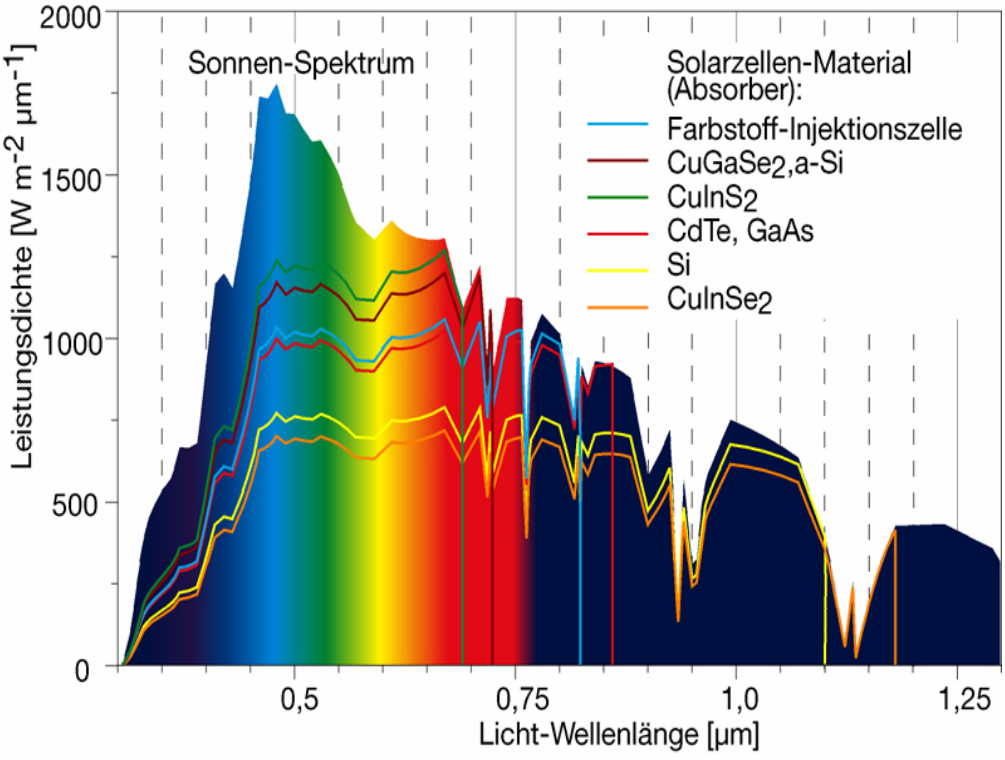
Die von den Forschungszentren erarbeiteten Entwürfe zu den vier Programmen wurden von internationalen Experten im Rahmen eines Evaluierungsverfahrens strategisch begutachtet. Die Ergebnisse dieser Evaluation wurden Ende 2003 vom Senat der Helmholtz-Gemeinschaft gebilligt und Förderempfehlungen für die Jahre 2004 bis 2008 ausgesprochen, die mit den im Weiteren dargestellten Programmen umgesetzt werden. Insgesamt zeigte sich, dass die Energieforschung der HGF-Zentren in weiten Bereichen internationale Spitzenleistungen erbringt, mit Blick auf die künftigen Herausforderungen gut aufgestellt ist und in Einklang steht mit politischen Prioritäten zugunsten von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien. Die beschlossenen Programme sind integraler Bestandteil des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung.

2.4.1.1 Erneuerbare Energien

Die im Programm *Erneuerbare Energien* zusammenwirkenden Helmholtz-Einrichtungen DLR, FZJ, GFZ und HMI widmen sich komplexen Themen, die mit großer Kontinuität bearbeitet werden müssen, ein interdisziplinäres Zusammenspiel vieler Wissenschaftler erfordern sowie investitionsintensiv sind. Neben der Materialentwicklung verlangen auch entsprechende Diagnostik und Modellierung ein hohes Maß an Interdisziplinarität sowie instrumentelle Vielfalt.

Das Programm ist eng abgestimmt mit den Förderkonzepten des BMU auf diesem Gebiet. Entsprechend der strategischen Ausrichtung des Forschungsbereichs „Energie“ konzentriert sich das Programm auf Technologien der Stromerzeugung mit Hilfe erneuerbarer Energien. Diese Schwerpunktsetzung berücksichtigt, dass einige Technologien weiter fortgeschritten sind, schon in der Breitenanwendung sind und die noch erforderliche Forschung und Entwicklung in anderen kompetenten Forschungseinrichtungen oder auch der Industrie durchgeführt werden kann. Die HGF forscht daher z.B. nicht auf den Gebieten der Wind- und Wasserenergien oder der photovoltaischen Wafertechnik.

Abb. 2.12: Energienutzung von Materialien im Sonnenspektrum



Forschungsschwerpunkte des Programms “Erneuerbare Energien” sind:

- Dünnschicht-Photovoltaik

  Die Photovoltaik ist eine Option, die langfristig in nennenswertem Umfang zu einer Energiewende in Richtung nachhaltiger Energieversorgung beitragen kann. Ihr breiter Einsatz kann aber nur erreicht werden, wenn kontinuierliche, langfristig angelegte, breite Vorsorgeforschung sowohl in den Grundlagen der Materialien und Prozesse als auch in den Anwendungen (Solarzellen, Module und Systeme) zu Systemen führt, die die notwendigen beträchtlichen Kostensenkungen bei guten Wirkungsgraden ermöglichen.
  Das **FZJ** und das **HMI** konzentrieren sich daher auf die Erforschung von **Dünnschichttechnologien für Solarzellen von morgen und übermorgen**. Von der Dünnschichttechnologie mit Zelldicken von wenigen Mikrometern verspricht man sich wegen des geringeren Materialverbrauchs, einfacherer Prozesstechnik und höherer Produktivität langfristig erhebliche Kostenvorteile.

  Aus der Ausrichtung der Forschung des HMI und FZJ auf das Gebiet der Dünnschicht-Photovoltaik leitet sich eine Reihe von Forschungsansätzen ab, die von der Grundlagenforschung bis zur industriellen Umsetzung reichen:

  - Dünnschichtsolarzellen aus kristallinem Silizium auf Fremdsubstraten,
  - Dünnschichtsolarzellen auf der Basis organischer Halbleitermaterialien sowie
  - neuartige Zellenkonzepte mit dem Potenzial zu höheren Wirkungsgraden, z.B. billige polykristalline Multispektralzellen (Tandemzellen).
  - Langfristig scheint auch die Einbeziehung komplexerer Strukturen denkbar unter Nutzung von Wissen der Nanotechnologien und Biowissenschaften.

  Hochabsorbierende Verbindungshalbleiter und hier insbesondere die Familie der Chalkopyrite [$Cu(In,Ga)(S,Se)_2$] sind als Materialien für Dünnschichtsolarzellen besonders Erfolg versprechend und bilden deshalb einen Schwerpunkt der Arbeiten am HMI. Ein langfristiges Ziel der Arbeiten ist deshalb die Realisierung einer kostengünstigen Multispektralzelle als Dünnschichtzelle mit einem hohen Wirkungsgrad. Eine weitere Langfristoption ist die Entwicklung einer effizienten polykristallinen Multispektralzelle auf einem kostengünstigen Substrat auf der Basis der III-V Halbleiter. Die F&E Arbeiten des HMI werden durch grundlegende Arbeiten zur Klärung der Rolle von Grenzflächen in Solarzel-

lenstrukturen sowie der Analytik von Zellen und Modulen unterstützt. Hier bietet die enge Verbindung der Solarenergieforschung mit der Strukturforschung des HMI am Ionenstrahllabor ISL und am Forschungsreaktor BER II, jedoch insbesondere bei der Grenz- und Oberflächenanalyse an der Synchrotronstrahlungsquelle BESSY II eine einzigartige Komponente, welche auch internationalen Kooperationspartnern als besondere Dienstleistung angeboten werden kann.

Bei der **Si-Dünnschichttechnologie** liegt der Schwerpunkt der Arbeiten auf Material- und Zellentechnologien mit niedrigen Prozesstemperaturen, die den Einsatz von Glas oder anderen billigen Materialien als Substrat erlauben. Das FZJ konzentriert sich auf die Weiterentwicklung der auf amorphem und mikrokristallinem Silizium basierenden Technologien mit Abscheidetemperaturen unter 250 ^{o}C. Langfristiges Ziel sind Stapelzellen (Multispektralzellen) mit Modulwirkungsgraden von mehr als 12 %; dabei wird ein spektral selektives Photonenmanagement angestrebt. Zugleich ist die Technologie zu entwickeln, die ein kostengünstiges Abscheiden bei Temperaturen ≤ 250 °C auf großen Flächen und billigen, flexiblen Substraten gestattet. Dabei kommen industrienahe, kostengünstige Verfahren zum Einsatz, die bezüglich Skalierbarkeit, Durchsatz und Ausbeute weiterentwickelt und optimiert werden. Das HMI verfolgt ein eigenständiges Konzept für Si-Dünnschichtsolarzellen. Dabei liegt der Schwerpunkt der F&E-Arbeiten auf der Entwicklung einer Dünnschichtzelle aus grobkörnigem polykristallinem Si (Korngrößen > 10 µm) auf Fremdsubstraten wie Glas, für deren Realisierung höhere Prozesstemperaturen bis 600 °C und alternative Depositionsverfahren sowie Zellenstrukturen notwendig sind. Die Zusammenarbeit der beiden Arbeitsgruppen bei institutsübergreifenden Themen erfolgt vor allem im Bereich der begleitenden Materialforschung. Verwertungsgeeignete Ergebnisse werden der industriellen Umsetzung bei Partnerfirmen zugeführt, die teilweise bereits während des Forschungs- und Entwicklungsprozesses mitarbeiten.

- Konzentrierende solarthermische Systeme:
  Seit Mitte der achtziger Jahre werden konzentrierende Solarsysteme zur kommerziellen Stromerzeugung in Kalifornien erfolgreich eingesetzt und stellen derzeit die einzige Option dar, solaren Strom großtechnisch zu erzeugen. Nunmehr eröffnet auch die Förderpolitik in Spanien sowie der Weltbank den Weg zu neuen Kraftwerksprojekten, die auf Grund des zwischenzeitlich erzielten technologischen Fortschritts kostengünstiger errichtet werden können. Weitere Kostensenkungen sowie technologisch sehr viel anspruchsvollere Varian-

ten solarthermischer Stromerzeugung machen Forschung und Entwicklung und die Nutzung großtechnischer Testanlagen weiterhin notwendig.

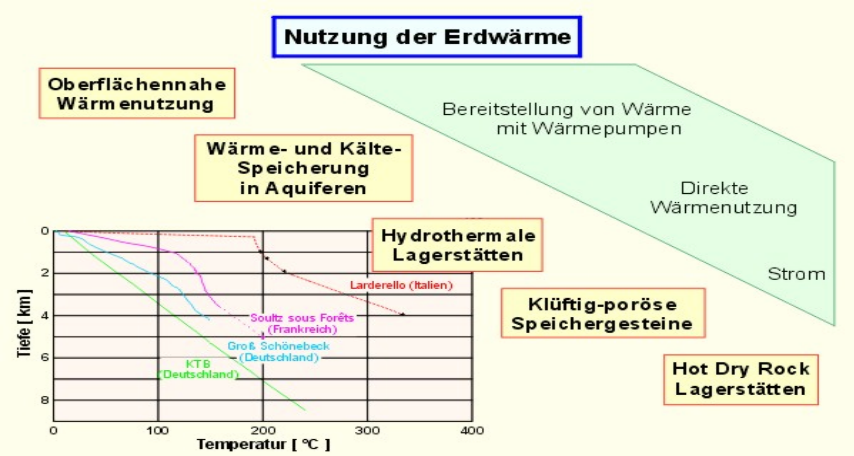
Die Schwerpunkte des Forschungsprogramms des **DLR** liegen bei der Entwicklung und Kostensenkung geeigneter Komponenten und Systeme sowie der Erschließung neuer Anwendungsfelder solarthermischer Technologien in den Bereichen Kraftwerkstechnik und Prozesswärmeanwendungen. Beispiele sind die direkte Dampferzeugung in Solarrinnenfeldern, die Integration von Solardampf in konventionelle Gas- und Dampf-Kraftwerke oder von Hochtemperatur-Solarwärme in Gasturbinen. In langfristiger Perspektive werden Optionen der indirekten Speicherung von Solarenergie in Form von Brennstoffen (z.B. als Wasserstoff) untersucht. Hierbei wird ein besonderer Fokus auf thermochemische Prozesse gerichtet.

Mit systemtechnischen und systemanalytischen Arbeiten wird auch die Planung und Errichtung jener nächsten Solarkraftwerke unterstützt, die unter starker deutscher Industriebeteiligung realisiert werden. Die Arbeiten sind europäisch und global vernetzt und nutzen insbesondere die Plataforma Solar de Almería in Südspanien in Partnerschaft mit CIEMAT, der spanischen Energie- und Umweltforschungseinrichtung.

- Geothermische Technologie

  Das geothermische Programm des **GFZ** umfasst Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Gewinnung von Strom und Wärme aus geothermischer Energie und der Nutzung des Untergrundes als Energiespeicher (Wärme, Kälte). Es beinhaltet Untersuchungen zur Auffindung geeigneter geologischer Strukturen und Horizonte für die Energiegewinnung sowie die Entwicklung von Verfahren zur Stimulierung derartiger Horizonte zur Erhöhung der Produktivität. Es werden Maßnahmen für die langfristige und kostengünstige Förderung der Energie sowie verfahrens- und anlagentechnische Entwicklungsarbeiten zur effektiven obertägigen Nutzung der Energie und operationellen Überwachung des Gesamtsystems erforscht.

Abb. 2.13: Nutzung von Erdwärme



Der Schwerpunkt der Arbeiten des GFZ liegt in der Entwicklung neuer Methoden zur Untersuchung und zum Monitoring der untertägigen und obertägigen Prozesse während der Nutzung. Operative Arbeiten in Begleitung von neuen Erschließungstechnologien bilden ein wesentliches Bindeglied zwischen den wissenschaftlichen Untersuchungen und der technischen Umsetzung. Es müssen z.B. innovative Bohrtechnologien und -strategien mit dem Ziel der Kostenreduktion bei Tiefbohrungen entwickelt werden. Auf der Konversions- und Nutzungsseite sind ferner Forschungsarbeiten zum Thema Strom- und Kälteerzeugung aus Niedertemperaturwärme oder auch zum Thema Abnehmerstrukturen mit speziell für die Nutzung der Geothermie entwickelten Heiznetztechnologien vorgesehen. Im Rahmen fachübergreifender Forschungsprojekte werden neben technischen Fragestellungen auch Wirtschaftlichkeit und technische Realisierbarkeit geothermischer Energiegewinnung behandelt. Auch diese Arbeiten sind über zahlreiche Projekte mit Partnern im In- und Ausland vernetzt.

Auf nationaler Ebene sind die Forschungsprogramme der Helmholtz-Zentren DLR, FZJ, GFZ und HMI seit 12 Jahren thematisch mit den Partnerinstituten innerhalb des FVS abgestimmt und vernetzt. Neben den genannten HGF-Zentren gehören zu diesem Verbund: das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg, das Institut für Solarenergieforschung (ISFH) in Hameln/Emmerthal, das Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) in Kassel/Hanau, das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg (ZSW) in Stuttgart/Ulm. Im FVS stimmen die beteiligten Einrichtungen ihre FuE-Schwerpunkte ab und vertreten sie gemeinsam in der fachlichen und politischen Öffentlichkeit. Der FVS ist heute wichtiger Ansprechpartner einerseits der Industrie und andererseits der Forschungs- und Technologiepolitik. Er stellt im europäischen Vergleich die größte koordinierte Forschungs- und

Entwicklungskapazität für die Erschließung erneuerbarer Energien dar. Er dient darüber hinaus als Plattform für zahlreiche Netzwerkaktivitäten, insbesondere für die neue Förderinitiative des BMBF „Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung“.

Für das Programm „Erneuerbare Energien“ sind für den Zeitraum 2005 bis 2008 institutionelle Fördermittel in Höhe von 115 Mio. € vorgesehen.

Tab. 2.7: BMBF-Institutionelle Förderung „Erneuerbare Energien“ (in Tsd. €)

Ist	**Soll**	**Plandaten**			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
24.396	26.442	28.267	28.307	28.613	30.271

Die Ansätze können sich abhängig von den jährlich zu treffenden Investitionsentscheidungen des HGF-Senats verändern.

2.4.1.2 Rationelle Energieumwandlung

Die im Programm „Rationelle Energieumwandlung“ zusammenwirkenden Helmholtz-Einrichtungen DLR, FZJ und FZK konzentrieren ihre Forschungsaktivitäten auf wesentliche Beiträge zur Kraftwerkstechnik, der Brennstoffzellen-Entwicklung sowie der Supraleitung. Die Strategie ist grundsätzlich komplementär angelegt zu den vom BMWA verfolgten Schwerpunkten im Rahmen der Projektförderung und zielt auf Synergien mit den anderen fachlich-wissenschaftlichen Arbeitsgebieten und Kompetenzen der Zentren. Sie ist offen für Kooperation und Arbeitsteilung mit anderen wissenschaftlichen Einrichtungen.

Übergreifendes Ziel dieses Forschungsprogramms ist es, neue Ansätze zu entwickeln für die Verbesserung der Wirkungsgrade bei der Bereitstellung elektrischer Energie und für die nachhaltige Minderung toxischer Emissionen. Die Helmholtz-Zentren decken dabei die gesamte Prozesskette von der Verbrennung fossiler Brennstoffe bis zur Stromversorgung ab.

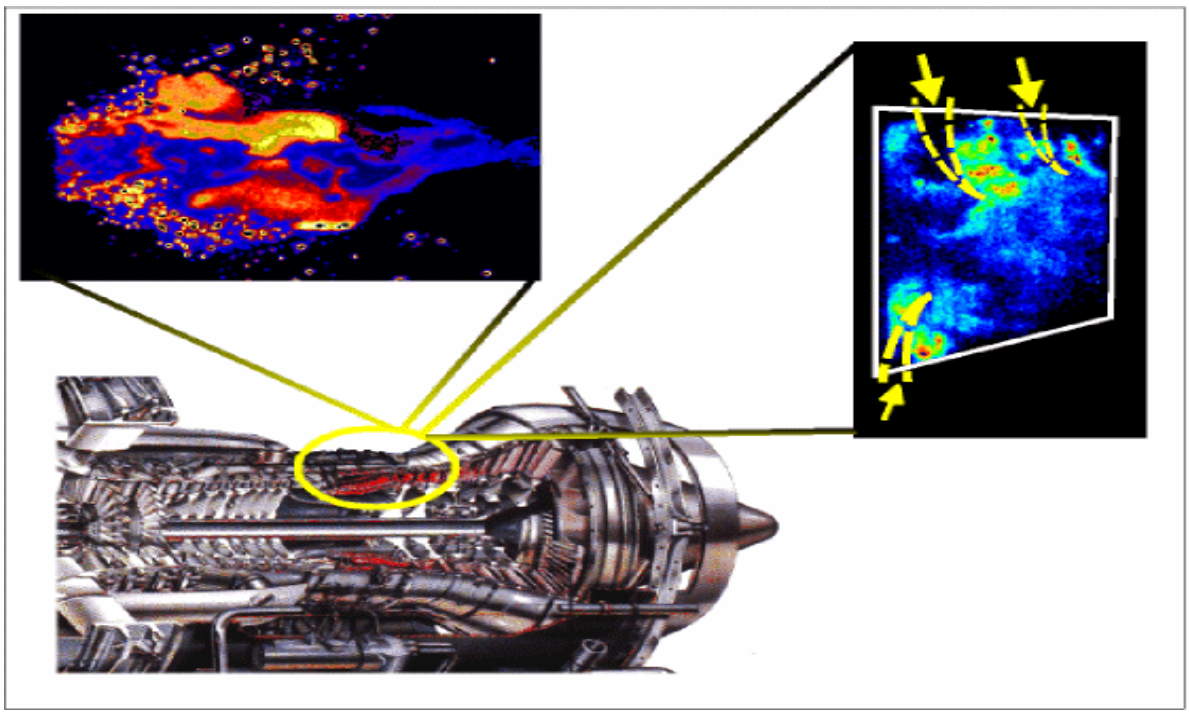
Forschungsschwerpunkte des Programms “Rationelle Energieumwandlung ” sind:

- Kraftwerkstechnik

  Ein Ziel der mittel- bis langfristig angelegten Arbeiten sind verbesserte Wirkungsgrade durch höhere Verbrennungstemperaturen bei verminderter Schadstoffemission und mit verbesserter Zuverlässigkeit der Systeme. Das gelingt nur, wenn Verbrennungsprozesse computer-gestützt optimiert werden, etwa durch intelligente Verbrennungsführung oder eine optimale Gestaltung des Brennraumes. Dabei gilt es, z.B. die Schadstoffbildung gezielt zu minimieren und die Flammenstabilität zuverlässig im gesamten Lastbereich zu sichern, auch nahe der mageren Verlöschgrenze. Vision ist der präzise Entwurf schadstofffreier Kraftwerke und deren wirtschaftliche Realisierung.

  Die Entwicklung eines solchen Entwurfswerkzeuges erfordert die Berücksichtigung mehrerer komplexer Einzelvorgänge, die sich gegenseitig beeinflussen: So ist ein in der Regel turbulentes Strömungsfeld zu koppeln mit der Verbrennungschemie sowie den Transportvorgängen von Verbrennungsprodukten und Wärme. Auch die modernsten Hochleistungsrechner können hierfür keine direkte, vollständige numerische Simulation liefern; es ist daher eine wesentliche Teilaufgabe, die vielen Reaktionen in einer Flamme durch Modellierung auf einen überschaubaren und rechenbaren „Mechanismus“ zu reduzieren.

Abb. 2.14: Lasermesstechniken an Triebwerken (DLR)



Neben den Experimenten und Modellierungsarbeiten zum Aufbau des Entwurfswerkzeugs sind Validierungsexperimente erforderlich. Dabei werden insbesondere Laserdiagnostik-

Verfahren eingesetzt, die es mit hoher Orts- und Zeitauflösung und ohne Störung der Flamme selbst erlauben, Annahmen und Simulationsergebnisse an realen Brennkammern zu überprüfen.

Vorrangige Themen sind von daher:

- *Schadstoffarme Verbrennung.* Hier geht es um bessere, rechenbare Modelle für die Bildung ausgewählter Schadstoffe (NO_x, Ruß, Aerosole). Vision ist das nahezu „Schadstofffreie Kraftwerk".
- *Instationäre Verbrennung und Zuverlässigkeit.* Hier geht es um die Stabilitätsprobleme von Gasturbinenbrennkammern, die nahe der mageren Verlöschgrenze gefahren werden, um NO_x-Emissionen zu mindern. Es geht aber auch um die Betriebssicherheit dezentraler Kraftwerksanlagen.
- *Nutzung alternativer Brennstoffe.* Ziel ist hier die möglichst saubere Verbrennung von Synthesegas aus Biomasse oder Kohle sowie die Mitverbrennung von Abfällen. Dabei geht es vor allem um das noch wenig bekannte Verbrennungsverhalten unter realen Bedingungen. Zusätzlich sollen ökoeffiziente Kombinationsverfahren der Abfallverbrennung und Kraftwerksfeuerung entwickelt werden.

Auch die Turbomaschinenströmung kann durch weitere Forschung und Entwicklung verbessert werden, im wesentlichen durch Einsatz effizienter Prozessführung und Optimierung der Gasturbinenkomponenten, Verdichter und Turbinen. Die Arbeiten sind eng mit denen des Luftfahrt-Programms verbunden und umfassen die Beschaufelungen, die Kühlung sowie die Strömung in der Gasturbine. Sie sind kohärent mit den Förderschwerpunkten des BMWA auf diesem Feld und konzentrieren sich auf großforschungsspezifische Aspekte.

Werkstoffe spielen bei der Anhebung von Temperaturen und Wirkungsgraden eine zentrale Rolle, um hohe Temperaturen und korrosive Medien zu beherrschen. Deshalb sind keramische Wärmedämmschichten und metallische Korrosionsschutzschichten für Brennkammerauskleidungen und thermomechanisch hochbelastete Schaufeln mit reproduzierbaren physikalisch-mechanischen Eigenschaften herzustellen, zu bewerten und in heute eingesetzte Werkstoffsysteme zu integrieren.

Folgende Themengebiete sind in Abstimmung mit den Fördervorhaben des BMWA geplant:

- *Entwicklung neuer höherfester, einkristallin erstarrter Nickelbasislegierungen* der 3. Generation sowie metallischer Hochtemperaturkorrosionsschutzschichten für Tempera-

turen von > 1100 °C bei hoher Standzeit, sowie neuer keramischer Wärmedämmschichten mit einer Gefügestabilität für Einsatztemperaturen > 1400 °C.

- *Größere Komponentenabmessungen.* Im Hinblick auf die höheren mechanischen Belastungen sollen große Komponenten homogener Zusammensetzung und mit geringen Defekten in Zusammenarbeit mit den Halbzeugherstellern und Anlagenbauern gefertigt und deren Langzeitgebrauchseigenschaften (Kriechen, Ermüdung, Korrosion) für die Auslegung ermittelt werden.
- *Dampfkraftwerke mit Wirkungsgraden von deutlich über 50 %*. Diese benötigen entsprechend hochwarm- und korrosionsfeste Werkstoffsysteme, die neben der Verbrennung von Kohle auch andere Feststoffe und Biomassen erlauben.

Für Wärmeübertragung und Kühltechnologien sollen neue Oberflächentechnologien entwickelt werden, speziell für die Nutzung biogener Brennstoffe, auch Wärmeaustauscher mit inhärent geringer Verschmutzungsneigung der Heizflächen. Entwicklungsthema sind auch Regeneratoren und Wärmespeicher für diskontinuierlich anfallende Energieströme.

- Brennstoffzellen

  Forschung und Entwicklung zur Brennstoffzelle ist eine interdisziplinäre Aufgabe, die in ihrer Gesamtheit nur mit vielfältiger Expertise (Materialwissenschaft, Elektrochemie, Festkörperphysik, Physikalische Chemie, Oberflächentechnik, Verfahrenstechnik, Regelungstechnik, Fertigungstechnik etc.) und einer entsprechend gut ausgebildeten Infrastruktur bewältigt werden kann. Sie ist langfristig angelegt und erfordert eine hohe Kontinuität der Forschungsanstrengungen, um letztlich zu technisch zuverlässigen und wirtschaftlich einsetzbaren Systemen zu gelangen. Die von den Helmholtz-Zentren FZJ und DLR - in enger Zusammenarbeit mit Hochschul- und anderen Forschungsinstituten - aufgegriffenen Arbeiten umfassen die Entwicklung von Materialien, Werkstoffsystemen, Einzelkomponenten sowie den Aufbau kompletter Brennstoffzellenstapel (Stacks) und Anwendungssysteme. Wichtige Aufgabenbereiche sind auch geeignete Fertigungstechniken sowie die Bereitstellung brennstoffzellengeeigneter Gase aus anderen Energieträgern. Die Helmholtz-Zentren bearbeiten sowohl die Hochtemperatur-Brennstoffzelle mit Oxidkeramik (SOFC) wie auch die Niedertemperatur-Brennstoffzelle (PEMFC, DMFC) mit Polymermembranelektrolyt.

Abb. 2.15: Weltrekord im FZJ: Der neue Brennstoffzellenstapel besteht aus 60 planaren Einzelzellen und liefert eine Leistung von 13,3 Kilowatt

Schwerpunkte der Forschung und Entwicklung im Helmholtz-Bereich sind :

- *Materialien und Werkstoffe:* Weiterentwicklung elektronisch und ionisch leitender Werkstoffe einschließlich serienfertigungstauglicher Herstell-, Prüf- und Qualifikationsverfahren mit reproduzierbaren Eigenschaften für metallische und keramische Komponenten, Entwicklung neuartiger Untersuchungsmethoden zur Ermittlung der elektrischen, mechanischen sowie gefüge- und designbedingten Langzeiteigenschaften von Brennstoffzellen-Komponenten und Stacks, Entwicklung gasdichter, thermisch zyklierbarer langzeitstabiler Fügeverbindungen für Hochtemperaturbrennstoffzellen, Aufklärung und Beseitigung der Degradationsmechanismen, einschließlich werkstoffbasierter Lebensdauermodelle, die Entwicklung kostengünstiger und effektiver Katalysatoren, die Herstellung von Zellen mit verbesserten Elektrolyten (nicht-fluorierte Membranen für die PEMFC und DMFC).
- *Zellkomponenten und Stacks.* Hier geht es um die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle DMFC und die SOFC (Wegfall des Brennstoff-Reformers in beiden Fällen) und die Entwicklung kostengünstiger Fertigungsverfahren und Werkstoffe für Zellen und darauf aufbauende Stacks beider Brennstoffzellentypen. Um Wirkungsgradverluste zu reduzieren, werden Diagnose- und Charakterisierungsverfahren zur Visualisierung von Vorgängen innerhalb des Stacks eingesetzt.
- *Modellierung und Simulation.* Die heutige Modellierung liefert Beiträge zur Erforschung physikalisch-chemischer Grundlagen auf der Basis moderner Soft- und Hardware. Durch

die rechnerische Bewertung von Strömungs-, Temperatur- und Spannungsprofilen wird das Zell- und Stackdesign verbessert. Simulationen ermöglichen außerdem die Identifizierung von kritischen Betriebszuständen im Vorfeld von Testläufen. Schließlich können durch die Modellierung Brennstoffzellenanlagen zuverlässiger bewertet und optimiert werden. Hoher Forschungsbedarf besteht bei der dynamischen Simulation, die Aussagen zur Praxistauglichkeit dieser Anlagen zulässt.

- *Systeme und Infrastruktur*. Die Helmholtz-Zentren analysieren und entwickeln nicht nur Prototyp-Systeme (auch für portable oder stationäre Kompaktgeräte) inklusive anwendungsnaher Herstellungs- und Fertigungsverfahren für die Wirtschaft, sondern helfen ergänzend zu Förderaktivitäten des BMWA insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen als typischen Zulieferern der Zukunft, sich durch Know-how-Tranfer frühzeitig auf die neuen Anforderungen der Brennstoffzellentechnik einzustellen.
- *Wasserstoff.* Die beteiligten Helmholtz-Zentren haben in der Vergangenheit in größerem Umfang Wasserstoffsysteme (solare und nukleare Erzeugung, Elektrolyseure etc.) entwickelt und erprobt. Auf dieser Basis beteiligen sie sich auch an der 2002/2003 neu entstandenen Wasserstoff-Programmatik der EU und der USA und entsprechenden Projekten; beteiligt ist auch das Forschungszentrum Karlsruhe mit Arbeiten zur Wasserstofferzeugung aus Biomasse und Wasserstoffsicherheitsaspekten.

- Supraleitung in der Energietechnik

  Das Forschungszentrum Karlsruhe widmet sich auf der Basis langjähriger Erfahrung mit dem Bau supraleitender Magnete auch der Supraleitungsanwendung in der Energietechnik. Es geht dabei um höhere Effizienz bei Energieübertragungskabeln, Transformatoren und Motoren sowie z.T. deutlich geringere Gewichte und Abmessungen der Komponenten. Darüber hinaus werden neuartige Betriebsmittel wie supraleitende Energiespeicher und Strombegrenzer entwickelt, die auf eine drastisch gesteigerte Funktionalität des Netzbetriebes abzielen.

  Eine wesentliche Voraussetzung für die energietechnische Anwendung von Hochtemperatursupraleitern (HTSL) ist die kostengünstige Verfügbarkeit von technisch ausgereiften Leitern. Derzeit werden drei Materialklassen als aussichtsreich verfolgt, nämlich Kuprate auf Bi-, bzw. auf Y-Basis und das ganz neue, eher den klassischen Supraleitern ähnliche MgB_2. Bei allen Betriebsmitteln steht zunächst die Phase der Entwicklung und des Betriebes von Funktionsmodellen mit relevanten Daten für einen echten Netzbetrieb sowie deren Erprobung im Labor und in geeigneten Prüffeldern der Energieversorgungsunternehmen an. Eine

baldige Anwendung wird von Kurzschluss-Strombegrenzern und danach von Transformatoren und Kabeln erwartet. Eine weitere wichtige Rolle kommt Höchstfeldspulen zu, die außer für magnetische Energiespeicher höchster Leistungsdichte für das bedeutende Spin-off-Gebiet der NMR-Spektrometermagnete genutzt werden. Supraleitende Systeme benötigen optimierte kryotechnische Einrichtungen, ebenso Werkstoffe, die hinsichtlich ihrer mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften untersucht werden müssen. Dafür besitzt das FZK die erforderlichen Erfahrungen und die z.T. europaweit einzigen Testeinrichtungen für Betriebstemperaturen bis herab zu 4 K.

Für das Programm „Rationelle Energieumwandlung“ sind für den Zeitraum 2005 bis 2008 institutionelle Fördermittel in Höhe von 171 Mio. € vorgesehen.

Tab. 2.8: BMBF-Institutionelle Förderung „Rationelle Energieumwandlung“ (in Tsd. €)

Ist	**Soll**	**Plandaten**			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
36.621	39.607	42.155	42.012	42.134	44.270

Die Ansätze können sich abhängig von den jährlich zu treffenden Investitionsentscheidungen des HGF-Senats verändern.

2.4.1.3 Nukleare Sicherheitsforschung

Die institutionell geförderte nukleare Sicherheitsforschung dient der Untersuchung der wissenschaftlichen und technologischen Aspekte der Sicherheit der bestehenden Kernreaktoren, der Sicherheit der nuklearen Entsorgung und Endlagerung hochradioaktiver Stoffe. Dabei stehen langfristige Aspekte im Vordergrund der Forschungsarbeiten und solche, bei denen aufwändige Experimentiereinrichtungen und/oder Infrastrukturen notwendig sind. Die durchzuführenden Arbeiten stehen im Einklang mit dem Beschluss zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung, da es bis zum Abschalten des letzten Kernkraftwerkes zwingend notwendig ist, die Sicherheit dieser Kernreaktoren auf dem jeweils neuesten Stand von Wissenschaft und Technik zu gewährleisten. Um Industrie, Kraftwerksbetreiber und Genehmigungsbehörden in die Lage zu versetzen, diese Aufgabe erfüllen zu können, muss eine kerntechnische Kompetenz auf höchstem

wissenschaftlichen und technischen Niveau erhalten werden. Dazu ist einerseits die Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern notwendig, andererseits auch die Weiterbildung von Personal im Kraftwerksbereich und bei den Genehmigungsbehörden. Zu beiden Aspekten tragen die außeruniversitären Einrichtungen gemeinsam und in enger Kooperation mit Universitäten und Hochschulen bei.

Zur Bündelung der vorhandenen Kompetenz wurde im März 2000 der Kompetenzverbund Kerntechnik gegründet, in dem neben den beiden Helmholtz-Zentren - Forschungszentrum Jülich (FZJ) und Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) - das Forschungszentrum Rossendorf (FZR), die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS), die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BRG) sowie die Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (MPA) mitarbeiten. Assoziiert sind die jeweils benachbarten Universitäten (RWTH Aachen und FH Aachen/Jülich; die Universitäten Karlsruhe, Stuttgart und Heidelberg; TU Dresden und FH Zittau/Görlitz; TU München). Das Ziel des Kompetenzverbunds Kerntechnik ist die weitere Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen den Forschungseinrichtungen und den benachbarten Hochschulen und die Abstimmung und Bündelung der mit öffentlichen Mitteln geförderten nuklearen Sicherheits- und Endlagerforschung. Damit werden auch die Themen der Projektförderung und der institutionellen Förderung eng miteinander abgestimmt und aufeinander bezogen (s. auch Kap. 2.1.2.). Der Kompetenzverbund Kerntechnik trägt seit seiner Gründung wesentlich zur Förderung von qualifiziertem wissenschaftlichen Nachwuchs bei. So ist es über den Kompetenzverbund auch gelungen, eine industrielle Mitfinanzierung von Doktorandenstellen zu erreichen.

Im Rahmen des Programms Nukleare Sicherheitsforschung der Helmholtz-Gemeinschaft werden die Programmthemen Sicherheitsforschung für Kernreaktoren und Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung durch die Forschungszentren Jülich und Karlsruhe bearbeitet. Das Forschungszentrum Rossendorf, das zur Leibniz-Gemeinschaft gehört, führt Forschungsarbeiten zur Radioökologie, insbesondere bezogen auf die Altlasten aus dem Uranerzbergbau, zur Simulation von Störfallabläufen in kerntechnischen Anlagen und zur Integritätsbewertung von Reaktorkomponenten durch.

Forschungsschwerpunkte des Programms „Nukleare Sicherheitsforschung“ sind:

- Sicherheitsforschung für bestehende Kernreaktoren
  Im Rahmen dieses Programmthemas werden sowohl experimentelle als auch theoretische Untersuchungen zur Validierung und Weiterentwicklung von Methoden und Rechenverfah-

ren im Hinblick auf schwere Störfälle und sich daraus ergebende mögliche radiologische Konsequenzen durchgeführt, um den Stand des Wissens über die Sicherheitsbeurteilung der heute in Betrieb befindlichen Kernreaktoren zu erhalten und weiter zu entwickeln. Für die Untersuchungen werden die in den Forschungszentren Jülich, Karlsruhe und Rossendorf vorhandenen und weiter zu entwickelnden Experimentiereinrichtungen wirksam eingesetzt. Die experimentellen Untersuchungen aber insbesondere theoretische Arbeiten werden auch in Kooperation mit Hochschulen durchgeführt.

Dabei sollen einerseits Einzelphänomene untersucht werden, die in bisherigen Risikountersuchungen nur unzulänglich oder überhaupt nicht in Betracht gezogen werden konnten. Diese beziehen sich u.a. auf die Wechselwirkung zwischen Korium und Kühlmittel, die Kühlung der Kernschmelze und auf Untersuchungen zur Entstehung und Kontrolle von Wasserstoff während des Betriebs und bei Störfällen in Druck- und Leichtwasserreaktoren. Andererseits wird eine durchgängig mechanistische Beschreibung aller einschlägigen Phänomene im Normalbetrieb und bei Störfallabläufen ausgearbeitet und realistische Obergrenzen für die verschiedenen Arten der Belastung der Sicherheitsumschließung ausgearbeitet. Ein Teil dieser Arbeiten wird im Rahmen von EU-Programmen bearbeitet, um das vorhandene Wissen zu bündeln und zur Weiterentwicklung von verbesserten Codes und Bewertungskriterien zu nutzen.

Die Ergebnisse der in diesem Programmthema durchgeführten Arbeiten werden unmittelbar in Sicherheitsanalysen und Sicherheitsbeurteilungen der in Betrieb befindlichen Kernreaktoren und in die Ausarbeitung von Empfehlungen zu Maßnahmen und ggf. Nachrüstmaßnahmen einfließen. Daneben tragen diese Arbeiten ganz entscheidend zum Kompetenzerhalt bei, um auch weiterhin mögliche Unfälle anhand von theoretischen Modellen analysieren und verstehen und damit zu einer künftigen Vermeidung ähnlicher Ereignisse beitragen zu können. Diese Kompetenz ist mindestens bis zum Ende der Betriebszeit der deutschen Kernkraftwerke erforderlich.

Zur Sicherung der nationalen Beurteilungskompetenz in kerntechnischen Sicherheitsfragen ist der wissenschaftliche Erfahrungsaustausch auf internationaler Ebene notwendig und damit auch die Mitwirkung in allen relevanten internationalen Projekten und Gremien. Nur so kann sichergestellt werden, dass die deutschen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der nuklearen Sicherheitsforschung weiterhin auf höchstem Niveau betrieben werden. Deutschland

konnte in der Vergangenheit aufgrund der hohen Sicherheitsstandards der deutschen Kernkraftwerke und der weltweit anerkannten Expertise in der Forschung zur Reaktorsicherheit wesentlichen Einfluss auf die Formulierung von Zielen und Inhalten internationaler Sicherheitsstandards nehmen. Es gilt, diese Expertise und Einflussnahme auch weiterhin zu sichern.

- Sicherheitsforschung zur nuklearen Entsorgung

  Im Rahmen der Sicherheitsforschung zur Entsorgung nuklearer Abfälle werden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Charakterisierung, Konditionierung und Immobilisierung hochradioaktiver Abfälle, zur Verringerung des Gefahrenpotenzials der endzulagernden Stoffe und zu Sicherheitsaspekten der Endlagerung durchgeführt. Die Arbeiten sind langfristig mit Blick auf ein etwa 2030 zur Verfügung stehendes Endlager angelegt.

  Radioaktive Abfälle entstehen neben kerntechnischen Anlagen bei kerntechnischen Forschungsarbeiten, in der Nuklearmedizin etc.. Zur Immobilisierung von ~ 70 m^3 hochradioaktiver Spaltproduktlösungen aus der ehemaligen Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe (WAK) wurde eine Verglasungstechnologie für die Konditionierung dieser Abfälle entwickelt, um diese in einen Zustand zu überführen, die ihre sichere Zwischen- und Endlagerung ermöglicht. Dazu wird eine entsprechende Verglasungsanlage im Forschungszentrum Karlsruhe aufgebaut (s. Abb. 2.16).

Abb. 2.16: Schmelzofen in der Verglasungszelle der Prototypanlage (PVA) des FZK - Instituts für nukleare Entsorgung

Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung von Methoden für die Charakterisierung, Sortierung und Trennung von radioaktiven Materialien. Neben kurzlebigen Zerfallsprodukten enthalten abgebrannte Kernbrennstäbe erhebliche Mengen an Actiniden und Spaltprodukten mit langen Halbwertszeiten. Diese Radionuklide bestimmen die Radiotoxizität der Abfälle. Die Abtrennung (Partitioning) dieser Radionuklide und die Umwandlung (Transmutation) in kurzlebige oder stabile Isotope würde daher das über lange Zeiträume bestehen bleibende Gefährdungspotenzial des hochradioaktiven Abfalls entscheidend beeinflussen. Daher werden einerseits Arbeiten zur weiteren Verbesserung des PUREX-Prozesses, zur Entwicklung neuer und verbesserter selektiver Extraktionsmittel und zur Entwicklung neuer Trennverfahren durchgeführt, andererseits Untersuchungen zur technologischen Machbarkeit der Transmutation in Beschleuniger getriebenen unterkritischen Anordnungen (ADS) durchgeführt Letztere Untersuchungen werden im Forschungszentrum Karlsruhe in einer dafür errichteten Experimentiereinrichtung für eine Blei-Wismut-Legierung durchgeführt, die in ADS-Systemen als Target und als Kühlmittel eingesetzt werden soll.

Zur Langzeitsicherheitsbewertung von zukünftigen Endlagern werden Untersuchungen zur Rückhaltung von Radionukliden durch Mehrfach-Barrieresysteme, zur Wechselwirkung von eintretendem Wasser in Salzformationen mit Behältern, die abgebrannte Brennstäbe oder verglaste hochradioaktive Abfälle enthalten, durchgeführt. Außerdem wird die Wechselwirkung von Zement oder Beton, der als Verfestigungsmatrix für schwach- und mittelaktiven Abfall eingesetzt werden soll, mit Porenwässern in Tonformationen untersucht. Daneben laufen auch Untersuchungen zur Endlagerung in Granit. Die durchgeführten Forschungsarbeiten haben sowohl grundlegenden als auch anwendungsorientierten Charakter, wobei der Schwerpunkt bei der Geochemie der Actiniden und auf dem Langzeitsicherheitsnachweis liegt.

Erfreulicherweise ist es inzwischen, auch mit Hilfe des Kompetenzverbunds Kerntechnik, gelungen, Nachwuchswissenschaftler wieder für den Bereich nukleare Entsorgung zu interessieren. Dies ist überaus wichtig, da auch nach der Stilllegung von Kernreaktoren noch für viele Jahre und Jahrzehnte kerntechnische Kompetenz zum Rückbau und zur Entsorgung von Reaktoren sowie zur Endlagerung radioaktiver Reststoffe erforderlich ist.

Für das evaluierte Programm „Nukleare Sicherheitsforschung sind für den Zeitraum 2005 bis 2008 folgende Ansätze vorgesehen:

Tab. 2.9: BMBF-Institutionelle Förderung „Nukleare Sicherheitsforschung“ (in Tsd. €)

Ist	Soll	Plandaten			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
29.260	31.178	31.147	31.133	31.126	31.022

Die Ansätze können sich abhängig von den jährlich zu treffenden Investitionsentscheidungen des HGF-Senats verändern.

2.4.1.4 Fusionsforschung

Kernfusion ist der Prozess, mit dem die Sonne und die Sterne die Energie erzeugen, die sie kontinuierlich abstrahlen. Die Fusionsforschung verfolgt das Ziel, diesen Prozess auf der Erde nachzubilden und so eine neue Energiequelle zu erschließen, die eine Reihe günstiger Eigenschaften in sich vereint: große Brennstoffreserven, günstige Sicherheitseigenschaften und geringe Umweltbelastung.
Unter irdischen Bedingungen sind von den möglichen Paaren leichter Atomkerne, die fusionieren können, Deuterium und Tritium diejenigen mit der größten Energieausbeute. Beide Ausgangsstoffe zur Energieversorgung stehen faktisch für viele Tausend Jahre zur Verfügung.

In einem Fusionskraftwerk ist ein Unfall, der zum „Durchgehen“ des Reaktors führen könnte, physikalisch ausgeschlossen, da keine Kettenreaktion stattfindet. Jede Fehlsteuerung eines Fusionsreaktors führt zum sofortigen Verlöschen des Plasmas. Aktivierungen von Wandmaterialen eines Fusionsreaktors können durch Neutronen erfolgen. Sie sind zeitlich aber überschaubar. Die derzeitigen Materialuntersuchungen beschäftigen sich insbesondere mit der Entwicklung geeigneter und durch Neutronen nur gering aktivierbarer Wandmaterialien.

Fusionskraftwerke sind klimaneutral, weil bei der Energieerzeugung weder Treibhausgase (insbesondere kein CO_2), noch Stick- oder Schwefeloxide freigesetzt werden. Mit den genannten Vorzügen der langfristigen Versorgungssicherheit und der Klimaneutralität sowie günstigen Sicherheitseigenschaften stellt die Fusion eine Energieerzeugungsoption dar, die in einem künfti-

gen, auf Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit ausgelegten Energiemix eine wichtige Rolle spielen könnte.

Die Komplexität der Technologien, die zur Realisierung des Fusionsprozesses notwendig sind, wurde in den Anfangsjahren der Fusionsforschung unterschätzt. Eine wesentliche Ursache dafür ist eine überaus komplexe Plasmaphysik, die theoretisch nur schwer beschreibbar ist und daher vor allem auf experimentelle Untersuchungen angewiesen ist. Inzwischen sind die physikalischen Hintergründe für diese Probleme zwar viel besser bekannt als früher und heutige Großrechner ermöglichen z.B. die Lösung komplexer Gleichungen zu turbulenten Strömungen, mit denen deutlich bessere Vorhersagen des Plasma-Verhaltens ermöglicht werden, eine experimentelle Bestätigung der theoretischen Vorhersagen ist aber immer noch zwingend erforderlich.

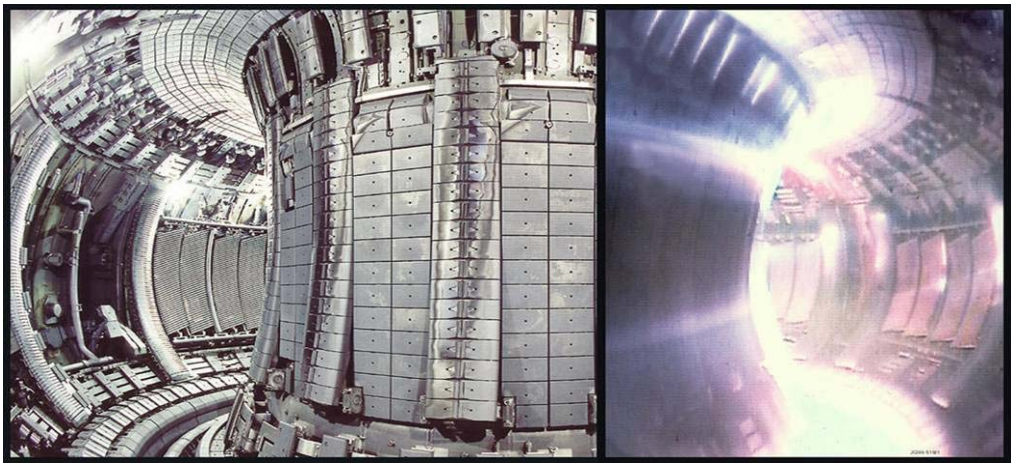
Die Fusionsforschung ist damit zu einem Paradebeispiel globaler Forschungskooperation geworden. Die europäische Forschung ist dabei ein schwergewichtiger Baustein; sie wird bereits seit vielen Jahren im Rahmen von Euratom koordiniert. Die europäischen Staaten verfolgen in diesem Rahmen eine gemeinsame Strategie. In Deutschland wird die Fusionsforschung im Programm „Kernfusion“ der Helmholtz-Gemeinschaft, das seinerseits integraler Bestandteil des europäischen Fusionsforschungsprogramms ist, vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik mit seinem Teilinstituten in Garching und Greifswald und von den Forschungszentren Karlsruhe und Jülich getragen. Die Zusammenarbeit mit nicht-europäischen Ländern wird über die Internationale Energie-Agentur (IEA) und die Internationale Atomenergiebehörde (IAEO) koordiniert.

Die zentrale wissenschaftliche Herausforderung bei der Fusionsforschung liegt darin, die elektrische Abstoßung der Atomkerne, die die Fusionsreaktion eingehen sollen, zu überwinden. Dafür sind sehr hohe Temperaturen (> 100 Millionen Grad) notwendig. Bei diesen Temperaturen liegen die Atome eines Gases ionisiert vor, es ist ein „Plasma“ entstanden. Das Plasma ist elektrisch leitend und kann daher durch magnetische Felder beeinflusst (und damit eingeschlossen) werden. Dies ist erforderlich, um das Plasma von der Wand des Reaktorgefäßes fernzuhalten, da Materialien für solche Temperaturen nicht geeignet sind.

In Europa wurden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt. So ist es mit dem europäischen Experiment JET („Joint European Torus“ in Culham, Großbritannien) gelungen, einer „Zündung“ des Plasmas sehr nahe zu kommen. Ein Plasma „zündet“, wenn so viele Fusionsprozesse ablaufen, dass die Energie der dabei gebildeten Heliumkerne ausreicht, um die Temperatur

des Plasmas aufrecht zu erhalten. Ein Maß für die erreichten Erfolge ist das sog. „Tripelprodukt“, das aus der Dichte des Plasmas (das etwa ein Milliardstel der Dichte der Atmosphäre entspricht), der Temperatur (rund 200 Millionen Grad) und der Einschlusszeit des untersuchten Plasmas gebildet wird. Seit den 1950er Jahren konnte dieser Wert um 5 Größenordnungen gesteigert werden und liegt für JET nun bereits nahe an den Zündbedingungen. Mit JET ist es 1997 gelungen, eine Fusionsleistung von 12 Mega-Watt für 2 s zu realisieren. Dabei konnten bereits 65 % der zur Heizung eingebrachten Energie wieder gewonnen werden.

Abb. 2.17: Blick ins Innere des europäischen Fusionsreaktors JET (Culham, Großbritannien) – links ohne, rechts mit Plasma.



Auf der Basis des insbesondere mit JET erreichten Standes der Fusionsforschung wird nun das nächste internationale Großexperiment, ITER (lat.: der Weg), in einer internationalen Kooperation vorbereitet. ITER soll vor allem dazu dienen, eine sich selbst erhaltende Fusionsreaktion in einem gezündeten Plasma zu beherrschen. Daneben sollen der Tritiumkreislauf und das Verhalten von Materialien und Komponenten untersucht sowie Erfahrungen mit der Abfuhr der Heliumkerne, die beim Fusionsprozess als „Asche“ entstehen, gesammelt werden. ITER soll in einer weltweiten Zusammenarbeit aller großen Industrienationen (Europäische Union, Japan, USA, Russland, China und Süd-Korea) gebaut werden. Die Bundesregierung unterstützt als Mitgliedsstaat der Europäischen Union den Bau von ITER. Zurzeit wird über den Standort von ITER verhandelt. Sowohl Europa (mit Cadarache in Südfrankreich) als auch Japan (mit Rokkasho-mura in Nordjapan) haben Standort-Angebote unterbreitet; die Entscheidung über den Standort wird demnächst erwartet. Der Bau von ITER könnte 2006, der Experimentierbetrieb 2016 beginnen.

Ein möglicher Zeitplan für den weiteren Weg zu einem energieerzeugenden Fusionskraftwerk könnte wie folgt aussehen: 2021 - Planung eines ersten Demonstrationskraftwerks, DEMO, Bau-

beginn von DEMO - 2026, Betriebsbeginn - 2036. Unter der Voraussetzung, dass mit einer fünfjährigen Betriebsphase genügend Erfahrungen gesammelt werden können, könnte die Planung eines ersten kommerziellen Kraftwerks etwa 2040 erfolgen. Noch ehrgeizigere Zeitpläne – zum Beispiel auch der von Großbritannien vorgeschlagene „fast track“ – könnten zum Bau eines Fusionskraftwerks bereits in 20 Jahren führen, setzen jedoch voraus, dass Materialforschung und Fusionstechnologie in den nächsten Jahren mit deutlich höherer Priorität verfolgt werden als bisher.

Die deutschen Beiträge zum europäischen bzw. internationalen Fusionsprogramm werden sich in den kommenden Jahren im Rahmen der programmorientierten Förderung der HGF auf die vier Bereiche „ITER“, „Fusionstechnologie“, „Tokamak-Physik“ und „Stellaratorforschung“ konzentrieren, in denen die deutsche Fusionsforschung auch im internationalen Vergleich über erhebliches Know-how verfügt. Zur Durchführung von plasmaphysikalischen Forschungsarbeiten stehen den Helmholtz-Zentren dabei neben dem europäischen Fusionsexperiment JET die Fusionsexperimente TEXTOR (FZJ) und ASDEX Upgrade (IPP) zur Verfügung, für eher technologische Untersuchungen werden im FZK u. a. die Magnetspulen-Testanlage TOSKA und das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) eingesetzt.

Die Themen des HGF-Programms „Fusionsforschung“ befassen sich mit „ITER“, „Fusionstechnologie“, „Tokamak-Forschung“ und „Alternative Einschlusskonzepte – Stellarator“. **ITER** wird das europäische Fusionsforschungsprogramm in den nächsten Jahren entscheidend prägen. Die deutschen Forschungseinrichtungen werden die Realisierung von ITER durch Entwicklungsarbeiten zu einer Reihe von Teilsystemen unterstützen. Dazu gehören supraleitende Magnete, der Brennstoff-Kreislauf mit seinen Vakuum- und Rückgewinnungssystemen, aber auch die Plasmaheizung und Plasma-Diagnostiken. Außerdem werden Entwicklungsarbeiten zum Divertor durchgeführt. Divertoren dienen dazu, energiereiche Teilchen aus dem Plasma abzufangen und das als „Asche“ entstehende Helium abzuführen. Es soll auch untersucht werden, wie weit es möglich ist, den an ASDEX Upgrade gefundenen und an JET verifizierten Betriebsmodus (sog. „verbesserte H-Regime“) auch in ITER zu erreichen. Damit könnte die Fusionsausbeute verdoppelt werden.

In der Bauphase wird die deutsche Unterstützung für ITER auch die Entsendung von Experten sowohl zum internationalen ITER-Team als auch in die europäische Organisation, die die Beschaffungen für ITER in Europa koordinieren soll, einschließen. Daneben ist geplant, dass die

an der Fusionsforschung beteiligten deutschen Forschungseinrichtungen im Einzelfall auch die Verantwortung für ITER-Komponenten, die ihrem jeweiligen Know-how-Bereich entsprechen, übernehmen. Dies beinhaltet sowohl die Entwurfsarbeiten als auch das Vertragsmanagement und die Qualitätskontrolle gegenüber den ausführenden Industriefirmen.

Diese Arbeiten werden ergänzt durch Untersuchungen zur **Erweiterung der physikalischen Basis** des Betriebs von ITER im Hinblick auf Plasmaeinschluss und Transportphänomene. Ziel ist dabei, Betriebszustände zu entwickeln, die einen quasi-stationären Betrieb von ITER ermöglichen. Dazu werden auch umfangreiche theoretische Arbeiten und numerische Simulationen zum komplexen, nicht-linearen Verhalten der Plasmen in einem **Tokamak** notwendig sein. Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit Plasma-Wand-Wechselwirkungen, Heiz- und Stromtreibsystemen etc.. Für diese Untersuchungen werden die in den HGF-Zentren und in Europa verfügbaren Experimentiereinrichtungen (TEXTOR, ASDEX Upgrade und JET) eingesetzt.

Mit dem Bau der weltweit größten und fortgeschrittensten **Stellarator-Anlage, Wendelstein 7-X,** am Teilinstitut Greifswald des MPI für Plasmaphysik soll insbesondere die Kraftwerkstauglichkeit dieses Anlagentyps demonstriert werden. Stellaratoren können anders als Tokamaks von vorneherein im Dauerbetrieb arbeiten, da im Plasmagefäß kein extern induzierter Plasmastrom wie beim Tokamak benötigt wird. Die in Deutschland durchgeführte Stellaratorforschung dient der Untersuchung der physikalischen und technischen Besonderheiten dieses Einschlusskonzepts und soll dazu führen, den Kenntnisabstand zu den bereits sehr weit entwickelten Tokamak-Konzepten so zu verringern, dass am Ende der Betriebszeiten von ITER und Wendelstein 7-X eine Entscheidung möglich wird, ob DEMO, das auf ITER folgende Demonstrationskraftwerk, nach dem Tokamak- oder dem Stellarator-Prinzip gebaut werden soll. Wendelstein 7-X wird nach seiner Inbetriebnahme ab ca. 2010 Wissenschaftlern aus ganz Europa und ggf. auch weltweit für Forschungsarbeiten zur Verfügung stehen.

Mit Blick auf das auf ITER folgende **Demonstrationskraftwerk DEMO** sollen in den nächsten Jahren auch **Technologien** und Module für die Umwandlung des Primär-Brennstoffs Lithium in den Reaktionsbrennstoff Tritium entwickelt und Untersuchungen zur Abfuhr der dabei entstehenden Reaktionsenergie durchgeführt werden. Außerdem ist es für eine zukünftige Energiegewinnung in einem Fusionskraftwerk unerlässlich, geeignete Strukturmaterialien für den gesamten Reaktor, insbesondere im Hinblick auf Langzeitstabilität, zu entwickeln. Die Arbeiten schließen auch Beiträge zur Konzeption und zum Aufbau einer Testanlage für Materialien ein

(IFMIF - International Fusion Materials Irradiation Facility), die den hohen Neutronenflüssen in einem zukünftigen Fusionskraftwerk widerstehen können. Daneben sollen die u.a. auch bisher schon am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik gemeinsam mit Universitäten durchgeführten sozio-ökonomische Studien zur Bewertung der künftigen Rolle und Bedeutung der Fusionsenergie ausgeweitet werden.

Für das evaluierte Programm „Fusionsforschung“ sind für den Zeitraum 2005 bis 2008 folgende Ansätze vorgesehen:

Tab. 2.10: BMBF-Institutionelle Förderung „Fusionsforschung“ (in Tsd. €)

Ist	**Soll**	**Plandaten**			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
115.298	115.000	115.000	115.000	115.000	114.900

Die Ansätze können sich abhängig von den jährlich zu treffenden Investitionsentscheidungen des HGF-Senats verändern. Die Bundesregierung wird im Jahr 2006 innerhalb der programmorientierten Förderung der HGF eine Evaluierung ihrer Anstrengungen zur Fusion im Verhältnis von Aufwand und Wirkungen vornehmen und mit Blick auf die nächste Programmperiode der HGF entscheiden.

Literatur

[1] BMBF/BMWA (2003): Forschungspolitische Vorgaben der Zuwendungsgeber für den HGF-Forschungsbereich “Energie“

2.4.2 Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung

Um langfristig einer nachhaltigen Energieversorgung zum Durchbruch zu verhelfen, ist es erforderlich, die Grundlagenforschung im Bereich erneuerbarer Energien und rationeller Energienanwendung zu stärken. Ein geeignetes Instrument dazu ist die Förderung von Netzwerken, die darauf zielen, innovative Ansätze mit den Schwerpunkten Energietechnik, Materialforschung und mathematische Modellierung zu entwickeln [1]. Dies erweist sich für das grundlegende Verständnis und das frühzeitige Erkennen von Potenzialen von Energietechniken wie molekulare Verfahren für energieumwandelnde Prozesse von zunehmender Bedeutung. Der BMBF hat dazu im Jahr 2004 eine entsprechende Förderinitiative „Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung“ bekannt gegeben. Ihr primäres Ziel ist es, Ergebnisse und Methoden der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung für zukünftige Entwicklungen aus dem Bereich der *erneuerbaren Energien* und der *Rationellen Energieanwendung* nutzbar zu machen.

Sie knüpft an die Erfolge der Fördermaßnahme *Vernetzungsfonds erneuerbare Energien* an. Neben dem Aufgreifen neuer inhaltlicher Fragen zielt die Initiative auch darauf, strukturelle Verbesserungen der wissenschaftlichen Forschung auszulösen und durch Kooperationen zwischen Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen in Form von Netzwerken den Aufbau bzw. Ausbau einer fachspezifischen Community zu stärken. Das Förderkonzept wurde seinerzeit gemeinsam durch BMBF und BMWA unter Mitwirkung des Forschungsverbundes Sonnenenergie entwickelt.

Durch die Unterstützung des Vernetzungsfonds konnten hervorragende Netzwerke zur Lösung komplexer Fragestellungen aufgebaut werden, die durch die Nutzung von Synergieeffekten die Forschung und Entwicklung im Feld der erneuerbaren Energien weiter voran gebracht haben.

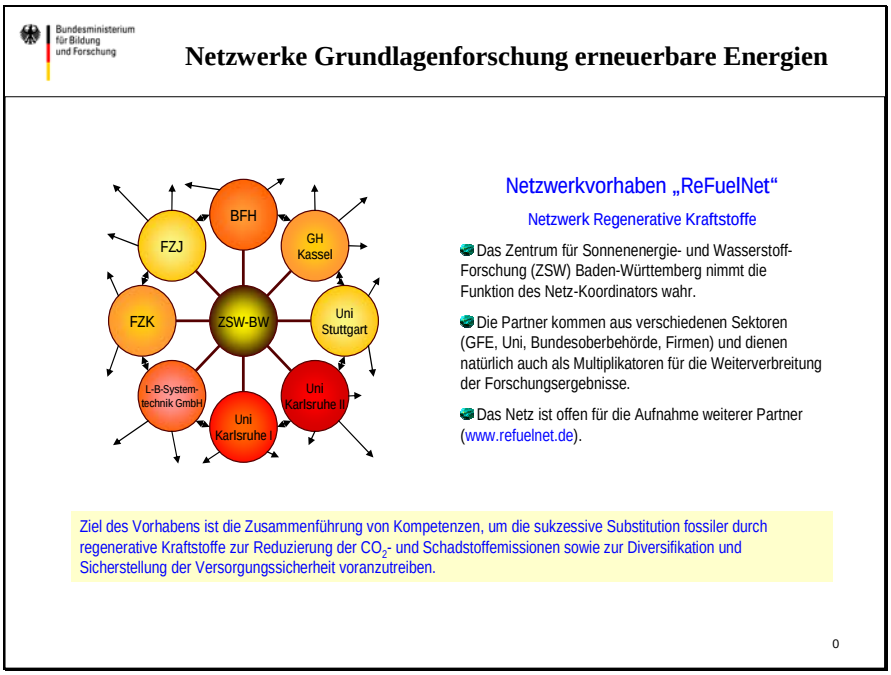
Seit der Aufnahme der Förderung im Herbst 2000 wurden bisher mehr als 22 Mio. € für 65 Netzwerke aufgewandt. Die Themenbereiche der Netzwerke bzw. Forschungsverbünde reichten dabei von der Photovoltaik (Silizium gebundene Photovoltaik, Dünnschichtphotovoltaik, organische Photovoltaik) über die Brennstoffzelle (Katalysatorentwicklung, Degradations- und Alterungsmechanismen in Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen) und die Nutzung der thermischen Solarenergie (Entwicklung von Absorbermaterialien) bis hin zum Einsatz von Biomasse

zur nachhaltigen Energiegewinnung (Entwicklung neuer Syntheserouten für regenerative Kraftstoffe).

Die im Vernetzungsfonds geförderten Vorhaben zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass sie an der Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und dem Übergang in die Anwendung angesiedelt sind. Durch die Arbeiten der Netzwerke und Verbünde konnten vielfach wichtige Fortschritte auf dem Weg zum marktfähigen Produkt gemacht werden.

Insgesamt hat sich der Vernetzungsfonds erneuerbare Energien als ein geeignetes Instrument erwiesen, um leistungsfähige Potenziale von Forschungseinrichtungen thematisch zusammenzuführen und Anreize zu gemeinsamer Arbeit zu geben.

Abb. 2.18: Netzwerkvorhaben „ReFuelNet“



Mit der neuen Förderinitiative wird erwartet, dass die zu Beiträgen aufgerufenen Institutionen sich tiefer mit den Grundlagen befassen. Dem liegt zu Grunde, dass ein tieferes Verständnis eher zu innovativen, überraschenden Lösungen führt als das ausschließliche Beschreiten konventioneller Wege der Energieforschung. Die Verbindung der Grundlagenforschung mit Anwendungen außerhalb ihrer ursprünglichen Aufgaben- und Zuständigkeitsbereiche wird sowohl der Grundlagenforschung selbst als auch der Energieforschung und deren Anwendungsbereichen in Wissenschaft und Praxis zu Gute kommen. Der Bund fokussiert durch diese Förderinitiative einen Teil

der *Scientific Community* der Grundlagenforschung auf das für seine Vorsorgepflicht notwendige Forschungsfeld der künftigen Energieversorgung.

Die Initiative spricht neben den *erneuerbare Energien* als Anwendungsbereich der Grundlagenforschung auch die *rationellen Energieanwendung* an. Die Erfahrungen zeigen, dass gerade im Grundlagenbereich eine zu frühe „Grenzziehung“ zwischen Förderbereichen als nicht zielführend angesehen werden kann. Die Förderinitiative ist bewusst offen formuliert. Neue Ansätze aus allen Bereichen der Grundlagenforschung für die Photovoltaik, die Solarthermie, die Wind- und Geothermie, die Biomasse, die Brennstoffzellen oder zu Querschnittsthemen der Energieversorgung, Energiespeicherung oder zu gesellschaftlichen Folgen der verstärkten Nutzung regenerativer Energien können lohnende Zielfelder der Forschung sein. Es geht also vorrangig um neue Ansätze, wie z.B. neue Vakuumsuperisolationen zur Energieeinsparung, turbulente Strömungen in der Energietechnik, neue elektrochemische Energiespeicher, in der Beleuchtungs- u. Lichttechnik, neue Membrantechniken zur Energieeinsparung, biotechnologische Ansätze zur CO_2 – Fixierung am Kraftwerk.

Im Rahmen der Förderinitiative ist vorgesehen in den Jahren 2005 bis 2008 rd. 41 Mio. € bereitzustellen.

Tab. 2.11: BMBF-Projektförderung „Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung“ (in Tsd. €)

Ist	**Soll**	**Plandaten**			
2003	2004	2005	2006	2007	2008
6.600	9.830	11.100	10.100	10.100	10.100

Literatur

[1] BMBF (2004): Richtlinien zur Förderinitiative „Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung“ vom 16. März 2004. Amtlicher Teil Bundesanzeiger Nr. 60 vom 26. März 2004

3. Leitfaden für die Projektförderung

Die *Projektförderung* richtet sich an Unternehmen, Forschungsinstitute und Universitäten. Sie erfolgt in Form von **Zuwendungen** für Forschungsvorhaben, die im Markt nicht realisierbar sind, bzw. für Projekte, die eine erste praktische Anwendung verbesserter oder neuer Energietechnologien demonstrieren wollen. Die Projektförderung ist ein Instrument zur Unterstützung von thematisch und zeitlich abgegrenzten Vorhaben mit hohem Risiko und von bundesweitem Interesse. Sie wird nur in den Fällen eingesetzt, in denen der Markt in absehbarer Zeit die neuen technischen Entwicklungen nicht von selbst erbringen kann.

Die Projektförderung erfolgt häufig in Form der **Verbundforschung**, bei der Hochschulen und Forschungsinstitute im Verbund mit Unternehmen vorwettbewerblich zusammenarbeiten, um durch eine arbeitsteilige, übergreifende Bearbeitung komplexer und nur längerfristig zu lösender Problemstellungen bestehende Energietechnologien zu verbessern bzw. neue Energietechnologien zu entwickeln.

3.1 Voraussetzungen

Dieser Leitfaden soll einen ersten Überblick über die Rahmenbedingungen der Förderung geben. Genauere Einzelheiten zu den Fördermodalitäten werden in ressortspezifischen Förderrichtlinien bzw. Förderbekanntmachungen veröffentlicht, die sicherstellen, dass die Fördermittel im öffentlichen Interesse und nach den gesetzlichen Vorgaben verwendet werden.

Die Themen, die gefördert werden können, sind in dem Energieforschungsprogramm „Innovation und neue Energietechnologien“ beschrieben. Allerdings können nicht immer alle aufgeführten Themen auf breiter Front gefördert werden. Das Programm gibt jedoch den Rahmen, formuliert die Grundzüge der Förderpolitik und bildet die Basis, auf deren Grundlage die Förderentscheidungen getroffen werden. Ein Rechtsanspruch auf Gewährung einer Zuwendung besteht nicht. Die Bewilligungsbehörde entscheidet aufgrund ihres pflichtgemäßen Ermessens im Rahmen der verfügbaren Haushaltsmittel.

Für den Antragsteller ist es wichtig zu beachten, dass die Zuständigkeit für die projektorientierte Förderung von Forschung und Entwicklung im Energiebereich bei verschiedenen Ministerien liegt:

- BMWA: *Rationelle Energieumwandlung* (Kraftwerkstechnik auf Basis Kohle und Gas, Brennstoffzellen, Speichertechnologien und Wasserstoff, Energieoptimiertes Bauen, Energieeffizienz in der Industrie, im Gewerbe, im Handel und bei Dienstleistungen, Systemanalyse und Informationsverbreitung) sowie *nukleare Sicherheits und Endlagerungforschung.*
- BMU: *Erneuerbare Energien* (Photovoltaik, Windenergie, Hoch- und Niedertemperatur-Solarthermie, Geothermie, Wasserkraft und Nutzung der Meeresenergie, Ökologische Begleitforschung, übergreifende Forschungsthemen).
- BMVEL: *Bioenergie* (z. B. KWK, spezielle Energiepflanzen, Vergasung, Wasserstofferzeugung, BtL-Treibstoffe).
- BMBF: *Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung* (z. B. Photovoltaik, Solarthermie, Wind, Geothermie, Biomasse, Brennstoffzelle, , Energiespeicher, Systemanalyse, rationelle Energienutzung in Gebäuden und der Industrie).

Ob das einer Projektidee zugrundeliegende Thema gefördert wird, können im Einzelfall nur die zuständigen Ministerien und die von diesen mit der Umsetzung des Forschungsprogramms beauftragten Projektträger entscheiden. Die Projektträger prüfen jedes beantragte Vorhaben auf seinen Innovationsgehalt, sowie die fachliche Kompetenz und die Bonität des Antragstellers. Darüber hinaus bewerten sie den möglichen Beitrag, den das Vorhaben zu den förderpolitischen Zielen des Energieforschungsprogramms leisten kann. Sind diese Kriterien in allen Punkten in ausreichendem Maße erfüllt, kommt eine Förderung in Betracht. Die endgültige Förderentscheidung fällt das zuständige Ministerium.

Antragsberechtigt sind in Deutschland produzierende Unternehmen - insbesondere KMU-, Hochschulen sowie in Deutschland ansässige außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und andere Institutionen bzw. juristische Personen. Das Vorhaben muss in Deutschland durchgeführt und verwertet werden. Eine weitere Grundbedingung für eine Förderung ist, dass die Antragsteller einen Eigenanteil in das Forschungsprojekt einbringen.

3.2 Finanzielle Modalitäten der Projektförderung

Die Förderung erfolgt anhand von Zuwendungen. Rechtsgrundlage bildet die Bundeshaushaltsordnung (BHO) zusammen mit den Vorläufigen Verwaltungsvereinbarungen (Vorl. VV), in denen die Voraussetzungen und Verfahrensabläufe geregelt sind. Darüber hinaus gilt über den Gemeinschaftsrahmen für staatliche Forschungs- und Entwicklungsbeihilfen auch das europäische Recht. Die Zuwendungen werden in Form von Teilfinanzierungen zur Anteils-, Fehlbedarfs- oder Festbetragsfinanzierung, oder – in Ausnahmefällen – auch zur Vollfinanzierung eines Projektes gewährt.

Bei Antragstellern aus *öffentlichen Einrichtungen* sind die *Projektausgaben* Bemessungsgrundlage für die Höhe der Förderung. Universitäten werden in der Regel mit einer Förderquote von 100 % unterstützt. Bei *Unternehmen* der gewerblichen Wirtschaft bilden die *Projektkosten* einschließlich der Gemeinkosten die Basis für die Förderung.

Die Förderquoten unterliegen den Regelobergrenzen der Beihilferichtlinien der Europäischen Union. D. h. bei anwendungsorientierten Projekten, wie sie in der Regel von Industrieunternehmen durchgeführt werden, können bis zu 50 % der Kosten gefördert werden. Die Beihilferichtlinien lassen jedoch für Antragsteller aus den neuen Bundesländern und für KMU eine differenziertere Bonusregelung zu, die ggf. zu einer höheren Förderquote führen kann.

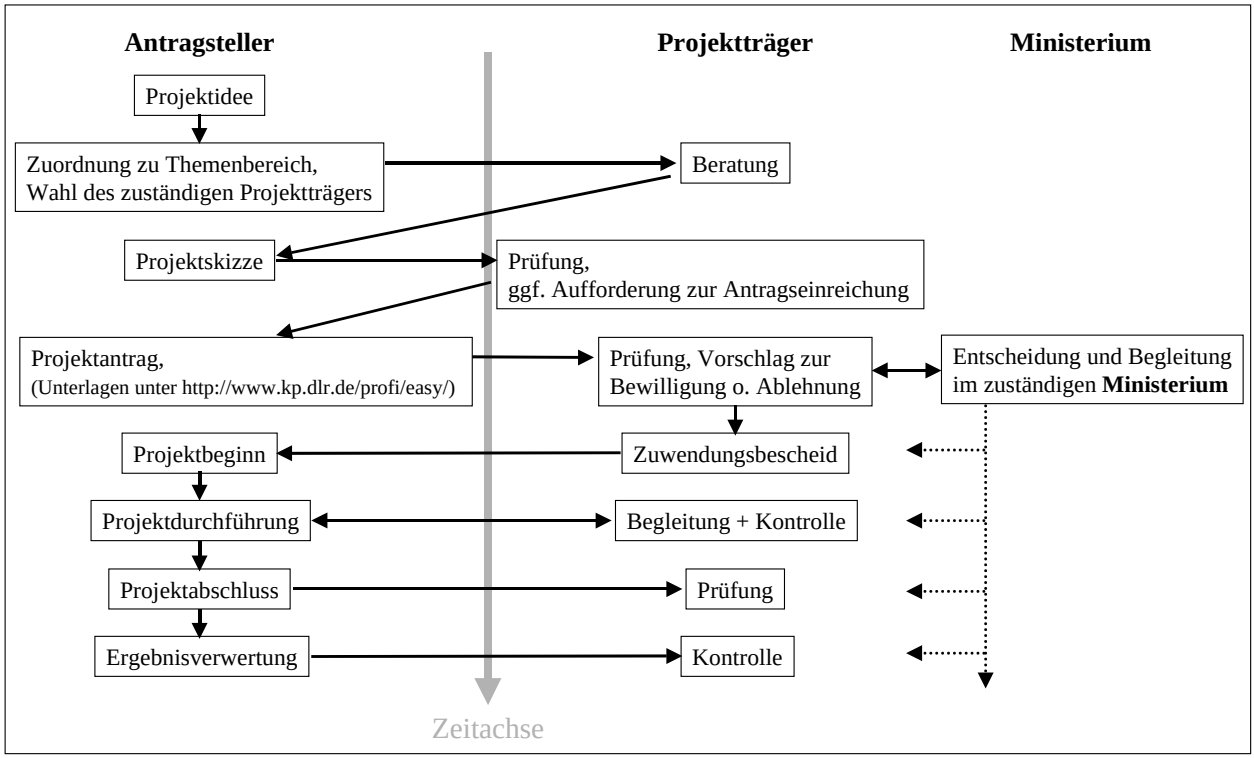
Ausschlaggebend für die Höhe der Förderquote ist das technisch-wissenschaftliche Risiko und das Bundesinteresse, das dem Vorhaben beigemessen wird. Grundsätzlich richtet sich die Bemessung der Höhe der Förderung nach dem Grundsatz des wirtschaftlichen und sparsamen Umgangs mit öffentlichen Mitteln.

3.3 Durchführung eines Projektes

Ein besonderes Anliegen der Bundesregierung ist es, Antragsteller ausführlich und kompetent über die Fördermöglichkeiten im Rahmen des Energieforschungsprogramms zu beraten. Eine erste Adresse für eine solche Beratung sind die Projektträger, die im Auftrag der jeweils zuständigen Ministerien mit der Umsetzung und Durchführung dieses Forschungsprogramms beauftragt sind (Übersicht der Projektträger siehe Anhang A; Hinweise zu weiteren Informationsstellen gibt Anhang B).

Die Projektträger betreuen und begleiten die Projekte sowohl fachlich als auch administrativ von der ersten Kontaktaufnahme des Antragstellers über die Antragsgestaltung, Antragsprüfung, Förderentscheidung, Mittelauszahlung, Erfolgskontrolle, Schlussabrechnung bis zur Verwertung der Ergebnisse. Der Verlauf eines erfolgreichen Projektes von der Idee bis zur Ergebnisverwertung ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt.

Abb. 3.1: Der Weg eines erfolgreichen Projektes



3.4 Ergebnisverwertung

Notwendige Voraussetzung für den Erfolg eines Projektes ist die Sicherstellung der bestmöglichen Verwertung der Ergebnisse. Die Förderrichtlinien sehen deshalb bereits bei Antragstellung eine genaue Darlegung der späteren Verwertung der Ergebnisse in Form eines Verwertungsplans vor. Der Projektdurchführende ist verpflichtet, eine Umsetzung dieses Verwertungsplans anzustreben. Als Gegenleistung erhält er die Rechte an der ausschließlichen Nutzung der Ergebnisse. Allerdings muss er bei Forschungsprojekten, bei denen eine gewerbliche Nutzung zu erwarten ist, gewährleisten, dass die erzielten Ergebnisse schutzrechtlich gesichert werden, denn es liegt im besonderen Interesse der Projektförderung, dass patentfähiges neues Wissen nach Möglichkeit zur Patentierung angemeldet wird. Die damit verbundenen Kosten sind bei kleinen und mittelständischen Unternehmen und öffentlichen Forschungseinrichtungen förderfähig. Darüber hinaus besteht eine generelle Veröffentlichungspflicht in Form von Konferenz- und/oder Fachliteraturbeiträgen.

Anhang

A Liste der Projektträger

Energieoptimiertes Bauen; *Energieeffizienz in der Industrie, im Gewerbe, im Handel und bei Dienstleistungen;* *Informationsverbreitung* Projektträger Jülich (PTJ) Geschäftsbereich ERG1 Forschungszentrum Jülich 52425 Jülich Telefon: 02461 61 4622 Fax: 02461 61 6999 Mail: PTJ-ERG1@fz-juelich.de Internet: http://www.fz-juelich.de/ptj/
Kraftwerkstechnik auf Basis Kohle und Gas; *Brennstoffzellen;* *Speichertechnologien und Wasserstoff;* Projektträger Jülich (PTJ) Geschäftsbereich ERG2 Forschungszentrum Jülich 52425 Jülich Telefon: 02461 61 4622 Fax: 02461 61 6999 Mail: PTJ-ERG2@fz-juelich.de Internet: http://www.fz-juelich.de/ptj/
Systemanalyse; *Netzwerke „Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendung“* Projektträger Jülich (PTJ) Geschäftsbereich GIN Forschungszentrum Jülich 52425 Jülich Telefon: 02461 61 4624 Fax: 02461 61 2880 Mail: PTJ-GIN@fz-juelich.de Internet: http://www.fz-juelich.de/ptj/

Erneuerbare Energien (ohne Bioenergie und Hochtemperatur-Solarthermie)

Projektträger Jülich (PTJ)
Geschäftsbereich EEN
Forschungszentrum Jülich
52425 Jülich
Telefon: 02461 61 4622
Fax: 02461 61 6999
Mail: PTJ-EEN@fz-juelich.de
Internet: http://www.fz-juelich.de/ptj/

Nukleare Sicherheitsforschung

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS)
PT Reaktorsicherheit
Postfach 10 15 64
50455 Köln
Telefon: 0221/2068-720
Fax: 0221/2068-629
Mail: erl@grs.de
Internet: http://www.grs.de

Nukleare Endlagerforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Projektträger des BMBF und BMWA für Wassertechnologie und Entsorgung (PtWT+E)
Postfach 3640
76021 Karlsruhe
Telefon: 07247-825790
Fax: 07247-825796
Mail: horst.pitterich@ptwte.fzk.de
Internet: http://www.fzk.de/ptwte/

Bioenergie

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
Hofplatz 1
18276 Gülzow
Telefon: 03843/6930-0
Fax: 03843/6930-102
Mail: info@fnr.de
Internet: http://www.fnr.de/

Hochtemperatur-Solarthermie

VDI/VDE Innovation und Technik GmbH
Rheinstraße 10 B
14513 Teltow
Telefon: 03328/435-0
Internet: http://www.solar-thermie.org/

B Weitere Informationsstellen

- *Allgemeine Informationen über Fördermöglichkeiten und -verfahren des BMBF:*

  Auskunftsstelle BMBF-Förderung
  Forschungszentrum Jülich
  Projektträger Jülich (PTJ)
  Wallstr. 17 - 22
  10179 Berlin
  Telefon: 0800 - 26 23 008 (gebührenfreie Hotline)
  Fax: 01888 - 57 2710
  Mail: foerderinfo@bmbf.bund.de
  Internet: http://www.fz-juelich.de/ptj/index.php?index=15

- *Förderberatung speziell für kleine und mittlere Unternehmen (KMU):*

  KMU-Förderberatung
  Forschungszentrum Jülich
  Projektträger Jülich (PTJ)
  Wallstr. 17 - 22
  10179 Berlin
  Telefon: 0800 -26 23 009 (gebührenfrei)
  sonst 01888 57 27 13
  Fax: 01888 57 27 10
  Mail: kmu-info@bmbf.bund.de
  Internet: http://www.kmu-info.bmbf.de

- *Formulare für die Antragstellung:*

  http://www.kp.dlr.de/profi/easy/index.htm

C Abkürzungsverzeichnis

ADS	Accelerator Driven Systems
APU	Auxiliary Power Unit
ASDEX	Axialsymmetrisches Divertorexperiment
BAZ	Bundesanstalt für Züchtungsforschung an Kulturpflanzen
BESSY	Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung
BFEL	Bundesforschungsanstalt für Ernährung und Lebensmittel
BFH	Bundesforschungsanstalt für Holz- und Forstwirtschaft
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BHO	Bundeshaushaltsordnung
Bi	Bismuth
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BMVEL	Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft
BMWA	Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit
BtL	Biomass to Liquid
CERT	Committee on Energy Research and Technology
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
CO_2	Kohlendioxid
COORETEC	CO_2-Reduktions-Technologien
CSLF	Carbon Sequestration Leadership Forum
CUTE	Clean Urban Transport for Europe
DEMO	Demonstration Fusion Reactor
DKW	Dampfkraftwerk
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DOE	Department of Energy
DOT	Department of Transportation
EduaR&D	Energie-Daten und Analyse R&D
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz

EnEV	Energieeinsparverordnung
EU	Europäische Union
EURATOM	European Atomic Energy Community
F&E	Forschung und Entwicklung
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
FH	Fachhochschule
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft
FVS	ForschungsVerbund Sonnenenergie
FZJ	Forschungszentrum Jülich
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
FZR	Forschungszentrum Rossendorf
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GGA	Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk
HFG	Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
HMI	Hahn-Meitner Institut
HTSL	Hochtemperatursupraleiter
IAEO	Internationale Atomenergieorganisation
IEA	Internationale Energieagentur
IFMIF	International Fusion Materials Irradiation Facility
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IKARUS	Instrumente-Klimagas-Reduktions-Strategien
IPHE	International Partnership on Hydrogen Economy
IPP	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
ISET	Institut für Solare Energieversorgungstechnik
ISFH	Institut für Solarenergieforschung in Hameln/Emmerthal
ISL	Ionenstrahllabor
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
KEK	Kompetenzerhalt in der Kerntechnik
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen

LIC	Liason and Implementation Committee
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MPA	Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart
MPG	Max-Planck-Gesellschaft
MPI	Max-Planck-Institut
NEA	Nuklear-Energie-Agentur
NECAR	New Electric Car
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
NRW	Nordrhein-Westfahlen
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PT	Projektträger
PUREX	Plutonium-Uran-Extraktionsverfahren
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
Si	Silizium
SMES	Supraleitende Magnetische Energie-Speicher
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
TEXTOR	Tokamak Experiment for Technology Oriented Research
TLK	Tritiumlabor Karlsruhe
TOSKA	ToroidalSpulen Testanlage Karlsruhe
TU	Technische Universität
Vorl. VV	Vorläufige Verwaltungsvereinbarungen
WAK	Wiederaufbereitungsanlage Karlsruhe
WGL	Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz
Y	Yttrium
ZSW	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

D Umrechnungsfaktoren

Zieleinheit / Ausgangseinheit	PJ	Mio. t SKE	Mio. t RÖE	Mrd. kcal	TWh
1 Petajoule (PJ)	-	0,034	0,024	238,8	0,278
1 Mio. t Steinkohleeinheit (SKE)	29,308	-	0,7	7.000	8,14
1 Mio. t Rohöleinheit (RÖE)	41,869	1,429	-	10.000	11,63
1 Mrd. Kilokalorien (kcal)	0,0041868	0,000143	0,0001	-	0,001163
1 Terrawattstunde (TWh)	3,6	0,123	0,0861	859,8	-

Zahlenangaben beziehen sich grundsätzlich auf den Heizwert (= "unterer Heizwert")