Energiekonzept 2050

Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % erneuerbaren Energien

Beitrag der Institute:
Fraunhofer IBP, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IWES, ISFH,
IZES gGmbH, ZAE Bayern und ZSW, die im ForschungsVerbund
Erneuerbare Energien (FVEE) zusammengeschlossen sind,
für das Energiekonzept der Bundesregierung

Juni 2010

Erstellt vom Fachausschuss
„Nachhaltiges Energiesystem 2050“
des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien

Fraunhofer IBP Fraunhofer ISE Fraunhofer IWES

ISFH izes gGmbH Institut für ZukunftsEnergieSysteme ZAE BAYERN ZSW

Inhalt • Energiekonzept 2050

Präambel 4

Einführung 6

- Beispiele für technologische Weiterentwicklungen der letzten Jahre 7
- Beispiele für ökonomische und politische Weiterentwicklungen der letzten Jahre 8
- Gemeinsamkeiten und Abgrenzungen zu gegenwärtig vorliegenden Energieszenarien und Stellungnahmen 8

Executive Summary 10

Kernaussagen des Energiekonzepts 2050 12

1. Das Energiesystem 2050 auf Basis erneuerbarer Energien 15

1.1 Entwicklung des Weltenergiebedarfs 15

1.2 Die technologischen Komponenten des Energiesystems 2050 und ihre Energiepotenziale 17

1.2.1 Energieeffizienztechnologien 17
1.2.2 Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien 17
1.2.3 Energiespeichertechnologien 18
1.2.3.1 Speichertechnologien für Stromenergie 18
1.2.3.2 Chemische Energiespeicher 19
1.2.3.3 Thermische Energiespeicher 20
1.2.4 Übertragungs- und Verteilungsnetze 22
1.2.4.1 Dezentrale und zentrale Strom- und Gasverteilnetze 22
1.2.4.2 Dezentrale Wärmenetze 23
1.2.5 Komponenten für solares und energieeffizientes Bauen 23

1.3 Die Funktionsweise des Energieversorgungssystems 2050 23
1.3.1 Die Stromerzeugung als Hauptstandbein der Energieversorgung 23
1.3.2 Energieeffizienz durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) 25
1.3.3 Wärmeerzeugung – direkte und sekundär erzeugte Wärme 26
1.3.4 Energieversorgung des Verkehrs 27
1.3.5 Information und Kommunikation in der Energieversorgung 27
1.3.6 Das Regenerative Kombikraftwerk 28
1.3.7 Gebäude, Städte und Gemeinden als energetische Systemkomponenten 29
1.3.8 Dynamisches Zusammenspiel der Technologiekomponenten 30

2. Transformation des heutigen Energiesystems zum nachhaltigen Energiesystem 2050 32

2.1 Strukturwandel im Raumwärmesektor 32

2.2 Von der Erdgasversorgung zum erneuerbaren Methan 33

2.3 Flexible energetische und stoffstromorientierte Nutzungsstrategien für Biomasse 33

2.4 Balance zentraler und dezentralen Energieversorgung 34

2.4.1 Netzmanagement von dezentralen Strom- und Wärmenetzen im Verbund mit großen, landesweiten und europäischen Übertragungsnetzen 34

2.4.2 Wie können Systemkonflikte vermieden werden? 34

2.5 Kosten und Nutzen des Umbau der Energieversorgung 35

2.5.1 Das Mengengerüst für 100%-EE-Szenario 2050 35

2.5.2 Differenzkosten für 100%-EE-Szenario 2050 39

2.5.2.1 Differenzkosten der Stromerzeugung 40

2.5.2.2 Differenzkosten der Wärmeerzeugung 41

2.5.2.3 Differenzkosten des Verkehrssektors 42

2.5.2.4 Differenzkosten – Einordnung in den Gesamtzusammenhang 44

2.5.3 Chancen und Risiken der Tansformation des Energiesystems 44

3. Die Bedeutung von Forschung und Entwicklung 48

• Kostenreduzierung durch Lernkurveneffekte 48

3.1 Forschung und Entwicklung aus Sicht des Energiekonzepts und langfristige Forschungsziele bis 2050 51

3.1.1 Energieeffizientes und solares Bauen 51

3.1.2 Strom aus erneuerbaren Energien 51

• Strom aus Photovoltaik 51

• Strom aus solarthermischen Kraftwerken 52

• Strom aus Windenergie 53

• Strom aus Erdwärme 53

3.1.3 Strom und Wärme aus Brennstoffzellen 54

3.1.4 Chemische Energieträger aus erneuerbaren Energien 54

• Energetische Nutzung von Biomasse 54

• Effiziente Erzeugung von Wasserstoff 55

• Effiziente Erzeugung von Methan 55

3.1.5 CO_2 als Rohstoff nutzen 56
3.1.6 Energiespeicher 56
• Stromspeicher 56
• Wärmespeicher 57
3.1.7 Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energien 58
• Wärme und Kälte aus solarthermischen Kollektoren 58
• Wärme und Kälte aus Geothermie 58
3.1.8 Mobilität 58
3.1.9 Elektrische Systemtechnik, Netzmanagement und verteilte Kraftwerke 59
3.1.10 Systemanalyse und Technikfolgenabschätzung für finanzielle Anreize und politischen Regulierungsbedarf 60
3.1.11 Soziale Begleitforschung 60

4. Politische Handlungsempfehlungen 61

4.1 Markteinführungsmaßnahmen 61
4.1.1 Markteinführungsmaßnahmen stimulieren 61
4.1.2 Markteinführung von EE-Stromerzeugung stimulieren 62
4.1.3 Markteinführung von EE-Wärmeerzeugung stimulieren 62
4.1.4 Markteinführung von EE-Mobilitätskonzepte stimulieren 62

4.2 Ressourcenproduktivität erhöhen 63

4.3 Infrastruktur und Rahmenbedingungen 63
4.3.1 Netze um- und ausbauen 63
4.3.2 Speicher integrieren 63
4.3.3 Gaskraftwerke mit KWK ausbauen 63
4.3.4 Integration in europäisches Energiekonzept 63
4.3.5 Aus- und Weiterbildung von Fachkräften 64
4.4 Akzeptanz erhöhen und Öffentlichkeitsarbeit für Erneuerbare verstärken 64
4.5 Technologieentwicklung durch Forschung und Entwicklung 64

Literatur 65

Impressum 68

Präambel

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) wurde vom Bundesumweltministerium Anfang 2010 ermutigt, ein Konzept für ein deutsches Energieversorgungssystem im Jahr 2050 zu formulieren, das auf 100 % erneuerbaren Energien basiert. Das Energiekonzept 2050, erstellt von 7 Mitgliedsinstituten des ForschungsVerbunds, versteht sich als ein Beitrag zum Energiekonzept der Bundesregierung, das im Oktober 2010 verabschiedet werden soll. Es schließt den künftigen Energiebedarf aller Nutzungsbereiche ein: Strom, Wärme und Kraftstoff.

Das vorliegende Energiekonzept soll auch Grundlage sein für ein anschließend zu erarbeitendes Papier des FVEE mit Empfehlungen zum 6. Energieforschungsprogramm, das Anfang 2011 von der Bundesregierung verabschiedet werden soll.

Kapitel 1 stellt das Energiekonzept 2050 vor und zeigt, mit welchen technologischen Komponenten eine Versorgung mit 100 % erneuerbaren Energien nachhaltig, kostengünstig und versorgungssicher möglich ist.
Kapitel 2 erläutert, welche technologischen Transformationsprozesse zur Realisierung des Energiekonzept 2050 notwendig sind.
Kapitel 3 stellt die Bedeutung von Forschung und Entwicklung für diesen Prozess dar.
Kapitel 4 gibt politische Handlungsempfehlungen, die die Transformationsprozesse anstoßen und/oder beschleunigen können.

Begriffsdefinitionen

- **„Erneuerbar“:** Das Energiekonzept 2050 definiert eine Energiequelle als „erneuerbar“ oder „regenerativ“, wenn sie sich entweder kurzfristig von selbst erneuert oder ihre Nutzung nicht zur Erschöpfung der Quelle beiträgt. Man spricht dann von nachhaltig zur Verfügung stehenden Energieressourcen. Diese Definition trifft auf alle direkten Solarenergien zu, auf die indirekten Solarenergien wie Wind, Wasserkraft und Biomasse und auch auf Erdwärme und die Meeresenergien. Kernfusion ist nach dieser Definition keine erneuerbare Energie.
- **„Nachhaltigkeit“**: Der Begriff Nachhaltigkeit wird als Dreiklang von Ökologie, Ökonomie und Sozialverträglichkeit bezeichnet. Er orientiert sich an der Definition der Enquetekommission des Bundestages, Endbericht 2002 „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“, wobei diese mehrheitlich der Ökologiedimension eine gewisse Vorrangstellung einräumte.

Folgende Punkte charakterisieren das Energiekonzept 2050:

- **Optionenvielfalt als Garant für Versorgungszuverlässigkeit:** Das Energiekonzept 2050 beschreibt eine zuverlässige, sichere, kostengünstige und robuste Energieversorgung auf Basis der vielfältigen erneuerbarer Energien. Diese Palette der erneuerbaren Energien, deren Potenziale sehr viel höher sind als der Gesamtenergiebedarf, gewährleistet auch bei geringerem Beitrag oder zeitlichen Ausfall einer Technologie die Bereitstellung von Alternativen, sodass in jedem Fall eine 100 %-Versorgung auf Basis erneuerbarer Energien sichergestellt ist.

- **Energieeffizienz prioritär:** Die Erhöhung der Energieeffizienz wird als strategische Aufgabe höchster Priorität behandelt: Die Institute plädieren für einen starken Ausbau der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), um die Energienutzungseffizienz der erneuerbaren Energiekonversionstechniken zu erhöhen. Die energetische Sanierung des heutigen Gebäudebestands wird bis 2050 im Wesentlichen abgeschlossen sein (siehe Abschnitt 1.3.7).

- **Strom als Hauptstandbein:** Die Stromgewinnung und -nutzung aus erneuerbaren Energien hat im Energiekonzept 2050 eine dominante Stellung.

- **Chemische Energieträger:** Erneuerbarer Strom wird somit zur Primärenergie, indem auch chemische Energieträger (Wasserstoff, Methan) aus ihm gewonnen werden, die besonders für eine Langzeitspeicherung erneuerbarer Energien unter anderem für den Verkehrssektor notwendig sind. Die Herstellung von „erneuerbarem Methan" bedeutet einen Paradigmenwechsel für die Energiespeicherung.

- **E-Mobilität:** Der Verkehr im Energiekonzept 2050 wird weitgehend direkt elektrisch gedeckt oder indirekt, indem Strom zu Wasserstoff oder Methan umgewandelt wird.

- **Regeneratives Kombikraftwerk:** Das Prinzip „Regeneratives Kombikraftwerk" (Abschnitt 1.3.6) wird mit seinem systemtechnischen Zusammenspiel der erneuerbaren Energien und der Energiespeicherung auf ganz Deutschland ausgedehnt.

- **Europäischer Stromverbund:** Der verlustarme Stromtransport über weite Strecken und der Energieausgleich auf europäischer Ebene spielen für die Nutzung der fluktuierenden Energiequellen eine Schlüsselrolle.

- **Rolle der Biomasse:** Die energetische Nutzung der Biomasse wird als eine beschränkte Ressource behandelt. Energiepflanzen sollten mittel- bis langfristig vor allem zur Herstellung von Synthesekraftstoffen wie Kerosin für Flugzeuge und Schiffe sowie zur Produktion von Rohstoffen für die chemische Industrie verwendet werden. Die energetische Verwertung von Biomasse-Reststoffen ergänzt dieses Konzept.

- **Solare Wärme:** Solarthermische Kollektoren liefern im Energiekonzept 2050 einen wichtigen Beitrag zur Trinkwassererwärmung, Raumheizung, Prozesswärme- und Kälteversorgung in einzelnen Gebäuden und für die Nah-/Fernwärme- und -kältesysteme.

- **Hoher Nutzen bei ungefähr gleichbleibenden Kosten:** Das Energiesystem 2050 wird volkswirtschaftlich bei optimaler Auslegung nicht teurer als das gegenwärtige. Dies ergibt sich aus der Verbindung der im Energiekonzept 2050 beschriebenen technologischen Komponenten mit ihren Lern- und Erfahrungseffekten und der Kosten- und Nutzenanalyse (Kapitel 2.5).

Einführung

Erneuerbare Energien haben das größte energetische und technische Potenzial aller bekannten Energiequellen. Sie sind umwelt- und klimafreundlich, global einsetzbar, in wenigen Jahren die kostengünstigsten Energiequellen und sie genießen eine außerordentlich hohe gesellschaftliche Akzeptanz. Die erneuerbaren Energien sind heimische Energiequellen und können die Nutzung von Kohle, Erdöl, Erdgas und nuklearen Energien im Strom- und Wärmemarkt schrittweise reduzieren und langfristig vollständig und dauerhaft ersetzen. Sie reduzieren damit die Abhängigkeit von Energieimporten, erhöhen die Energiewertschöpfung im Land und schaffen Arbeitsplätze.

Technologische Erfolge in Forschung und Entwicklung auf der Grundlage einer energiepolitischen Rahmensetzung, die ein hohes Maß an Investitionssicherheit für die Markteinführung neuer Technologien gewährleistete, haben in den vergangenen zwei Jahrzehnten die Nutzung der erneuerbaren Energien in Deutschland leistungsfähiger und nachhaltiger gemacht. Im Zuge der Transformation des heutigen Energiesystems zu einer nachhaltigen Energiedienstleistungswirtschaft auf der Basis erneuerbarer Energien wird der Strom als zentraler Baustein dieser Wirtschaft immer „grüner“. Damit verbunden ist ein Paradigmenwechsel beim Kraftwerkseinsatz und bei der Markt-, Netz- und Systemintegration der erneuerbaren Energien: weg von der bisherigen Grundlastphilosophie auf der Basis zentraler fossiler und nuklearer Großkraftwerke hin zu einem immer größeren Anteil dezentraler fluktuierender Energien aus erneuerbaren Quellen, die durch eine Vielzahl von Maßnahmen verstetigt werden können: schnell reagierende Gaskraftwerke, zu virtuellen Kraftwerken verbundene Kraft-Wärmekopplungsanlagen, Last- und Erzeugungsmanagement-Verfahren in Verbindung mit intelligenten Netzen (smart grids) und effiziente Speichertechnologien.

In Verbindung mit erneuerbaren Energien gewinnen Effizienztechnologien stark an Bedeutung. Denn die angestrebten hohen Anteile erneuerbarer Energien an der gesamten Energiebereitstellung können nur dann erreicht werden, wenn mittelfristig ein großer Teil der bestehenden technisch-wirtschaftlichen Effizienzpotenziale erschlossen wird. Dazu zählen im Raumwärmebereich der Bau von Niedrigst-, Passiv- oder sogar Plusenergiehäusern.

Im Verkehrsbereich wird die Elektromobilität mittel- und langfristig ein wesentlicher Baustein für eine klimaverträgliche Mobilität werden, wenn der Strom dafür vollständig aus erneuerbaren Energien bereit gestellt wird. Durch eine bidirektionale Einbindung der Fahrzeugbatterien in das Stromnetz können diese zur Erhöhung der Versorgungssicherheit genutzt werden. Ergänzt wird die Elektromobilität durch Wasserstoff und Methangas und daraus abgeleitete Kraftstoffe für Fahr- und Flugzeuge.

Diese Entwicklungen finden statt, da die Politik dem Klimaschutz eine hohe Priorität einräumt. Insbesondere die von der EU und der Bundesregierung vorgegebenen Zielsetzungen und Rahmenbedingungen haben die Chancen für die Entwicklung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienztechnologien erheblich verbessert.

Die konsequente Markteinführungspolitik in Deutschland hat in Verbindung mit einer langfristig angelegten Forschungs- und Entwicklungspolitik in den vergangenen 20 Jahren zu einer rascheren Markt- und Technologieentwicklung geführt als erwartet. Die bemerkenswerten Fortschritte zeigen, dass bei anhaltender Innovationsdynamik schon 2050 in Deutschland ein Energiesystem realisiert werden kann, das zu 100 % auf erneuerbaren Energien und Energieeffizienz basiert.

Beispiele für technologische Weiterentwicklungen der letzten Jahre

- **Energieeffizientes Bauen:** Signifikante Minderung der Bedarfe für Heizen, Kühlen, Belüften und Belichten von Gebäuden mittels Effizienzsteigerung der Bau- und Anlagentechnik (Niedrigenergie-, 3-Liter- und Passivhaus).

- **Kraft-Wärme-Kopplung:** Erhöhung der Bereitstellungs- und Nutzungseffizienzen durch Kombinationsmöglichkeiten erneuerbarer Energietechniken mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) oder mit Wärmepumpen.

- **Photovoltaik:** Stetige Kostenreduktion um durchschnittlich 7 % pro Jahr in den vergangenen 10 Jahren durch Erhöhung der Wirkungsgrade, effizienteren Materialeinsatz und neue Produktionstechnologien [1].

- **Solarthermische Kraftwerke:** Entwicklung und Bau solarthermischer Kraftwerke mit großen Energiespeichern [2].

- **Elektromobilität:** Entwicklung der Elektromobilität und der damit verbundenen Chance, erneuerbare Energien auch im Verkehr effizient nutzen zu können.

- **Biomasse:** Entwicklung von Polygenerationverfahren zur energetischen Nutzung von Biomasse, um Strom, Wärme, Kälte und Kraftstoff zu erzeugen.

- **Wasserstoff:** Wasserstofferzeugung durch Hochtemperaturelektrolyse mit Wirkungsgraden von bis zu 80% [3].

- **Brennstoffzellen:** Brennstoffzellen werden in großangelegten Feldtests für den Einsatz in der Gebäudeenergieversorgung, im Individualverkehr und im öffentlichem Nahverkehr erprobt.

- **Erneuerbares Methan:** Neue Konversionstechnologie, um aus erneuerbarem Strom und CO_2 erneuerbares Methangas zu erzeugen. Damit kann das Erdgasnetz unmittelbar als großer Speicher für erneuerbare Energien genutzt werden. (siehe Abschnitt 1.2.3.3).

- **Regeneratives Kombikraftwerk:** Die Entwicklung regenerativer Kombikraftwerke für das koordinierte Zusammenspiel verschiedener EE-Technologien

- **Offshore Windkraftanlagen:** Die Entwicklung der Offshore-Windenergienutzung mit einer neuen Anlagengeneration und verbesserte Windleistungsprognosen auf der Basis energiemeteorologischer Methoden

- **Netzintegration:** Entwicklung von Wechselrichtern, die zunehmend Systemdienstleistungen zur Netzstabilisierung übernehmen. Präzise Prognoseverfahren für die Leistungsvorhersage von Wind- und Solarkraftwerken.

- **Smart Grids:** Entwicklung von smart grids in Verbindung mit smart metering: Intelligente Verteilnetze für Strom in Verbindung mit zeitvariablen Tarifen für das Lastmanagement [4].

- **Solare Wärme und Kälte:** Erhöhung der Effizienz der solarthermischen Kollektoren und Systeme für Raumheizungsunterstützung, Entwicklung von Prozesswärmeanwendungen und solarthermischer Kühlung.

- **Das Solaraktivhaus:** Entwicklung des Solaraktivhauses, das zu 50 bis 100 % mit thermischen Solarkollektoren beheizt wird [5])

Die Erfolge der innovativen Technologieentwicklung haben dazu beigetragen, dass sich die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung, der EU-Mitgliedsstaaten und der EU-Kommission stetig weiterentwickelt haben.

Beispiele für ökonomische und politische Weiterentwicklungen der letzten Jahre

- Wie oben ausgeführt gab es raschere Kostensenkungen und raschere Markteinführung bei erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung als erwartet.
- Erlass der EU-Richtlinie mit dem 20-20-20-Ziel, die es ökonomisch sinnvoll macht, an einen europäischen Stromverbund zu denken.
- Die gesellschaftliche Akzeptanz der erneuerbaren Energien hat sich rasch und positiv weiterentwickelt. Umfrageergebnisse zeigen eine Zustimmung von 80 bis 90 %.
- Das EEG ist in Deutschland durch ein Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) ergänzt worden.
- Das BMU hat gegenwärtig das Ziel gesetzt, die Energieversorgung in Deutschland bis 2050 vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen.
- Das BMWi hat das Ziel gesetzt, ausgehend vom Emissionsniveau 1990 die CO_2-Emissionen bis 2050 um 80 – 95 % zu senken.

Gemeinsamkeiten und Abgrenzung zu gegenwärtig vorliegenden Energieszenarien und Stellungnahmen

a) WBGU-Gutachten

Die Skizze der Funktionsweise des Energieversorgungssystems 2050 (siehe Kap. 1.3) ähnelt in seiner Grundstruktur dem in Arbeit befindlichen WBGU-Gutachten „Transformation“ [6]. In dem WBGU-Gutachten 2008 „Welt im Wandel – Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“ [7] werden die primärenergetischen Einsparmöglichkeiten beim Übergang auf eine Energieversorgung mit erneuerbaren Energien eindrucksvoll dargestellt. Daher stand diese Publikation, deren technische Seite vom Fraunhofer IWES (Schmid, Sterner) abgedeckt wurde, Pate bei den Abbildungen zur Transformation des Energiesystems von heute zu dem von 2050. Außerdem wird im Energiekonzept 2050 auf die Ambivalenz der energetischen Biomassenutzung Bezug genommen, wie sie auch im WBGU-Gutachten 2008 diskutiert wird: Einerseits existiert ein signifikantes nachhaltiges Potenzial der Bioenergie, andererseits sind Risiken für Ernährungssicherheit, biologische Vielfalt und Klimaschutz nicht zu übersehen.

b) DLR-Leitszenarios 2008 und 2009

Das Energiekonzept 2050 steht in einem produktiven Zusammenhang mit den Leitstudien 2008 und 2009 des BMU [8], [9] und mit Vorarbeiten des DLR und des Fraunhofer IWES zum Leitszenario 2010. Diese Szenarien bilden für viele Aussagen des Energiekonzepts 2050 zur Transformation (Kap. 2) und vor allem für die ökonomischen Betrachtungen (Kap. 2.5) eine systemanalytische Basis. Bis zum Jahr 2020 sind die Papiere in ihren wichtigsten Aussagen sehr ähnlich. Auf folgende Unterschiede sollte aber hingewiesen werden:

- Das Energiekonzept 2050 berücksichtigt die Bitte des BMU, ein Konzept für eine Energieversorgung mit 100 % erneuerbaren Energien bis 2050 zu entwerfen. Die zuletzt veröffentlichte Leitstudie 2009 hatte hingegen nur 50% erneuerbare Energien als Zielmarke für das Jahr 2050, aber in dem gegenwärtig erarbeiteten Leitszenario 2010 werden erstmals ebenfalls zwei 100 %-Ziele analysiert: eine Variante mit Wasserstoff und eine Variante mit Methangas als Langzeitspeicher.
- Das Leitszenario 2009 konnte noch nicht die neuen Potenziale der erneuerbaren Energien – wie oben aufgezählt – und den starken PV-Ausbau berücksichtigen.
- Im Unterschied zu den Leitszenarios berücksichtigt das Energiekonzept 2050 nicht die kurzfristigen realpolitischen Implikationen, sondern sieht seine Aufgabe darin, auf der Basis neuer technologischer Erkenntnisse ein schlüssiges Energiesystem 2050 zu entwerfen und die damit verbundenen energie- und forschungspolitischen Voraussetzungen zu benennen.

c) SRU-Stellungnahme vom Mai 2010

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) hat unter dem Titel „100 % erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar“ [10] eine Stellungnahme veröffentlicht, die im Strombereich mit den Vorstellungen der Autorengruppe im FVEE in großen Teilen übereinstimmt. Allerdings erwartet das Energiekonzept 2050 einen höheren Strombedarf, da es den breiten Einsatz von Wärmepumpen und die Elektromobilität mit einbezieht. Da viele Aussagen in der SRU-Stellungnahme systemanalytisch detaillierter dargestellt sind, nimmt das Konzept im Einvernehmen mit dem SRU und mit den Kollegen des DLR in einigen Abschnitten Bezug auf diese Stellungnahme.

d) WWF-Studie vom Oktober 2009

Die Studie „Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050. Vom Ziel her denken“ [11] ist eine alle Energiebedarfssektoren umfassende Studie. Sie ist mit dem Energiekonzept 2050 verwandt, indem Sie ebenfalls von der Fragestellung ausgeht, wie 2050 eine Energieversorgung aussehen könnte, die vollständig auf erneuerbaren Energien basiert.

Das Energiekonzept orientiert sich bei der Berechnung des Mengengerüsts für den Energiebedarf 2050 vor allem an dem in der WWF-Studie analysierten Energiebedarf im Verkehrssektor. Allerdings besteht der Unterschied darin, dass das Energiekonzept 2050 so weit wie möglich auf den Einsatz von Biomasse zur Nutzung als Kraftstoff verzichtet.

Executive Summary

Die Begrenzung des Temperaturanstiegs auf maximal 2 °C erfordert die Reduktion der energiebedingten Kohlendioxidemissionen in der Europäischen Union und Deutschlands um mindestens 90 % und damit den vollständigen Umbau des gesamten Energiesystems.
Die Zielerreichung ist über verschiedene Technologiepfade möglich.

In diesem Energiekonzept wird ein Energieszenario vorgestellt, das auf einer wesentlich effizienteren Nutzung der Energieressourcen und der vollständigen Deckung des Restenergiebedarfs mit erneuerbaren Energien beruht. Das Szenario weist viele Vorteile auf: es stehen ausreichende Potenziale in Deutschland, Europa und im benachbarten Ausland zur Verfügung, die Betriebsrisiken der erneuerbaren Energien-Technologien sind gering und das Szenario ist nachhaltig, da die erneuerbaren Energien dauerhaft zur Verfügung stehen.

Im Folgenden wird gezeigt, wie ein solches auf 100% erneuerbare Energien basierendes Energieversorgungs-, -verteilungs- und -nutzungssystem im Jahre 2050 aussehen und funktionieren kann, wie ein hohes Maß an Versorgungssicherheit gewährleistet wird und dass ein solches System kostengünstig ist.

Die Realisierung des Energiekonzeptes 2050 erfordert die Transformation des Energiesystems von einer zentralen, lastoptimierten hin zu einer dezentralen, intelligenten, last- und angebotsorientierten Energieversorgungsstruktur. Ergänzt wird die dezentrale Erzeugung durch den Aufbau eines Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetzes (HGÜ) in Europa und Nordafrika. Die Netze benötigen eine intelligente Steuerung, die den regionalen und den europaweiten Ausgleich von Energiebedarf und -angebot (Smart Grid) ermöglicht.

Wesentliches Element des Energiekonzeptes ist eine deutliche Erhöhung der Energieeffizienz durch Reduzierung des Energiebedarfs, z. B. durch sehr gute Wärmedämmung und durch die effiziente Umwandlung und Nutzung der Energie, z. B. durch Einsatz von Elektro- statt Verbrennungsmotoren oder durch die Wärmenutzung in Kraft-Wärme-Kopplung.

Um ein möglichst robustes Energieversorgungssystem zu gestalten, besteht dieses aus einem Mix aller erneuerbarer Energien, also Wind- und Wasserkraft, Photovoltaik, Solarthermischen Kraftwerken (im Süden Europas und Nordafrika), solarthermischer Wärmeerzeugung, Biomasse-Reststoffnutzung, Geothermie und Wellenenergie. In Deutschland und Europa sind die Potenziale an erneuerbaren Energien deutlich höher als der Energiebedarf, allerdings weisen Sonnenenergie und Wind die größten Potenziale auf. Biomasse wird vor allem stofflich verwertet werden und wird im Energiekonzept nur in geringem Umfang energetisch genutzt, vor allem in Form von Biomasse-Reststoffen aufgrund der begrenzten Ressourcen und der vorhandenen Nutzungskonkurrenz mit der Nahrungsmittelerzeugung.

Strom ist als universell einsetzbarer und leicht transportierbarer Energieträger ein Hauptpfeiler der künftigen Energieversorgung, da neue Stromanwendungen wie die Elektromobilität hinzukommen und gleichzeitig der Wärmebedarf durch Effizienzmaßnahmen deutlich verringert wird. Die Stromerzeugung erfolgt im Energiekonzept 2050 vor allem mit Wind und Photovoltaik. Hinzu kommen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die mit Biogas angetrieben werden sowie mit Methan oder Wasserstoff, die mit erneuerbaren Energien erzeugt werden.

Der Wärmebedarf wird durch Effizienzmaßnahmen deutlich reduziert, was die flächendeckende wärmetechnische Sanierung des gesamten Gebäudebestands bis 2050 voraussetzt. Der Restbedarf wird mit solarthermischen Anlagen, Wärmepumpen mit erneuerbarem Strom und aus Kraft-Wärmekopplung bereitgestellt. Der Bedarf an Kälte wird klimabedingt zunehmen, die Kälteversorgung erfolgt in Städten zunehmend über Kältenetze.

Mobilität ist im Jahr 2050 vor allem Elektromobilität, da Elektromotoren sehr effizient sind und damit den Primärenergieeinsatz bei Nutzung von erneuerbaren Energien-Strom etwa auf ein Viertel senken. Biokraftstoffe, die nur begrenzt zur Verfügung stehen, werden vor allem im Langstrecken- und Güterverkehr und in der Luftfahrt eingesetzt werden. Eine Alternative zu Biokraftstoffen stellen erneuerbare Kraftstoffe aus Wind- und Solarenergie dar. Die Elektromobilität stellt darüber hinaus dem Gesamtenergiesystem Speicherkapazitäten zur Verfügung.

Der Aufbau und die Integration von großen Speicherkapazitäten in das Energieversorgungssystem ist Grundvoraussetzung für einen großen Anteil fluktuierender Energiequellen. Dabei werden die Speicherkapazitäten durch einen Mix verschiedener erneuerbarer Energien, einen europäischen Ausgleich von zeitweiligen regionalen Über- und Unterkapazitäten sowie durch eine intelligente Steuerung von Angebot und Nachfrage möglichst niedrig gehalten. Für den verbleibenden Speicherbedarf stehen verschiedene Stromspeicher zur Verfügung. Elektrochemische Stromspeicher gleichen vor allem kurzfristige Schwankungen aus. Die mittel- bis langfristige Energiespeicherung erfolgt chemisch, entweder mittels Wasserstoff oder synthetischem Methan, die beide mit erneuerbaren Energien erzeugt werden. Wärmespeicher werden als Kurz-, Mittel und als saisonale Speicher eingesetzt. Sie werden in einzelnen Gebäuden installiert und als Großspeicher in Wärme- und Kältenetze integriert und ermöglichen die vollständige regenerative Wärmeversorgung und die Wärmenutzung aus der Wärmekraftkopplung. Die heutigen Wasserspeicher werden künftig durch Latentspeicher und chemische Speicher ergänzt.

Als Speichermedium wird auch synthetisches Methan genutzt, das mit erneuerbaren Energien aus Wasserstoff und CO_2 hergestellt wird. Dieses ermöglicht die Speicherung von zum Zeitpunkt der Erzeugung nicht benötigtem erneuerbarem Strom und kann eingesetzt werden als Kraftstoff, bei der Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und zur Bereitstellung hoher Temperaturen. Synthetisches Methan ist ein Austauschgas für Erdgas, kann in der Transformationsphase mit Erdgas gemischt werden und ermöglicht die Nutzung der vorhandenen Gasinfrastruktur wie Gasnetze und -speicher.

Die ökonomischen Berechnungen zeigen, dass die Transformation des Energiesystems in der kommenden Dekade zu Mehrkosten führt, ab 2030 aber günstiger ist als das fossil-nukleare Vergleichssystems.

Kernaussagen des Energiekonzepts 2050

1. **100% Erneuerbare sind möglich:** Die Technologien zur Nutzung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz haben sich rascher entwickelt als erwartet. Die bemerkenswerten Fortschritte zeigen, dass bei anhaltender Innovationsdynamik schon 2050 in Deutschland ein Energiesystem realisiert werden kann, das zu 100 % auf erneuerbaren Energien basiert.

2. **Optionenvielfalt als Garant für Versorgungszuverlässigkeit:** Das Energiekonzept 2050 beschreibt eine zuverlässige, sichere, kostengünstige und robuste Energieversorgung auf Basis der vielfältigen erneuerbarer Energien. Diese Palette der erneuerbaren Energien, deren Potenziale sehr viel höher sind als der Gesamtenergiebedarf, gewährleistet auch bei geringerem Beitrag oder gar „Ausfall" einer Technologie die Bereitstellung von Alternativen, sodass in jedem Fall eine 100 %-Versorgung auf Basis erneuerbarer Energien sichergestellt ist.

3. **Energieeffizienz prioritär:** Die Erhöhung der Energieeffizienz wird als strategische Aufgabe höchster Priorität behandelt: Die Institute plädieren für einen starken Ausbau der dezentralen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), um die Energienutzungseffizienz der erneuerbaren Energiekonversionstechniken zu erhöhen – begleitet von der Notwendigkeit, Anreizmaßnahmen für solche Systeme in Verbindung mit Nahwärmesystemen weiter zu entwickeln. Die energetische Sanierung des heutigen Gebäudebestands wird bis 2050 im Wesentlichen abgeschlossen sein.

4. **Strom als Hauptstandbein:** Die Stromgewinnung und -nutzung aus erneuerbaren Energien hat im Energiekonzept 2050 eine dominante Stellung.

5. **Europäischer Stromverbund:** Der verlustarme Stromtransport über weite Strecken mit HGÜ und der Energieausgleich auf europäischer Ebene spielen für die Nutzung der fluktuierenden Energiequellen eine Schlüsselrolle. Dieser weiträumige Ausgleich durch eine europäische Stromvernetzung verstetigt das Angebot an erneuerbarer Energie. Mit Energiespeichern wird außerdem das fluktuierende Angebot an Wind- und Solarenergie der jeweiligen Nachfrage angepasst. Erneuerbarer Strom wird somit zur Primärenergie, indem auch chemische Energieträger (Wasserstoff, Methan) aus ihm gewonnen werden.

6. **Chemische Energieträger:** Für die Überbrückung längerer Phasen mit zu geringem Angebot können in Überangebotszeiten diese chemischen Energieträger in Langzeitspeichern saisonal verfügbar gemacht werden, die unter anderem auch für den Verkehrssektor notwendig sind. Die Herstellung von „erneuerbarem (synthetischem) Methan" bedeutet einen Paradigmenwechsel für die Energiespeicherung.

7. **E-Mobilität:** Der Verkehr im Energiekonzept 2050 wird weitgehend direkt elektrisch gedeckt oder indirekt, indem Strom zu Wasserstoff oder Methan umgewandelt wird.

8. **Regeneratives Kombikraftwerk:** Das Prinzip „Regeneratives Kombikraftwerk“ wird mit seinem systemtechnischen Zusammenspiel der erneuerbaren Energien und der Energiespeicherung auf ganz Deutschland ausgedehnt.

9. **Systemkonflikte vermeiden:** Die heutigen Großkraftwerke sind ungeeignet, fluktuierende Ströme aus erneuerbaren Energien auszugleichen, denn sie können die dafür erforderlichen großen Leistungsänderungen nicht abbilden. Wenn die Vorrangigkeit der Einspeisung erneuerbarer Energien erhalten bleibt, dann werden herkömmliche Grundlastkraftwerke zunehmend ungeeignet, die Residuallast aufzubringen. Das bedeutet nicht nur, dass dann weder Kernkraftwerke, noch Fusionskraftwerke, noch Kohlekraftwerke eingesetzt werden können, sondern auch, dass die gegenwärtigen Ansätze der CO_2-Abscheidung und Speicherung bei der Kohleverstromung (CCS) nicht nur aus rein wirtschaftlichen sondern auch aus systemischen Gründen in eine verkehrte Richtung führen.

10. **Rolle der Biomasse:** Die energetische Nutzung der Biomasse wird als eine beschränkte Ressource behandelt, die die Entwicklung von stofflichen und energetischen Nutzungskaskaden erfordert. Energiepflanzen sollten mittel- bis langfristig vor allem zur Herstellung von Synthesekraftstoffen wie Kerosin für Flugzeuge und Schiffe sowie zur Produktion von Rohstoffen für die chemische Industrie verwendet werden. Die energetische Verwertung von Biomasse-Reststoffen ergänzt dieses Konzept.

11. **Solare Wärme:** Solarthermische Kollektoren liefern im Energiekonzept 2050 einen wichtigen Beitrag zur Trinkwassererwärmung, Raumheizung, Prozesswärme- und Kälteversorgung in einzelnen Gebäuden und für die Nah-/Fernwärme- und -kältesysteme.

12. **Kosten und Nutzen:** Das Energiesystem 2050 wird volkswirtschaftlich bei optimaler Auslegung zumindest nicht teurer als das gegenwärtige. Dies ergibt sich aus der Verbindung der im Energiekonzept 2050 beschriebenen technologischen Komponenten mit ihren Lern- und Erfahrungseffekten und der Kosten- und Nutzenanalyse:

    - Der Ausbau der erneuerbaren Energien verursacht zunächst Mehrkosten sowohl in der Strom- und Wärmeerzeugung als auch im Verkehrssektor. Bei einer jahresspezifischen Betrachtung wird das Maximum der Mehrkosten aber bereits im Jahr 2015 mit einer Summe von rund 17 Mrd. Euro erreicht. Dies entspricht lediglich ca. 8 % der Gesamtausgaben für Energie in Deutschland, die sich gemäß der monetären Bewertung des Endenergieverbrauchs auf 212 Mrd. €/a belaufen. Das Argument, wonach erneuerbare Energien erhebliche Kostensteigerungen des Energiesystems verursachen würden, ist mit diesem Vergleich zu entkräften.
    - Bei der Betrachtung der Differenzkosten der erneuerbaren Energien aus allen drei Sektoren wird deutlich, dass die Transformation in ein vollständig auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem bis zum Jahr 2050 auch aus ökonomischer Sicht vorteilhaft ist. Im Zeitraum 2010 bis 2050 können allein in den Sektoren Strom und Wärme Kosten von insgesamt 730 Mrd. Euro eingespart werden.

13. **Forschungsförderung:** Die Verteilung der öffentlichen Ausgaben für Forschung und Entwicklung auf die verschiedenen Energietechnologien müssen sich an ihrer langfristigen Bedeutung orientieren. Entsprechend der Zielsetzung der Regierungskoalition und dem vorgestellten Energiekonzept ist deshalb bei der Forschungsförderung die Priorität auf die erneuerbaren Energien und Energieeffizienz zu legen. Forschung und Entwicklung ist auch als Maßnahme der Industriepolitik zu begreifen. Denn nur dort, wo deutsche Produzenten im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz weltweit technologisch führend sind, besteht die Chance, die Produktion von Komponenten des neuen Energieversorgungssystems in Deutschland zu halten.

1. Das Energiesystem 2050 auf Basis erneuerbarer Energien

1.1 Entwicklung des Weltenergiebedarfs

Um die Erderwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen, sind die energiebedingten Kohlendioxidemissionen in Europa um mindestens 80 – 95 % bis zum Jahr 2050 zu reduzieren. Dies macht einen massiven Umbau der globalen Energiesysteme notwendig. Alle Weltenergieszenarien gehen grundsätzlich davon aus, dass vor allem die regenerativen Energien ausgebaut werden müssen. Aufgrund des deutlichen Anstiegs der Weltbevölkerung sowie des Wohlstandswachstums in den Entwicklungs- und Schwellenländern wird die weltweite Energienachfrage vor allem im Strombereich deutlich ansteigen. In *Abbildung 1* ist auf Basis einer IEA-Prognose der weltweite Gesamtenergiebedarf bis 2030 in Megatonnen Öl-Äquivalenten dargestellt (gepunktete Linie). Erstaunlicherweise geht die IEA allerdings davon aus, dass vor allem die endlichen fossilen und nuklearen Energiequellen diesen zunehmenden Energiebedarf decken werden. Dies ist aber wegen der weltweiten Klimaschutzziele nicht möglich, weshalb dieses Szenario als höchst unwahrscheinlich betrachtet werden muss.

Im Gegensatz dazu wird im Energiekonzept 2050 gezeigt, wie der ansteigende Bedarf an Energiedienstleistungen durch die konsequente Anwendung von effizienzsteigernden Maßnahmen nicht zu einer weiteren Erhöhung des Primärenergiebedarfs führen muss und dass die erneuerbaren Energien diesen Bedarf bei fortgesetztem Wachstum bis zur Mitte des Jahnhunderts vollständig abdecken können.

Für die Energieversorgung Deutschlands bedeutet dies, dass der Primärenergiebedarf für die Stromversorgung bei vollständiger Substitution der konventionellen Kraftwerke durch Wind-, Solar- und Wasserkraftwerke auf rund ein Drittel des heutigen Werts gesenkt werden kann. Denn jede Kilowattstunde Strom aus diesen erneuerbaren Quellen substituiert rund die dreifache Menge der ansonsten erforderlichen Primärenergie [13]. Beispielsweise können die Abwärmeverluste bei der Stromerzeugung, die bei Kohle- und Kernkraftwerken rund 2/3 des Primärenergetischen Aufwands verursachen, bei Einsatz von Wind-und Solarkraftwerken vermieden werden.

Im industriellen Bereich wird vor allem thermische Energie auf unterschiedlichen Temperatur-

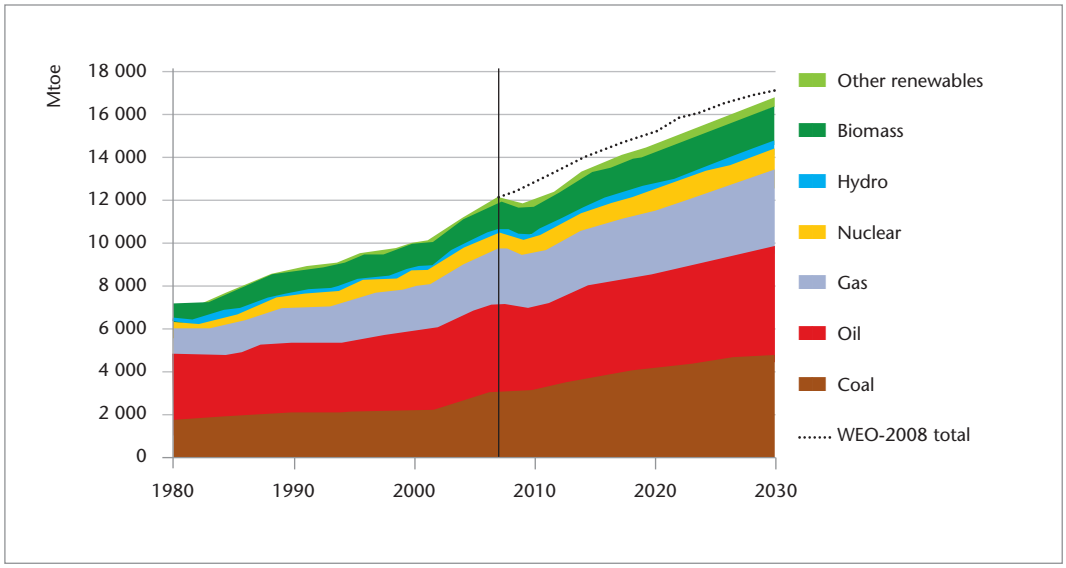
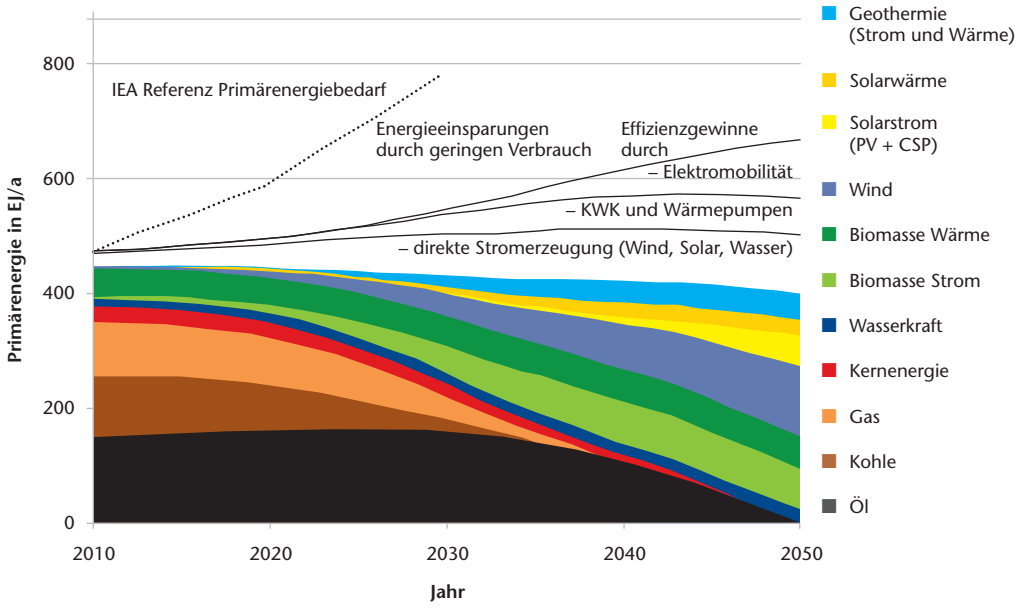


Abbildung 1
Prognose des Wachstums des globalen Energiebedarfs bis 2030 (IEA) und Annahme über mögliche Energiequellen zur Bedarfsdeckung [12] (12.000 Mtoe = etwa 500 EJ)

Abbildung 2
Globales Szenario 100 % erneuerbare Energien: Weltweiter Primärenergiebedarf bis 2050 nach der Wirkungsgradmethode. Energieeinsparungen ergeben sich vor allem im Gebäudebereich.

PV = Photovoltaik; CSP = concentrated solar power – solarthermische Stromerzeugung).

Quelle: Fraunhofer IWES (Schmid, Sterner, 2010).



Quelle: Fraunhofer IWES (Schmid, Sterner, 2010).

niveaus benötigt. Durch die konsequente Nutzung von Abwärme durch thermische Speicher und Wärmepumpen mit hoher Jahresarbeitszahl wird ein Teil des Primärenergiebedarfs vermieden. Energiespeicher sind in der Lage, die Leistungsspitzen bei industriellen Prozessen abzufangen. Prozesswärme mit Temperaturen bis 250 °C kann anteilig auch solarthermisch bereitgestellt werden.

Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für ein Szenario zur Deckung des globalen Primärenergiebedarfs bis 2050 mit 100 % erneuerbaren Energien nach der Wirkungsgradmethode[1] und basiert auf den folgenden Annahmen: Ziel ist es, einen mit dem 2 °C-Limit konformen Dekarbonisierungspfad auf Basis erneuerbarer Energien ohne die Nutzung von Kernenergie und CCS zu entwickeln. Der Wärme- und Kältebedarf wird durch Effizienzmaßnahmen um 1% p.a. gesenkt und das Wachstum des Verkehrsaufkommens und des Strombedarfs durch Effizienzmaßnahmen auf 1% p.a. begrenzt. Insgesamt steigt somit der Primärenergiebedarf bis 2050 auf nicht mehr als 700 EJ p.a. an. Die historischen Zuwachsraten der erneuerbaren Energien (bis zu 20 % p.a.) werden je nach Technologie maximal 20 Jahre fortgesetzt. Der Ausbau für Technologien mit sehr großen Ressourcen (Wind, Solar) wird in Sättigung geführt bzw. für Technologien mit begrenzten Ressourcen (Bioenergie, Wasserkraft) auf Null zurückgeführt und dadurch auf ihr maximal nachhaltiges Potenzial begrenzt. Der Ausbau von Biomasse ist auf ein nachhaltiges Potenzial von 150 EJ begrenzt und wird 2050 ausschließlich in der effizientesten Anwendung für Bioenergie verwendet, in der Kraft-Wärme-Kopplung. Zudem wird die traditionelle Biomassenutzung in Entwicklungsländern durch moderne EE-Technologien abgelöst [7]. Die Wasserkraft wird nur geringfügig ausgebaut. Der schwierigste Sektor in der Dekarbonisierung ist der Verkehrssektor, der noch eine sehr hohe Abhängigkeit von Erdöl aufweist. Auf Biokraftstoffe wird aus Gründen der Effizienz und der Nachhaltigkeit verzichtet [7]. Dafür erfolgt die Einführung von Elektro-

1 Für die primärenergetische Bilanzierung von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen kommen die Wirkungsgradmethode und die Substitutionsmethode in Betracht. Für fossile Energieträger dient als Umrechnungsfaktor der Heizwert, der ein Maß für den nutzbaren Energieinhalt eines Brennstoffes ist. Danach wäre 1 kWh elektrischer Energie, die in einem konventionellen Kohlekraftwerk mit einem Wirkungsgrad von h = 40 % bereitgestellt wird, mit dem Faktor 1/h = 2,5 zu multiplizieren und primärenergetisch mit 2,5 kWh zu bewerten. Bei der Wirkungsgradmethode gilt für 1 kWh elektrischer Energie, die mittels Wasserkraft, Windenergie oder Photovoltaik bereitgestellt wird, ein Anlagenwirkungsgrad von 100 %; diese Energie wird also primärenergetisch mit 1 kWh bewertet. Bei einem Kernkraftwerk mit einem typischen Wirkungsgrad von 33 % wäre 1 kWh elektrischer Energie indes mit 3 kWh Primärenergie zu bewerten.

mobilität sehr rasch und die Nutzung von erneuerbare Kraftstoffen aus Wind- und Solarüberschüssen für spezielle Verkehrsegmente (Fahrzeuge für Langstrecken, Flug, Schiff, etc.) ebenfalls. 2050 werden zwei Drittel des Energiebedarfs im Verkehr rein elektrisch gedeckt, das restliche Drittel wird durch erneuerbare Wind- und Solar-Kraftstoffe gedeckt (Wasserstoff, Methan oder andere regenerativ erzeugte Kombinationen aus H_2 und regenerativem CO_2).

Die Einsparungen bzw. Effizienzgewinne in *Abbildung 2* resultieren aus:

- vermiedener Abwärme in der Stromerzeugung durch die erneuerbare Direkterzeugung (Wind, Solar, Wasserkraft)
- effizienten Antriebskonzepten der Elektromobilität und Ausbau des ÖPNV
- Nutzung der Umgebungswärme über elektrische Wärmepumpen
- Nutzung der Abwärme in der Stromerzeugung durch Ersatz von Kraftwerkskapazitäten durch Kraft-Wärme-Kopplungs-Kapazitäten
- Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen, insbesondere im Wärmebereich (Dämmung, etc.)

1.2 Die technologischen Komponenten des Energiesystems 2050 und ihre Energiepotenziale

Die technologischen Komponenten der angestrebten nachhaltigen Energieversorgung auf der Basis erneuerbarer Energiequellen werden sich aus ökonomischen Gründen in Zukunft nicht mehr nach dem bisherigen Systemschema in Strom, Wärme und Kraftstoffe aufspalten. Stattdessen werden sie in zunehmendem Maße Systemgrenzen überschreiten. Je nach Systemtechnik und -lösung werden die zur Verfügung stehenden Quellen in die nachgefragten Energieformen umgewandelt: aus Strom wird Wärme oder Kraftstoff, aus Wärme wird Strom erzeugt und aus Kraftstoff wird Strom und Wärme entstehen. Wann welche Konversion zum Tragen kommt, wird von den angeforderten Systemlösungen und ökonomischen Rahmenbedingungen abhängen.

1.2.1. Energieeffizienztechnologien

Der Steigerung der Energieeffizienz bei der Primärenergienutzung kommt eine entscheidende Rolle zu, weil auf diese Weise der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden kann, ohne industrielle Aktivitäten zu reduzieren oder auf Komfort z. B. im Wohnbereich verzichten zu müssen.

Ein Beispiel für solch eine Effizienztechnologie ist die Wärmepumpe, die in Verbindung mit erneuerbarem Strom die Möglichkeit bietet, Gebäude nachhaltig mit Wärme zu versorgen. Ein weiteres Beispiel ist die Elektromobilität, die eine effiziente und im Betrieb emissionsfreie Alternative für den Individualverkehr sein kann.

Auch wenn die technischen Energiepotenziale der erneuerbaren Energien ein Vielfaches des Energiebedarfs betragen und daher ein sparsamer Verbrauch nicht erforderlich zu sein scheint, sind doch die Konversionstechnologien mit Kosten verbunden. Die Reduktion des Energiebedarfs hat aber nicht nur aus ökonomischen Gründen Priorität, sondern auch, weil insbesondere im Gebäudebereich ein geringerer Energiebedarf Vorteile für den Einsatz erneuerbarer Energieträger bringt [15].

1.2.2. Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien

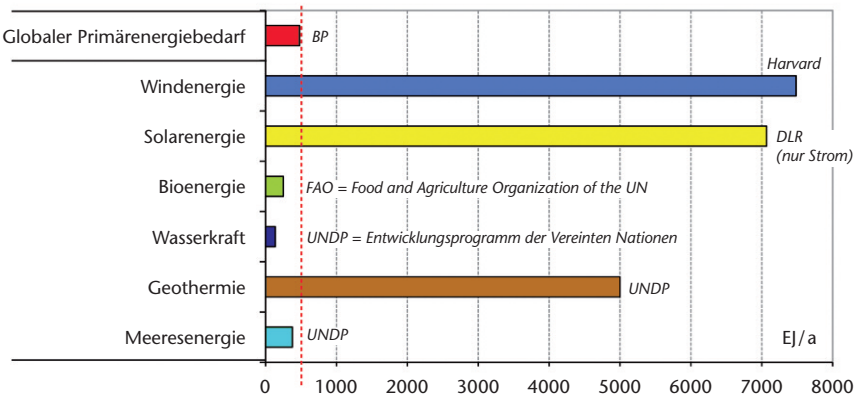
Dem heutigen globalen Primärenergiebedarf stehen mit den erneuerbaren Energien ausreichende Potenziale gegenüber *(Abb. 3)*. Rein mengenmäßig könnten Sonne und Wind den Bedarf sogar jeweils allein decken, sie weisen jedoch eine hohe raumzeitliche Variabilität auf, d. h., sie fluktuieren lokal teilweise stark und stehen geographisch nicht überall ausreichend zur Verfügung. Aufgabe von Forschung und Entwicklung ist die technische und ökonomische Wegbereitung zur Erschließung aller erneuerbaren Energiequellen, vor allem auch mit dem Ziel der Kostensenkung, sowie deren Integration in die Energieversorgungsstrukturen und die Transformation der Energiesysteme.

Ein robustes Energiesystem 2050 soll eine weitgehende Deckungsfähigkeit der einzelnen erneuerbaren Energiepotenziale untereinander gewährleisten. Daher ist es erforderlich, dass die Summe der einzelnen Anteile des erneuerbaren

Abbildung 3
Weltweites technisches Potenzial erneuerbarer Energien (Primärenergie nach Substitutionsmethode[2]).

Legende: BP – British Petrol, Harvard – Harvard University, DLR – Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, UNDP – Entwicklungsprogramm der Vereinten Nationen

(Quellen: s. Grafiklegende und [18–22])



Alle dargestellten technischen Potenziale beziehen sich mit Ausnahme der Bioenergie und der Geothermie nur auf die Stromerzeugung. Daher wird die Solarenergie etwas geringer eingestuft als die Windenergie, da die Potenziale für Windenergie in den letzten Jahren in verschiedenen Studien kontinuierlich nach oben korrigiert wurden (aufgrund höherer Nabenhöhen, größerer Rotordurchmesser und vor allem breiterer Küstenstreifen für Offshore). Das Potenzial der Bioenergie (vor allem Energiepflanzen) wurde aufgrund der Annahme von zunehmenden Nutzungskonkurrenzen (Nahrungs- und Futtermittel, stoffliche Nutzung) reduziert.[3]

Energiemixes mehr als 100 % beträgt. Die energetischen und technischen Potenziale für Deutschland und Europa sind dafür groß genug. Das Energiesystem 2050 kann auf dieser Basis robust und zuverlässig sein, Störungen und Ausfälle fluktuierender Energien kompensieren und eine vollständige Energieversorgungssicherheit gewährleisten.

Strom, Wärme und Kraftstoffe werden mit Hilfe verschiedener technologischer Optionen gewonnen, die sich wie beispielhaft in *Tabelle 1* dargestellt untereinander ergänzen und substituieren können.

1.2.3 Energiespeichertechnologien

Während fossile und nukleare Energien in gespeicherter Form vorliegen und somit im Rahmen der bereitgestellten Kapazitäten jederzeit zeitlich flexibel zur Deckung des schwankenden Energiebedarfs zur Verfügung stehen, ist ein erneuerbares System bis auf Biomasse und Geothermie weitgehend von den meteorologischen und geografischen Gegebenheiten abhängig.

Ein weiträumiger Ausgleich von erneuerbarer Energieerzeugung durch eine Vernetzung verstetigt das Angebot an erneuerbarer Energie und durch Lastmanagement können die Zeiten des Energiebedarfs mit den Zeiten des Energieangebots überein gebracht werden. Jedoch besteht beispielsweise im Stromsektor selbst bei idealem Ausgleich durch Stromübertragung in ganz Europa und durch Lastmanagement noch ein Restbedarf an Speichern [23].

1.2.3.1 Speichertechnologien für Strom

Der Bedarf an Stromspeichern für eine 100 % erneuerbare Energieversorgung liegt deutlich über der heute verfügbaren Speicherkapazität. In Deutschland kann es in den Wintermonaten zu Zeiten mit sehr geringem Angebot an erneuerbaren Energien kommen (wenig Solarenergie, Windflauten durch ein europaweites sibirisches Hoch) [23].

Auch die Elektromobilität übernimmt in einem 100%-Erneuerbare-Szenario Speicherfunktion, aber sie kann den Bedarf selbst theoretisch nur zu einem kleinen Teil erbringen: Würden alle

2 Die Substitutionsmethode wertet Strom aus konventionellen und erneuerbaren Quellen als gleichwertig: eine Kilowattstunde (kWh) Windstrom ersetzt den Primärenergieaufwand für eine kWh Kohlestrom (Abb. 4).

3 Eine vergleichende Darstellung und Aktualisierung der Potenziale erneuerbarer Energien wird 2010 in hoher räumlicher Auflösung vom DLR in einer Studie für das UBA fertig gestellt.

Energiequelle	Technologie	primäre Energieart	sekundäre Energien
Windenergie	• Onshore • Offshore	Stromerzeugung	Wärme Kraftstoff
Photovoltaik	• Siliziumwafer-PV • Dünnschicht-PV • konzentrierende Solazellen	Stromerzeugung	Wärme Kraftstoff
solarthermische Kraftwerke	• Parabolrinnenkraftwerke • Turmkraftwerke • Dishtechnologien • Fresnel-Kollektoranlagen	Stromerzeugung	Wärme Kraftstoff
Wasserkraft	• Staudammtechniken • Laufwassertechniken • Meeresenergien	Stromerzeugung	Wärme Kraftstoff
Biomasse	• Polygenerationverfahren	Stromerzeugung Wärmeerzeugung Kraftstofferzeugung	
Geothermie	• Wärmepumpen • Tiefengeothermie	Wärmeerzeugung Stromerzeugung	
Solare Wärme	• passive Solarenergienutzung: transparente Wärmedämmung • aktive Wärmegewinnung: solarthermische Warmwasser-erzeugung und Heizung • Solaraktivhaus: solare Nahwärmesysteme, Prozesswärme und solare Kälte	Wärmeerzeugung	

Tabelle 1
Erneuerbare Energiequellen und die Technologien zur Deckung des Energiebedarfs. Aus Kraftstoffen kann bei Bedarf auch wieder Strom erzeugt werden.

45 Mio. PKW über eine nutzbare Speicherleistung von 10 kWh verfügen, stünden dennoch nur 0,45 TWh zu Verfügung [24].

Die einzigen vorhandenen Großspeicher in der notwendigen Größenordnung sind Erdgasspeicher mit einer bestehenden thermischen Kapazität von 217 TWh (Untertage-Gasspeicher) und einem geplanten Ausbau um 79 TWh in den nächsten Jahren [14]. Diese Technik der Langzeitspeicherung ist erprobt, sicher und bewährt und kann für chemische Energieträger aus erneuerbarem Strom auf zwei Arten verwendet werden: einerseits direkt durch die Speicherung von Erdgas-Substitut in Form von erneuerbarem Methan oder durch Anpassung der Infrastruktur mit Wasserstoff oder einer Mischung (Hythane) [25].

- **Elektrochemische Energiespeicher**

Elektrochemische Energiespeicher erhalten eine zunehmende Bedeutung bei der Nutzung regenerativer Energiequellen, da sie aufgrund ihres hohen Energiewirkungsgrades optimal zur Pufferung von fluktuierenden regenerativen Stromquellen wie Photovoltaik oder Windenergie geeignet sind. Sie fangen Spannungsschwankungen ab, glätten Lastgang- und Bedarfsprofile, erlauben die Nutzung kabelloser oder netzunabhängiger Bauelemente und erlauben Mobilität auf der Basis elektrischer Energie. In diesem Zusammenhang können zukünftig stationäre Großbatterien wie zum Beispiel Redox-Flow-Batterien eine bedeutende Rolle einnehmen.

1.2.3.2 Chemische Energiespeicher

Für die Überbrückung längerer Phasen mit zu hohem oder zu geringem Angebot an Wind- bzw. Solarenergie sind Langzeitspeicher mit chemischen Energieträgern wie Wasserstoff oder Methan erforderlich.

- **Wasserstoff**

Für die Speicherung von großen Überschüssen sind Technologien zur Langzeitspeicherung (mehrere Tage bis Wochen) erforderlich. Großmaßstäblich wird die elektrische Pufferung über die Elektrolyse und Wasserstoffspeicherung in Kavernen mit einer nachgeschalteten Verstromung in Gasturbinen entwickelt. Durch die Elektrolyse kann „überschüssiger“ Strom aus

erneuerbaren Energien als chemische Energie gespeichert werden. Zentraler Punkt einer Wasserstoffwirtschaft ist die ökologisch und wirtschaftlich vertretbare Erzeugung des Wasserstoffs mit verschiedenen Verfahren:

- Elektrolyse aus erneuerbarem Strom
- thermische Wasserspaltung
- Reformierung von Kohlenwasserstoffen (erneuerbares Methan)

Erneuerbarer Strom kann so in transportablen chemischen Energieträgern gespeichert werden, um ihn zeitlich oder räumlich versetzt zu nutzen. Der hergestellte und gespeicherte Wasserstoff kann so zur netzunterstützenden Rückverstromung eingesetzt werden sowie als Kraftstoff für den mobilen Sektor. Für die gesamte Verfahrenskette (Herstellung, Speicherung und Rückverstromung) werden Wirkungsgrade von bis zu 45 % angegeben.[4]

Wasserstoff kann als sauberer Energieträger in Zukunft eine wichtige Rolle für die Kraftstoff und Energieversorgung übernehmen, weil er sehr vielfältig einsetzbar ist und Vorteile bietet: Wasserstoff kann in Brennstoffzellen, Gasturbinen (Erzeugung elektrischer Energie), Verbrennungsmotoren (Erzeugung mechanischer Energie) oder katalytischen Brennern (Wärmeerzeugung) genutzt werden und er kann nicht zuletzt auch als Zwischenprodukt zur Erzeugung erneuerbaren Methans oder anderer Kohlenwasserstoffe verwendet werden.

- **Erneuerbares Methan als chemischer Energiespeicher**

Das Energiekonzept 2050 sieht neben der direkten Wasserstofferzeugung und -verwendung auch in der Herstellung von erneuerbarem Methan ein besonders interessantes Verfahren zur Speicherung größerer Mengen erneuerbarer Energien. Der Vorteil gegenüber einer Wasserstoff-Welt liegt darin, dass die bestehende Erdgas Infrastruktur einschließlich der Kraftwerke, der Gasnetze und auch der Erdgasspeicher dafür genutzt werden kann.

Über die Reaktion des Wasserstoffs mit CO_2 lässt sich über den sog. Sabatier-Prozess direkt Methan herstellen, das über bestehende Erdgasnetzte und -speicher den Stromerzeugern zugeführt werden kann. Der energetische Wirkungsgrad beläuft sich hierbei auf > 60 % ($kW_{Ern.Methan}/kW_{Strom}$). Zusätzliche Attraktivität gewinnt dieses, bisher in einer 30 kW-Technologie demonstrierte Verfahren[5] durch Verwendung von CO_2 als Rohstoff. So ist bei Kraftwerken, Biogasanlagen, der Synthesegasherstellung oder auch bei der Zementherstellung durch die Kopplung mit der Methanherstellung die CO_2-Bilanz neutral.

Das vorhandene Erdgasnetz bildet einen virtuellen saisonalen Speicher, und zwar sowohl für Wärme- als auch für Stromerzeugung und auch für die Versorgung des Verkehrsektors mit regenerativem Kraftstoff [26]: Während sich die Speicherkapazität des Stromnetzes heute auf nur ca. 0,04 TWh beläuft – mit einer Speicherreichweite von unter einer Stunde –, beträgt die Speicherkapazität des heute schon vorhandenen Gasnetzes in Deutschland über 200 TWh mit Speicherreichweiten im Bereich von Monaten.

1.2.3.3 Thermische Energiespeicher

Bei der Integration erneuerbarer Energiequellen mit fluktuierendem Angebot können Energiespeicher helfen, Energie gleichmäßig bereit zu stellen. Die möglichen Einsatzbereich thermischer Energiespeicher reichen von der saisonalen Speicherung in der Solarthermie bis zu Hochtemperaturspeichern bei der solarthermischen Elektrizitätserzeugung (Concentrated Solar Power). Selbst erneuerbar erzeugte Elektrizität kann, wenn kurzzeitig nicht ins Netz einspeisbar, nach der Umwandlung in Wärme oder Kälte kostengünstig und effizient gespeichert werden.

Einen großen Beitrag zur Steigerung der Energienutzungseffizienz kann die Nutzung der Wärme bei der KWK und insbesondere bei der Abwärme erwartet werden. Durch den Einsatz thermischer Energiespeicher können in industriellen Bereichen mit hohem Energieverbrauch,

4 Wenn man bei der Rückverstromung die Abwärme der Gaskraftwerke mit nutzt, erhöht sich der Gesamtwirkungsgrad um 10 – 15 Prozent.

5 In einer ersten technischen Realisierungsstufe ist der Aufbau einer 10 MW-Wind-to-Methan-Anlage in Kopplung mit einer Biogasanlage geplant, in der das Biogas ohne CO_2-Abtrennung durch Zudosierung von H2 methanisiert wird. Ziel für die Inbetriebnahme ist das Jahr 2012.

z. B. in Gießereien, Zementwerken oder bei der Glasherstellung, große Wärmemengen zum Teil wieder nutzbar gemacht werden in Form von Prozesswärme oder in Nahwärmenetzen zur Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung.

Solarthermische Wärme kann sowohl für Kraftwerke bei Temperaturen über 400 °C als auch für die häusliche Warmwasserbereitung dezentral gespeichert und zum gegebenen Zeitpunkt abgegeben werden.

Grundsätzlich kann thermische Energie in Form von sensibler oder latenter Wärme oder in thermochemischen Prozessen gespeichert werden:

- **Sensible Speicherung sensibler thermischer Energie**

Bei der Speicherung sensibler thermischer Energie wird ein Speichermedium erhitzt oder abgekühlt. In den meisten Fällen wird Wasser eingesetzt, da es eine hohe spezifische Wärmekapazität besitzt und sehr kostengünstig ist. Kleinere Speicher werden als Pufferspeicher in thermischen Solaranlagen (Warmwasserbereitung) für eine Speicherung über Tage oder Wochen eingesetzt. Große Wasserspeicher (bis zu mehreren tausend m^3) werden zur saisonalen Speicherung solarer Wärme zum Heizen im Gebäudebereich meist in Verbindung mit einem Nahwärmenetz gebaut. Mit großen saisonalen Wärmespeichern kann in Deutschland etwa die Hälfte des Gesamtwärmebedarfs von größeren Gebäudeeinheiten solar gedeckt werden.

Wärme und Kälte wird auch im Erdreich gespeichert. Hier kann beispielsweise thermische Energie mit einem Temperaturniveau von ca. 10 °C im Winter von einer Wärmepumpe genutzt werden und im Sommer direkt zur Gebäudekühlung eingesetzt werden.

- **Latentwärmespeicher**

Latentwärmespeicher nutzen zusätzlich zur Temperaturerhöhung (oder -absenkung) einen Phasenwechsel des Speichermediums (Phase Change Materials = PCM). Dadurch kann bei kleineren Temperaturunterschieden deutlich mehr thermische Energie gespeichert werden. Dies ist vor allem bei der Kältespeicherung von Vorteil. In die Gebäudestruktur integrierte PCM können z. B. mit Schmelztemperaturen um 25° die Raumtemperatur bei komfortablen Werten halten: Bei Umgebungstemperaturen über 25° nehmen diese Materialien die überschüssige Energie auf und schützen so vor Überhitzung, bei niedriger Umgebungstemperatur geben sie die gespeicherte Energie wieder ab. PCM stehen mit verschiedenen Schmelztemperaturen zur Verfügung. Momentan wird verstärkt an neuen Materialien mit hohen Speicherkapazitäten und günstigen ökonomischen Randbedingungen geforscht.

Bei Kraft-Wärme-Kältekopplungsanlagen ermöglichen Latentwärmespeicher einen stromgeführten Betrieb.[6] Die hohe spezifische Speicherkapazität trägt zu einer kompakten Speichergeometrie bei. Auch die Nutzung industrieller Abwärme hoher Temperaturen kann durch Latentwärmespeicher erfolgen, bzw. erleichtert werden.

- **Thermochemische Speicherprozesse**

Zur Speicherung thermischer Energie können auch reversible chemische Reaktionen genutzt werden. Solche Systeme verfügen über hohe Energiespeicherdichten, die bis zum Faktor 10 höher liegen als in Wasser und sind in der Lage, die Temperaturniveaus beim Laden und Entladen den aktuellen Bedürfnissen anzupassen. Am meisten untersucht sind auf diesem Gebiet Ad- und Absorptionsprozesse. Hierbei wird in der Regel Wasserdampf an festen, mikroporösen Adsorbentien (z. B. Zeolith oder Silicagel) oder an wässrigen Salzlösungen (z. B. Lithiumchlorid) sorbiert. Dabei wird Wärme freigesetzt. Zum Laden des Speichers muss durch Wärme der Wasserdampf wieder desorbiert werden.

Offene Sorptionsspeicher werden für ihren Einsatz bei der Nutzung industrieller Abwärme untersucht. Vor allem im Bereich industrieller Trocknungsprozesse können hier effiziente und wirtschaftlich interessante Systeme entstehen. Neben der Speicherung bieten offene Sorptionsspeicher auch die Möglichkeit, Wärme in Kälte zu transformieren, was z. B. für die solare Gebäudeklimatisierung genutzt wird.

6 Weil mit den Latentwärmespeichern Wärme für die spätere Verwendung gespeichert werden kann.

- **Notwendige Speicher bei stromgeführtem KWK-Betrieb**

Speicher für hohe Temperaturen für kleine Kraft-Wärme-Kältekopplungsanlagen, ermöglichen einen stromgeführten Betrieb, wobei die anfallende Wärme gegebenenfalls bis zu einigen Tagen gespeichert werden kann. Dies ist auch für eine bessere Nutzung industrieller Prozesswärme interessant.

1.2.4 Übertragungs- und Verteilungsnetze

Ein europäisches Hochspannung-Gleichstrom-Übertragungsnetz (HGÜ) ist ein wichtiger Baustein des Energiekonzeptes 2050, das die nationale Versorgung mit erneuerbaren Energien sichert, indem regionale Erzeugungsüberschüsse und Erzeugungsdefizite von erneuerbaren Energien innerhalb Europas ausgeglichen und der Import von erneuerbarem Strom aus Nordafrika ermöglicht werden.

Multi-Terminal-HGÜ-Leitungen[7] ermöglichen die Integration erneuerbar hergestellten Stroms aus Wüstenregionen (solarthermische Kraftwerke wie im DESERTEC-Projekt und Photovoltaik) und Stroms aus europäischen On- und Offshore-Windparks im Verbund mit skandinavischen Pump- und Schwallwasserkraftwerken[8] in ein europäisches Superstromnetz, wobei auch eine Ausweitung nach Osten und Südosteuropa in Erwägung zu ziehen ist. Eine enge europäische Zusammenarbeit ist eine der Voraussetzungen für die schrittweise Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien im Stromnetz.

HGÜ-Leitungen weisen keine elektromagnetischen Felder auf und können daher Strom weitgehend verlustfrei über große Entfernungen transportiern. Sie eigenen sich auch für die unterirdische Verlegung, was optische Beeinträchtigung vermeidet und die Akzeptanz erhöht.

7 Nicht nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen können mit HGÜ realisiert werden. Es ist auch möglich, mehrere Umrichter an einen Gleichspannungskreis anzuschließen. In der Praxis werden diese Systeme meist als Multi-Terminal-Systeme bezeichnet. Auf Grund der flexiblen Regelbarkeit des Gleichspannungskreises bei der HVDC Light® Technologie – im Gegensatz zum Gleichstromkreis einer netzgeführten HGÜ – kann ein Multi-Terminal-System mit HVDC Light® einfacher realisiert werden.

8 Wasserskraftwerke im Schwallbetrieb zur Deckung von Spitzenbedarf an Strom

Übertragungs- und Verteilungsnetze stehen sowohl von der Nutzung des energetischen Erzeugungspotenzials her als auch aus ökonomischen Überlegungen in Wechselwirkung und erhöhen die Versorgungssicherheit. Je mehr die Kosten für erneuerbare Energientechnologien und smart grids in Deutschland sinken, desto wirtschaftlicher wird der Einsatz dezentraler Energieerzeugungs- und Verteiltechnologien vor Ort. Stromimporte aus Südeuropa, Afrika und Norwegen sind dann nicht unbedingt kostengünstiger, sondern bieten vor allem ein zusätzliches energetisches und technisches Potenzial.

Die Leistungselektronik spielt eine zentrale Rolle bei der Netzregelung, da die rotierenden Generatoren aus Kohle- und Kernkraftwerken entfallen und die Wechselrichter in Wind- und PV-Kraftwerken die Netzbildung übernehmen. Sie regeln die Spannung und Frequenz des Netzes durch die geregelte Bereitstellung von Wirk- und Blindleistung. Im Falle eines Netzfehlers liefern sie große Kurzschlussströme zur Auslösung von Sicherheitsorganen und beteiligen sich aktiv am Wiederaufbau des Netzes.

1.2.4.1 Dezentrale und zentrale Strom- und Gasverteilnetze

Das Konzept zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- **Überwinden von Systemgrenzen:** Die verschiedenen Methoden der Methan-Herstellung aus erneuerbaren Energien und die Nutzungsoptionen in unterschiedlichen Verbrauchsektoren bieten die Chance für ein Zusammenwachsen der Energiesektoren Stromnetz, Gasnetz und Mobilität. Strom und erneuerbares Methangas sind bidirektional ineinander umwandelbar und verfügen schon heute über eine gut ausgebaute Infrastruktur mit saisonaler Gasspeicherkapazität. Zudem lässt sich aus beiden Energieträgern dezentral Wasserstoff erzeugen, ohne auf ein großflächiges H_2-Verteilsystem mit hohen Infrastrukturkosten angewiesen zu sein.
- **Speicherung und Verteilung von temporären Überangeboten:** Durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien werden zukünftig immer häufiger hohe Wind- und Solarkraftleistungen zur Verfügung stehen,

die nicht vollständig vom Stromnetz, dafür aber in Form von erneuerbarem Wasserstoff oder Methan in entsprechenden Verteilnetzen aufgenommen werden können.

- **Erdgasverteilnetz:** In der vorhandenen Erdgas-Infrastruktur wird der erneuerbar hergestellte, chemische Energieträger Methan effizient gespeichert, verteilt und zur bedarfsgerechten Nutzung bereitgestellt. Etwa 50 – 60 % des Stromes können in Methan gewandelt werden, das in bestehenden Gas- und Dampf-Kraftwerken (GuD) oder dezentralen Blockheizkraftwerken (BHKW) wieder zu Strom und Wärme gewandelt werden kann.
- **Stabilisierung des Stromnetzes:** Durch das Konzept „Wind-/Solarenergiezuerneuerbarem-Kraftstoff" kann positive und negative Regelenergie bereitgestellt werden: Bei Stromüberschuss wird Erdgassubstitut (erneuerbares Methan) produziert (negative Regelenergie), bei Strombedarf wird das erneuerbare Methan rückverstromt (positive Regelenergie)[9]

Dieses Konzept könnte auch auf Wasserstoffbasis realisiert werden, allerdings wäre dafür eine neue Infrastruktur zu installieren.

1.2.4.2 Dezentrale Wärmenetze

Trotz des abnehmenden flächenbezogenen Wärmebedarfs in Gebäuden können in verdichteten Räumen Wärmenetze ausgebaut werden, um auch dort einen hohen Anteil erneuerbarer Wärme, sowie den Ausbau der KWK zu ermöglichen. In Skandinavien werden Wärmenetze mit niedrigen Netztemperaturen in mittleren und größeren Städten als zentrale Wärmeversorgungstruktur genutzt. Dadurch ergeben sich vielfältige Nutzungsmöglichkeiten in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung und der Einspeisung von Wärme aus erneuerbaren Energien, insbesondere Solarthermie, sowie Abwärme aus der Industrie. Die Installation von Wärmenetzen bietet einen neuen Freiheitsgrad im zeitlichen und räumlichen Management von Wärmeströmen und damit auch dem Betrieb von Anlagen der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme. In Verbindung mit zukünftigen mit Niedertemperaturwärme angetriebenen thermisch angetriebenen Kältemaschinen kann Wärme auch zur Klimatisierung verwendet werden und somit den Strombedarf reduzieren.

9 Die Firmen Lichtblick AG und Volkswagen AG haben 2009 das Projekt „Schwarmstrom" gestartet, das 100.000 gasbetriebene BHKW in ganz Deutschland vernetzen soll. Diese kleinen Anlagen sollen 100.000 Gebäude mit Wärme versorgen und den Strom ins Netz einspeisen. Sie bilden dann zusammen ein unsichtbares Großkraftwerk von 2000 Megawatt.

1.2.5 Komponenten für solares und energieeffizientes Bauen

Die Vorstellung der einzelnen technologischen Komponenten, die für die Funktionsweise eines Energieversorgungssystems 2050 wie im nächsten Kapitel beschrieben notwendig sind, bilden die Grundbausteine auch für das solare und energieeffiziente Bauen. Das Zusammenspiel der einzelnen Erzeugungs- und Wandlungstechnologien führt dabei zu ganz neuen Systemlösungen, die an den Energiebedarf des Gebäudes, an regionale Besonderheiten und Klimata abgepasst werden können. Das Passivhaus, das Solaraktivhaus und das Plus-Energiehaus sind jeweils Bauweisen, die aus der Palette der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienztechnologien sich diejenigen Komponenten zunutze machen, die für eine bestimmte Gebäudenutzung oder Region optimal ist.

1.3 Funktionsweise des Energieversorgungssystems 2050

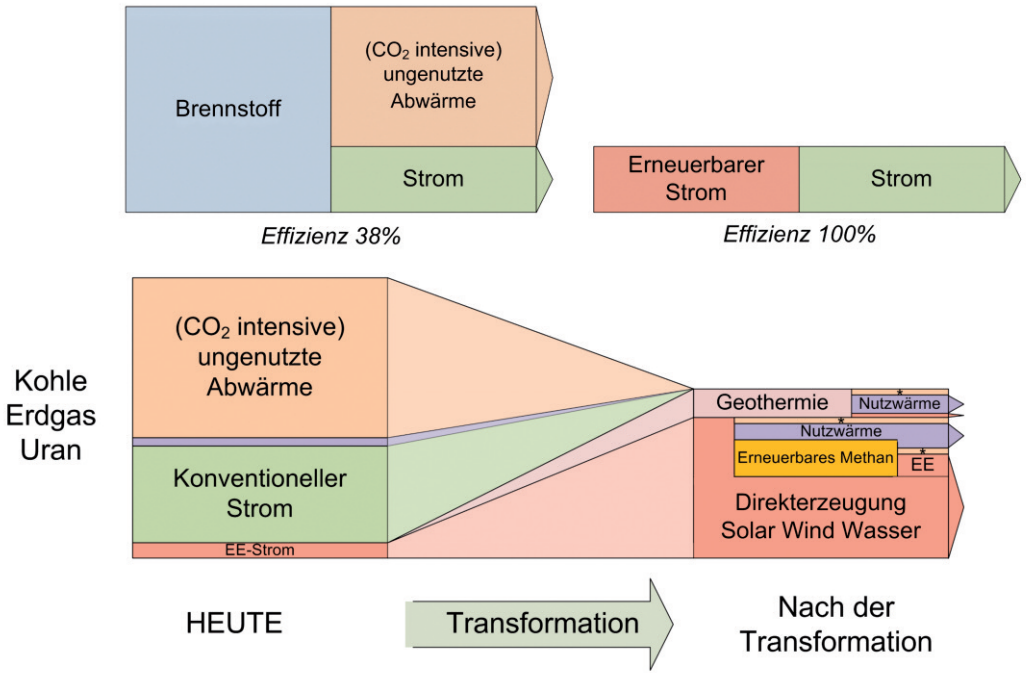
Nachdem die technologischen Hauptkomponenten und ihre Energiepotenziale im Kapitel 1.2 beschrieben wurden, soll nun die Funktionsweise dieser technologischen Komponenten innerhalb eines nachhaltigen Energiesystems 2050 vorgestellt werden.

1.3.1 Stromerzeugung als Hauptstandbein der Energieversorgung

Im Jahr 2050 werden Wind- und Solarenergie die beiden Hauptquellen der Stromversorgung sein, da sie das größte Potenzial aufweisen und zu den kostengünstigsten Stromquellen zählen werden.

Abbildung 4
Effizienzgewinn im Stromsektor durch zunehmende direkte Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) – exemplarische Transformation.
Die Grafik fußt auf dem Mengengerüst für das 100%-EE-Szenario 2050 (Kapitel 2.5.1) (= CO_2-neutrale ungenutzte Abwärme)*

Quelle: Fraunhofer IWES



Quelle: Fraunhofer IWES

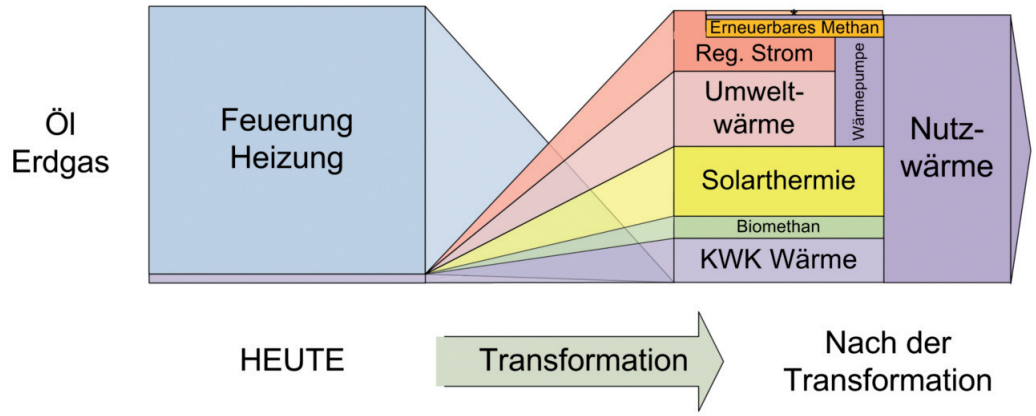
Bei der konventionellen Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern ohne Wärmeauskopplung kann im globalen Durchschnitt nur gut ein Drittel der Primärenergie in Strom gewandelt werden, während knapp zwei Drittel als Abwärme ungenutzt bleiben. Beim Umstieg auf erneuerbare Energien aus Direkterzeugung sinken daher bei gleicher Stromerzeugung der Primärenergiebedarf und die energiebedingten CO_2-Emissionen. Die Abwärme aus thermischer Stromerzeugung kann zum Großteil durch die KWK nutzbar gemacht werden (siehe auch [17]). Die Stabilität der Stromversorgung wird durch erneuerbare Stromerzeuger im Verbund (Regenerative Kombikraftwerke), Energiemanagement (Lastregelung) und entsprechender Speicher und Backup Kapazitäten (v. a. Pumpspeicher, Gaskraftwerke mit Wasserstoff bzw. mit erneuerbarem Methan) gewährleistet.
Die Darstellung ist abgeleitet nach [17, 26].

Die Nutzung von Primärenergie aus reinen Verbrennungsvorgängen (Kohle-Kraftwerke, Gebäudeheizung, Prozesswärmebereitstellung, Verbrennungsmotoren) wird ersetzt durch rein regenerative elektrische Systeme und regenerativ erzeugte Wärme. Durch direkt erzeugende Stromgeneratoren der Wind-, Wasser- und Photovoltaikanlagen ohne begleitende Abwärmeverluste ergibt sich eine große Reduktion des Primärenergiebedarfs. Denn jede Kilowattstunde Strom aus Wind-, Solar- oder Wasserkraftwerken vermindert beim heutigen Kraftwerksmix den Bedarf an fossiler oder nuklearer Primärenergie um etwa 2,5 kWh.

Solarwärme- und Geothermieanlagen ersetzen fossile Wärmeerzeugung. Die direkte erneuerbare Stromerzeugung wird ergänzt durch schnell reagierende Gaskraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung, wobei das eingesetzte Gas (Methan) aus „überschüssigem“ erneuerbar erzeugtem Strom bzw. aus nachhaltiger Biomassemutzung gewonnen wird.

Zum Ausgleich der bei der Direkterzeugung von Wind- und Solarstrom entstehenden Fluktuationen und für die Verteilung der Energie von den Standorten mit optimalem Erzeugungspotenzial in die Verbrauchs-Regionen stehen die beiden Hochleistungsnetze für Strom (mit HGÜ-Anteilen) und Gas (Erdgas- und/oder Wasserstoffnetz) zur Verfügung [14, 26].

In einem nach wirtschaftlichen Kriterien optimierten Gesamtsystem stammt der größte Anteil der elektrischen Energie in 2050 aus Windkraftanlagen, die an windreichen Standorten platziert wurden. Im Falle Europas sind das Standorte entlang der Atlantikküste, an windreichen Regionen im Inland und im



Quelle: Fraunhofer IWES

Abbildung 5
Transformation des Wärmesektors: durch den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, der Solarthermie und die verstärkte Nutzung von Elektrowärmepumpen, erneuerbarem Methan/Biomethan in Brennwertkesseln und Prozesswärme kann in Zukunft der durch Energieeinsparmaßnahmen gesunkene Prozess- und Heizwärmebedarf vollständig erneuerbar gedeckt werden.
Die Grafik fußt auf dem Mengengerüst für das 100 %-EE-Szenario 2050 (Kapitel 2.5.1) (= CO_2-neutrale ungenutzte Abwärme)*

Quelle: Fraunhofer IWES; die Darstellung ist abgeleitet nach [17, 26].

Offshore-Bereich. Die kurz- bis mittelfristigen Fluktuationen bei der Windenergie werden durch ein europäisches Hochleistungs-Stromnetz ausgeglichen. Saisonale Fluktuationen werden durch Langzeitspeicher (Wasserstoff, Methan (Erdgas-Substitut)) unter Nutzung der bestehenden Gasinfrastruktur ausgeglichen. Die Windenergie wird ergänzt durch Photovoltaik, solarthermische Kraftwerke, größtenteils schon heute bestehende Wasserkraftwerke, geothermische Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen.

Thermisch arbeitende Solarkraftwerke mit Wärmespeichern oder Hybrid-Versorgung mit Hilfe chemischer Energiespeicher im Süden Europas oder in Nordafrika tragen zum Ausgleich der aus der Windstromerzeugung entstehenden Fluktuationen bei.

Meeresenergie (Strömung und Wellen), Geothermie-Kraftwerke an dafür geeigneten Standorten sowie gebäudeintegrierte Photovoltaikanlagen-Anlagen ergänzen das Erzeugungs-Portfolio. Photovoltaik-Anlagen übernehmen in Verbindung mit der Kraft-Wärme-Kopplung und der Elektromobilität weitere Aufgaben zur Verbesserung der Versorgungssicherheit:
Bei Ausfall großer elektrischer Netze können sie einen Weiterbetrieb lokaler Netze ermöglichen. Für Entwicklungs- und Schwellenländer erlauben sie den Aufbau dezentraler Versorgungsnetze.

1.3.2 Energieeffizienz durch Kraft-Wärme-Kopplung

Die Kraft-Wärme-Kopplung erhöht den Gesamtwirkungsgrad der Konversionstechniken und damit die Energienutzungseffizienz der erneuerbaren Energien. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen werden vor allem bei der dezentralen Energieerzeugung eine tragende Rolle spielen wie bei kleineren Gaskraftwerken, Mikroturbinen, Brennstoffzellen und Blockheizkraftwerken, Brennstoffzellen und Mikrogasturbinen, deren Leistung dem lokalen Wärmebedarf angepasst ist. Sie können jedoch auch über den Strombedarf gesteuert werden. Durch einen drehzahlvariablen Betrieb kann der Systemwirkungsgrad verbessert und die Lebensdauer erhöht werden. Die dafür eingesetzten Energieträger kommen aus der Biomassenutzung, der Wasserstoff- oder Methangaserzeugung aus erneuerbaren Energien, der Solarthermie und der Geothermie.

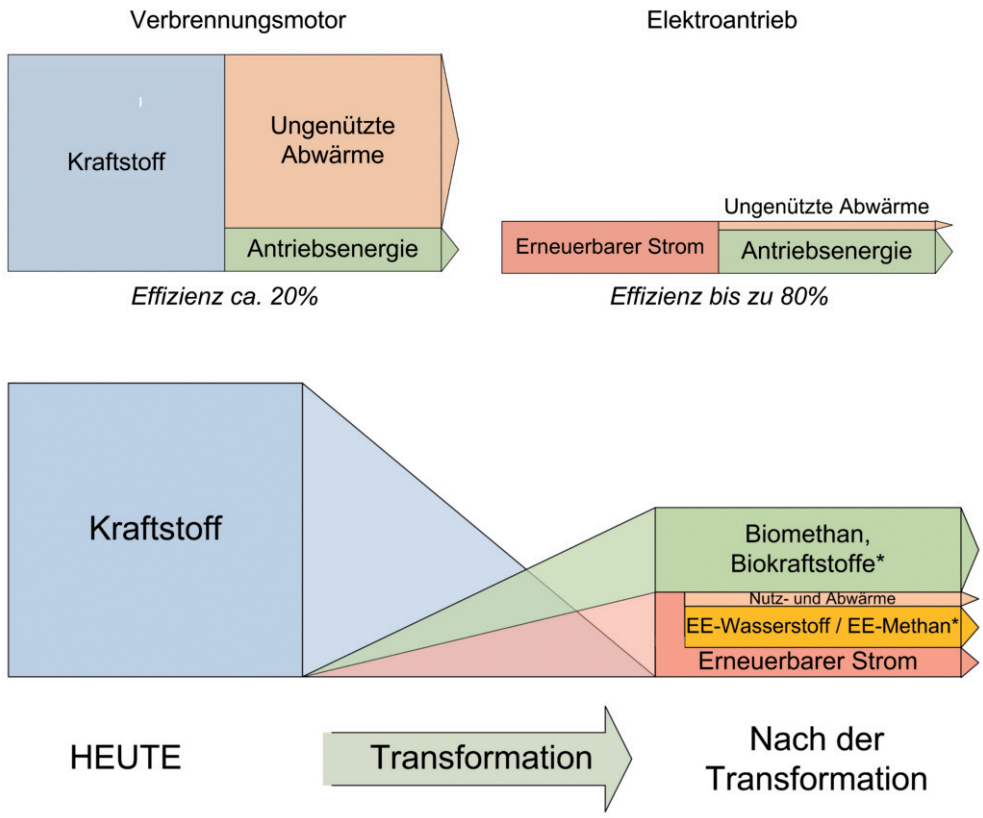
In der Kombination von KWK mit solarer Stromerzeugung ergänzen sich beide Komponenten hervorragend: während im Winter die KWK Wärme und Strom erzeugt, reduziert sich im Sommer der Bedarf an KWK-Strom durch die solare Stromerzeugung.

Der konsequente Einsatz von KWK, Wärmepumpen und elektrischen Antriebssystemen für Fahrzeuge erlaubt es, den globalen Primärenergiebedarf allein durch diese drei Maßnahmen um mehr als 50 % zu reduzieren. Sie stellen sich damit als wichtigste Maßnahmen zur Steigerung des Effizienzgewinns im Energiesystem dar. Die Umweltverträglichkeit der elektrischen Wärme - pumpen verbessert sich mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien im Strommix.

Abbildung 6
Oben: Effizienzgewinn im Verkehrssektor durch Elektromobilität. Vergleich von Energieaufwand und Effizienz: links herkömmliches Antriebskonzept mit fossilen und biogenen Kraftstoffen, rechts Elektroantrieb, der regenerativen, direkt erzeugten Strom aus Wasser-, Solar und Windenergie nutzt. (siehe auch [17]) Unten: Exemplarische Transformation: Baustein regenerative Elektromobilität, erneuerbares Methan/ erneuerbarer Wasserstoff (erneuerbare Kraftstoffe) und Biokraftstoffe (Biodiesel, Biokerosin).

Die Grafik fußt auf dem Mengengerüst für das 100%-EE-Szenario 2050 (Kapitel 2.5.1)

Quelle: Fraunhofer IWES



Quelle: Fraunhofer IWES

Durch die zunehmende Nutzung regenerativen Stroms, davon ein großer Anteil aus der Direkterzeugung mittels Wind-, Wasser- und Solarenergie, können der Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen im Verkehrsektor erheblich reduziert werden.

* = können auch andere regenerative Kraftstoffe wie zum Beispiel Wasserstoff oder erneuerbares Kerosin sein. Die Darstellung ist abgeleitet nach [17, 26]

1.3.3 Wärmeerzeugung – direkte und sekundär erzeugte Wärme

Die Bereitstellung von Wärmeenergie ist heute mit einem sehr großen Anteil an CO_2-Emissionen verbunden. Der Transformation der Systeme zur Wärmebereitstellung kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu. Solarwärme- und Geothermieanlagen ersetzen fossile Wärmeerzeugung direkt und vermeiden so die bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehenden Emissionen.

Die Wärmeversorgung zur Gebäudeheizung ergibt sich aus dem Zusammenspiel von deutlich verbesserter Wärmedämmung und Deckung des verbleibenden Wärmebedarfs aus erneuerbaren Energien, wie solarthermische Kollektoren, Geothermie- und Biomasseanlagen sowie, über die Abwärme aus Industrieprozessen, aus der Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW, Brennstoffzellen) und über die Kombination von Wärmepumpen mit erneuerbaren Energien. Die Bereitstellung von industrieller Prozesswärme erfolgt primär aus Hochtemperatur-Solarthermie, sowie mit Strom aus erneuerbaren Energien bzw. erneuerbarem Methan.

Der Prozesswärmebedarf für Industrie und Gewerbe im Temperaturbereich zwischen 80 und 250 °C lässt sich erneuerbar decken. Er verläuft in einigen Branchen parallel zum Strahlungsangebot und kann dann mit Prozesswärmekollektoren oder mit KWK-Anlagen gedeckt werden. Die im Sommer erhöhten

Produktionszahlen z. B. der Getränkeindustrie und der erhöhte Kühlbedarf in Lebensmittelproduktion und -handel bieten Chancen, hier nennenswerte Anteile solar zu decken.

Dass der Wärmebedarf u. a. durch wesentlich besser gedämmte Gebäude deutlich reduziert wurde, versteht sich von selbst. Das BMU-Leitszenario 2009 [9] zeigt eine sinkende Nachfrage nach Wärme bis 2020 auf 85 % und bis 2050 etwa auf die Hälfte des heutigen Wertes.

1.3.4 Energieversorgung des Verkehrs

Die Mobilität wird zunehmend auf elektrischer Basis erfolgen und damit um den Faktor 2 bis 3 effizienter sein als unsere heutigen Kraftfahrzeuge. Hierzu zählen rein elektrisch betriebene Fahrzeuge auf Batteriebasis mit und ohne „Rangeextender“ (Reichweitenverlängerer), wobei letzterer sowohl aus kleinen Verbrennungsmotoren als auch aus Brennstoffzellen bestehen kann. Im Güterverkehr werden zum einen ebenfalls Hybridtechnologien eingesetzt, andererseits sollte soviel Güterverkehr wie möglich auf die Schiene verlagert werden. Für den Güter- und Langstreckenverkehr, für Flugzeuge und Schiffe werden erneuerbare Kraftstoffe (erneuerbares Methan, Wasserstoff, Diesel) aus Biomasse, bzw. mittels Strom aus Windenergie, Solarenergie und Wasserkraft hergestellt.

PKW, Bahn und Bus beziehen ihre Energie über Oberleitungen, Akkumulatoren oder Brennstoffzellen, wobei sich ihre Umweltverträglichkeit mit zunehmendem Anteil der erneuerbaren Energien im Strommix verbessert. Die Akkumulatoren werden durch bidirektionale Ladegeräte an Ladestationen geladen. Zusätzlich können durch kontaktloses Laden beim Fahren (induktive Übertragung) die Speicherbatterien nachgeladen werden.

Flugzeuge und Schiffe werden erneuerbare Kraftstoffe aus Biomasse, Wasserkraft, Solar- und Windenergie benutzen. Dabei besteht die Möglichkeit, erneuerbares Kerosin als Treibstoff aus Überschuss-Strom nach den genannten Verfahren zu erzeugen (erneuerbares Methan).

1.3.5 Information und Kommunikation in der Energieversorgung

Eine Einbindung des deutschen Energiekonzepts in einen gesamteuropäischen Kontext schafft eine Verstetigung der erneuerbaren Einspeisung und reduziert den Energiespeicherbedarf. Eine enge Abstimmung zwischen allen europäischen Mitgliedsländern und die Koordination z. B. durch die Europäische Kommission ist daher Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementierung.

Die Änderungen von einer zentralen Energieversorgung zu einer dezentralen Struktur mit vielen kleinen fluktuierenden stromeinspeisenden Anlagen erfordern eine technische Kommunikationsanbindung von elektrischen Verbrauchern und dezentralen Erzeugern im Netzbetrieb. Nur durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien kann der Strom optimal verteilt oder zwischengespeichert werden: Die Stromnetze werden „intelligent“, man nennt sie smart grids, weil sie über das Internet ein bidirektionales Energiemanagement erlauben. Breitband-Kommunikationssysteme zwischen Erzeugern, Netzbetreibern und Verbrauchern erlauben die Realisierung eines Online-Energiemarktes, der über zeitvariable Stromtarife eine flexible Anpassung zwischen Erzeugung und Verbrauch ermöglicht.[10] So können kundenorientierte Anreizsysteme entwickelt werden, um z. B. bei Starkwind die Batterien der Elektrofahrzeuge aufzuladen, oder Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen bevorzugt zu betreiben. Die Entwicklung der heutigen Stromnetze und Energieversorgungsstrukturen hin zu den smart grids wird zurzeit im Rahmen der von der Bundesregierung geförderten so genannten E-Energy-Initiative in sechs Modellregionen vorangetrieben und demonstriert.

Für den Ausgleich der in Zukunft stark steigenden Schwankungen bei der Stromerzeugung aus Sonne und Wind können dann folgende Elemente in den Online-Markt eingebunden werden:

- Schnell reagierende, dezentrale Kraftwerke – vorzugsweise Kraft-Wärmekopplungs-Anlagen bzw. Gas- und GuD-Kraftwerke, die

10 Hier muss man allerdings auch den Datenschutz beachten.

über Erdgasnetze aus Biomassevergasungsanlagen oder mit aus Stromüberschüssen erzeugtem Methan versorgt werden.

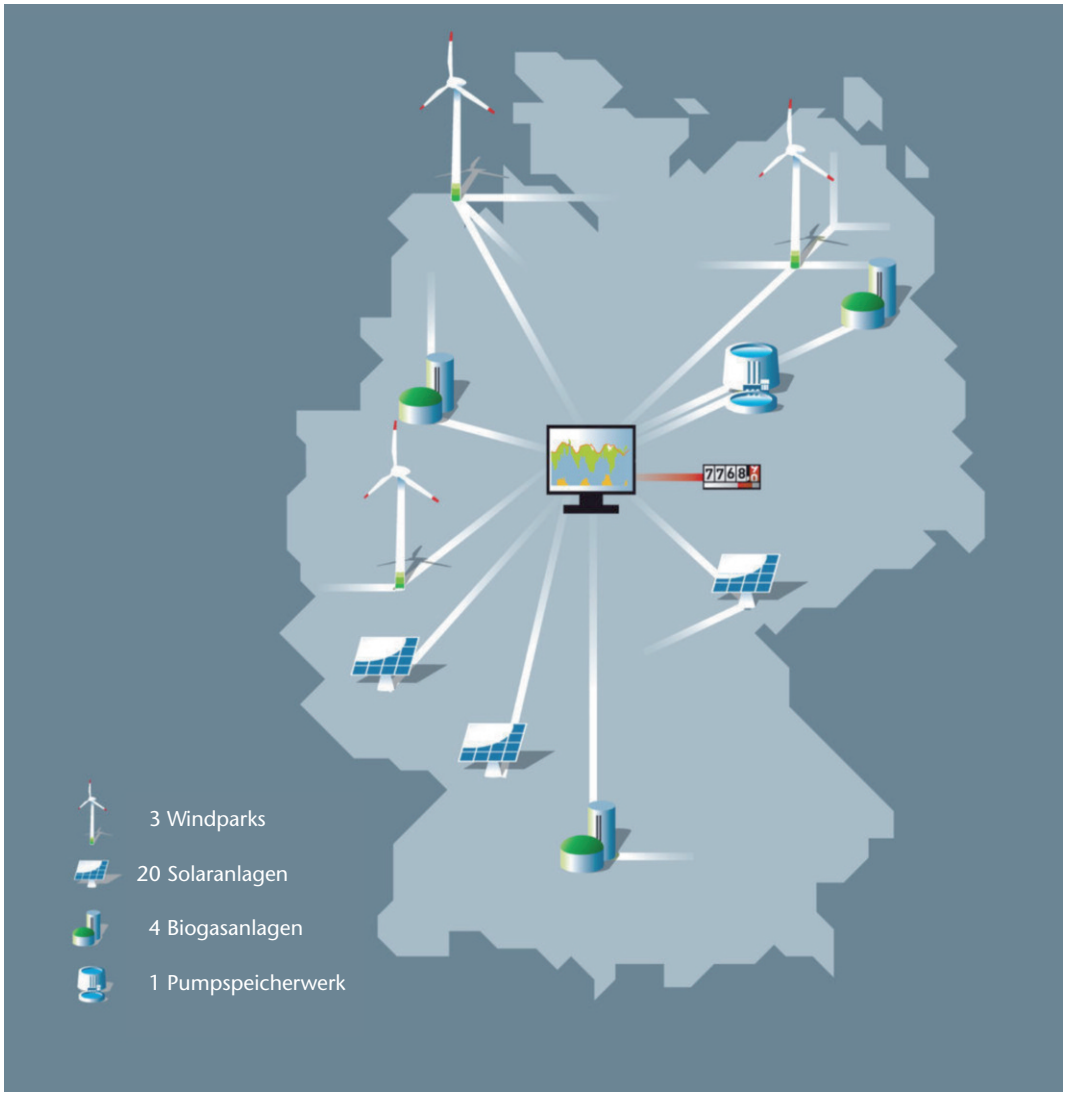
- Interaktive Netze für Strom, Gas und auch für Wärme/Kälte (smart grids) in Verbindung mit smart metering für Last- und Einspeisemanagement (regenerative Kombikraftwerke).
- Regenerative Kombikraftwerke für eine bedarfsgerechte Erzeugung aus verschiedenen erneuerbaren Energiequellen und für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen für die Spannungs- und Frequenzregelung.

1.3.6 Das Regenerative Kombikraftwerk

Das im Rahmen des Energiegipfels am 3. Juli 2007 vorgestellte „Regenerative Kombikraftwerk (RKKW)“ hat gezeigt, dass eine bedarfsgerechte Stromversorgung aus erneuerbaren Energien möglich ist durch eine intelligente Kopplung von dargebotsabhängigen, bedingt regelbaren Erzeugern (Wind, PV) mit regelbaren Erzeugern (Biogas betriebene Blockheizkraftwerke, Mikrogasturbinen) und Pumpspeichern [27]. Eine sichere Energieversorgung durch erneuerbare Energien ist dadurch immer und überall möglich, insbesondere wenn in Zukunft zusätzlich erneuerbares Methan im Erdgasnetz verfügbar ist.

Abbildung 7
Das Regenerative Kombikraftwerk

(schematische Darstellung)



Das Kombikraftwerk verknüpft und steuert 28 über ganz Deutschland verstreute Wind-, Solar- und Biomasseanlagen mit einer Leistung von zusammen 23,2 MW [27]. Jeder einzelne Energieerzeuger aus regenerativen Quellen hat seine Stärken und Schwächen. Die intelligente Verknüpfung der einzelnen Erzeuger, gekoppelt mit leistungsfähigen Vorhersageverfahren und kombiniert mit Speichern und flexiblen Verbrauchern ermöglicht eine Leistungsverfügbarkeit, die den Anforderungen an die Versorgungssicherheit gerecht wird. Das Kombikraftwerk hat in Echtzeit den Strombedarf Deutschlands im Verhältnis von 1:10.000 sekundengenau abgedeckt und demonstriert, dass die erneuerbaren Energien in der Lage sind, die Stromversorgung Deutschlands sicher zu stellen, wenn sie entsprechend ausgebaut werden.

Das Projekt hat aber auch gezeigt, dass für eine zukünftige, auf regenerativen Quellen basierte Energieversorgung die Installation von mehrfachen Überkapazitäten unbedingt erforderlich ist, damit Erzeugungsüberschüsse generiert werden, die temporäre Erzeugungsdefizite decken können.

Die Fähigkeit der erneuerbaren Energien zur zuverlässigen Versorgung und zur Deckung des gesamten Strombedarfs wird durch aktuelle Forschungsaktivitäten im Rahmen der E-Energy-Projekte weiter untermauert [28].

1.3.7 Gebäude, Städte und Gemeinden als energetische Systemkomponenten

Bis zum Jahr 2050 sollen das Passivhaus, das Plusenergiehaus und das Solaraktivhaus jeweils wahlweise zum Neubaustandard werden. Langfristig muss eine Entkopplung des Heizenergiebedarfs von der Pro-Kopf-Wohnfläche erreicht werden.

- **Passivhäuser** werden im Wesentlichen mit Strom betrieben, der zum Teil von einer Photovoltaikanlage auf dem Dach erzeugt wird und besitzen eine thermische Solaranlage zur Trinkwassererwärmung. Der Restenergiebedarf kann im Wesentlichen hocheffizient über mit regenerativ erzeugtem Strom versorgten Wärmepumpen abgedeckt werden, die im Bedarfsfall im Sommer in Kombination mit der PV-Anlage zur Kühlung des Hauses eingesetzt werden können. Der Heizenergiebedarf eines Passivhauses liegt bei bis zu 15 kWh pro m^2 und Jahr, der Gesamtenergiebedarf beträgt bis zu 30 kWh/(m^2a) [9].
- **Plusenergiehäuser** können im Jahresdurchschnitt sogar mehr Endenergie erzeugen, als sie selbst verbrauchen.
- **Solaraktivhäuser** weisen, ebenso wie Passiv- und Plusenergiegebäude, eine gute Wärmedämmung auf und decken ihren verbleibenden Wärmebedarf zu 100 % mit Solarwärme, wobei mit einem saisonalen Wärmespeicher ein Teil der Solarwärme aus dem Sommer bis zum Winter gespeichert wird.

Bei Neubauten findet bereits eine Entwicklung zu diesen energieeffizienten und solaren Bauweisen statt. Um aber das Gesamtniveau des Energiebedarfs im Wohnbereich zu senken, muss auch der Altbaubestand energetisch saniert werden, was bis 2050 im Wesentlichen abgeschlossen sein sollte. Bei einer Sanierungsrate von 2 bis 3 % pro Jahr wäre dieses Ziel erreichbar.

Energetisch sanierte Altbauten haben einen um bis zu 90 % reduzierten Energiebedarf [16]. Dieser kann mit erneuerbaren Energien abgedeckt werden. Darüber hinaus werden in Städten, bzw. verdichteten Zonen, Netz- und Verbundlösungen zur sinnvollen Verknüpfung von Wärmequellen und Wärmesenken verwendet. Quartierslösungen werden insbesondere bei Kulturdenkmälern als Lösungsansatz dienen.

Der Technologie der Nah- und Fernwärmenutzung – gegebenenfalls gekoppelt mit transportablen Wärmespeichern – fällt hierbei in Ballungsgebieten eine Schlüsselrolle für die effiziente Nutzung von Abwärme aus Industrie und KWK zu. Weiterhin können Synergien durch den Anschluss von Alt- und Neubauten entstehen, höhere Vorlauftemperaturen werden zunächst im Altbestand für Heizzwecke verwendet, Neubauten können dann z. B. aus dem Rücklauf dieser Systeme immer noch ausreichend versorgt werden (Kaskadennutzung der Wärme).

1.3.8 Dynamisches Zusammenwirken der Technologiekomponenten

Für die Integration sehr großer Anteile an erneuerbaren Energien sind außer den beschriebenen Hochleistungstransportnetzen auch flexible und interaktive Verteilungs- und Niederspannungsnetze erforderlich. Diese sogenannten smart grids erlauben erstmalig das Zusammenspiel zwischen Erzeugung und Verbrauch und eröffnen damit auch für Verbraucher die Möglichkeit, sich dem aktuellen Angebot, z. B. über variable Tarife, anzupassen. Erste Projekte zur Demonstration der Leistungsfähigkeit von so genannten smart grids werden zurzeit im Rahmen des E-Energy-Programms durchgeführt.

Die Einbindung solarthermischer Kraftwerke in die nationale Energieversorgung bietet sowohl in Bezug auf die konkurrenzfähige Bereitstellung als auch auf die Versorgungssicherheit deutliche Vorteile, wie sie z. B. in der Initiative „DESERTEC“ beschrieben sind [29]. Einerseits benötigt der Betrieb solarthermischer Kraftwerke einen hohen Anteil von solarer Direktstrahlung, wie er nur in Südeuropa oder in Nordafrika zu finden ist. Andererseits lassen sich diese Kraftwerkstypen durch Hinzunahme von Speichern oder durch den Betrieb von Zusatzbrennern, die regenerativ erzeugten Brennstoff einsetzen, dem jeweiligen Bedarf anpassen. In jedem Fall sind jedoch sehr leistungsfähige Ferntransportnetze dafür erforderlich. Auch geothermale Kraftwerke müssen sich entsprechend des Bedarfs an einen optimalen Einsatz anpassen.

In dem Maße, in dem die Einbindung der nationalen Stromversorgung mit erneuerbaren Energien in ein gesamteuropäisches Netz nicht gelänge, würden die Strombereitstellungskosten steigen – auch wegen der dann erforderlichen zusätzlichen Stromspeicher.

Für die Bereitstellung von Regel- und Ausgleichsenergie in elektrischen Netzen werden in Zukunft sogenannte Residuallast-Kraftwerke benötigt, die den Differenzbedarf zwischen den fluktuierenden Stromquellen und der aktuellen Last abdecken. Im Gegensatz zu Grundlastkraftwerken sind ihre Laufzeiten kurz (z. B. 1000 Volllast-Betriebsstunden/a). Die Anforderungen an die zeitliche Dynamik der Leistungsbereitstellung sind jedoch sehr hoch. Dafür eignen sich z. B. Gasturbinen-Spitzenlastkraftwerke. Völlig neue Perspektiven ergeben sich über die koordinierte Erzeugung verteilter KWK-Anlagen als so genannte virtuelle Kraftwerke. Dabei wird auf der Basis geeigneter Kommunikationseinrichtungen eine Vielzahl kleiner KWK-Anlagen dann aktiviert, wenn der entsprechende Leistungsbedarf im elektrischen Netz besteht. Die Entkopplung zum zeitlich unterschiedlichen Wärmebedarf lässt sich durch thermische Speicher realisieren. In Ausnahmefällen kann ein derartiges virtuelles Kraftwerk auch dann in Betrieb genommen werden, wenn kein Wärmebedarf besteht.

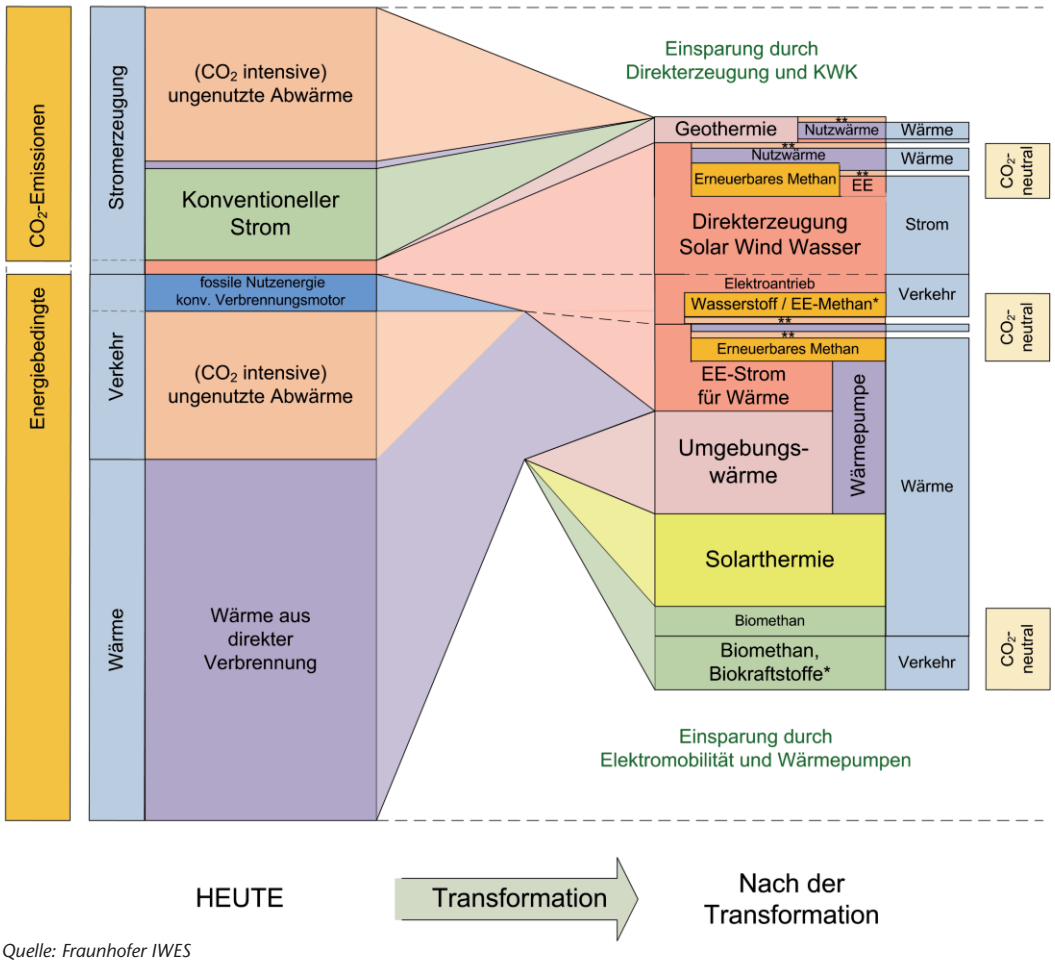
2. Transformation des heutigen Energiesystems zum nachhaltigen Energiesystem 2050

Der Umbau des Energiesystems in Deutschland und in Europa hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung bedeutet eine tiefgreifende Veränderung der gegenwärtigen Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft, die sich evolutionär über vier Jahrzehnte erstrecken wird. Dabei sollte der Übergang vom heutigen Energiesystem zu dem in Kapitel 1 beschriebenen, nachhaltigen und weitgehend emissionsfreien System so gestaltet werden, dass technologische Fehlentwicklungen vermieden und die Versorgungssicherheit auch während der Transformationsphase gewährleistet ist (no regret strategy).

In *Abbildung 8* sind die wesentlichen Bausteine der Transformation des Energiesystems am Beispiel des Industrielands Deutschland zusammengefasst:

Der Primärenergiebedarf ohne den nicht-energetischen Anteil (wie Erdöl für die chemische Industrie) belief sich in Deutschland in 2005 auf 13,4 EJ, wovon 34 % auf den Stromsektor, 43 % auf den Wärmesektor und 23 % auf den Verkehr entfielen.

Wird der Endenergiebereich betrachtet, ergeben sich andere Verhältnisse: der Stromanteil wird



Quelle: Fraunhofer IWES

Abbildung 8
Darstellung der Gesamtenergietransformation von heute zum Energiesystem 2050. Die keilförmigen Flächen in Grafikmitte symbolisieren den schrittweisen Übergang vom heutigen Energiemix zum zukünftigen.

Die Grafik fußt auf dem Mengengerüst für das 100 %-EE-Szenario 2050 (Kapitel 2.5.1)

** = können auch andere regenerative Kraftstoffe wie z. B. erneuerbares Kerosin sein*
*** = ungenützte CO_2-neutrale Abwärme*

Quelle: Fraunhofer IWES
Angepasst nach [17, 26] und [7] unter Verwendung von Daten des BMWI [31] und Kapitel 2.6

kleiner (18 %) und die beiden anderen Bereiche entsprechend größer (Wärme 54 %, Verkehr 28 %). Im Verkehr wird zwar auch heute schon Strom eingesetzt, der derzeit jedoch nur einen Anteil von 2 % im Verkehrssektor ausmacht und daher in der Darstellung nicht berücksichtigt wird.

Zukünftig soll die Direktverbrennung für die Wärmenutzung durch Wärme aus KWK, aus Solarthermie und aus mit regenerativem Strom versorgten Elektro-Wärmepumpen ersetzt werden.

Der Wärmeanteil, der aus Strom gewonnen wird, einschließlich der Wärme aus der KWK, ist im Diagramm in der Stromerzeugung enthalten. Strom soll hauptsächlich aus der Direkterzeugung durch Solar-, Wasser- und Windenergie gewonnen werden. Für das Lastmanagement der fluktuierenden Energiequellen sollen neben einem massiv ausgebauten Stromtransport- und -verteilungsnetz und der Anbindung von Speicherkraftwerken (Pumpspeicher, Druckluft, Wasserstoff oder erneuerbares Methan im Erdgasnetz) sowohl der Verkehrssektor (elektrisch angetriebene Fahrzeuge) als auch die Wärmenutzung über Wärmepumpen zur Verfügung stehen, welche über ein breit ausgebautes Informationsnetz angebunden sind (smart grid). Zusammen soll die Stromnutzung im Wärme- und Verkehrssektor 25 % der elektrischen Energieversorgung betragen. Bis 2050 ist eine solche Transformation vorstellbar.

2.1 Strukturwandel im Raumwärmesektor

Auf den Betrieb von Gebäuden entfallen rund 40 % des Endenergieverbrauchs, das macht sie zu einem der wesentlichen Sektoren, die zum Energieverbrauch Deutschlands beitragen. Um das Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung und die notwendigen klimapolitischen Ziele zu erreichen, besteht deshalb die Notwendigkeit einer Reduzierung des Energiebedarfs für Heizung und Klimatisierung von Gebäuden sowie einer zunehmenden Deckung ihres verbleibenden Energiebedarfs mit erneuerbaren Energien.

Da im Gebäudebereich besonders viel Energie eingespart werden kann, folgt, dass die Ziele der Bundesregierung zur Energieeffizienz vor allem im Gebäudebereich bzw. im Raumwärmebereich erreicht oder verloren werden [30]. Neubauten müssen kurzfristig als Plusenergiehäuser umgesetzt und der Gebäudebestand auf ein Niedrigenergiehausniveau gebracht werden. Hierdurch lassen sich in Deutschland Verbrauchsminderungen herbeiführen, die die 2008 erzielten Beiträge aus erneuerbaren Energien um den Faktor 3 bis 4 übersteigen.

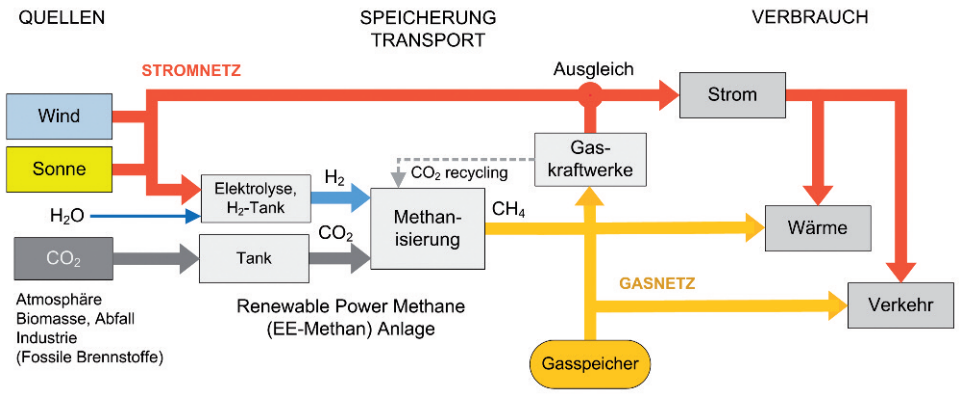
Das Energiekonzept 2050 stellt fest, dass bis 2050 der Raumwärmesektor einen gravierenden Strukturwandel durchlaufen muss.

2.2 Von der Erdgasversorgung zum erneuerbaren Methan

Wie in Abschnitt 1.2.3.2 bereits ausgeführt, kann aus den erneuerbaren Energieüberschüssen neben Wasserstoff auch erneuerbares Methan erzeugt werden. Darin ist ein Paradigmenwechsel in der Philosophie der Energiespeicherung zu sehen. Denn so kann erneuerbarer Strom in großer Menge chemisch gespeichert, im vorhandenen Erdgasnetz gespeichert und je nach Bedarfsanforderung wieder zu Strom, Wärme oder Kraftstoff umgewandelt werden. Für die Rückverstromung bieten sich GuD-Kraftwerke mit elektrischen Wirkungsgraden von bis zu 60 % an.

Mit dem Ausbau der zunächst erdgasbasierten Kraftwerke und der Kraft-Wärme-Kopplung kann sofort begonnen werden. Der zunächst zunehmende Bedarf an fossilem Erdgas wird mittelfristig kompensiert durch die Reduktion der gasverbrauchenden Gebäudeheizungen und deren Substitution durch Kraft-Wärme-Kopplung und elektrische Wärmepumpen.

Dabei geht das Energiekonzept 2050 davon aus, dass die Gesamtnachfrage nach Erdgas bereits bis 2020 um 10 % sinkt [9]. Langfristig wird der Erdgasbedarf durch dessen zunehmende Substitution mit nachhaltig erzeugtem Biomethan und mit erneuerbarem Methan aus elektrischen Überschüssen gegen Null gehen. Dies bedeutet,



Quelle: Fraunhofer IWES (Sterner) und ZSW (Specht)

Abbildung 9
Speicherung von Strom aus Sonne und Wind durch die Herstellung von Methan und dessen anschließender Speicherung. Durch eine bidirektionale Kopplung von Gas- und Stromnetz mit Anbindung an den Verbrauchssektor Mobilität bildet Methan einen indirekten Stromspeicher.

Quelle: Fraunhofer IWES (Sterner) und ZSW (Specht) [14; 26;32]

dass auch das bestehende Erdgasnetz an die sich ändernden Standorte zukünftiger Quellen angepasst werden muss. Wie beim elektrischen Netz wird auch das Gasnetz – im Gegensatz zu heute – wechselnde Durchflussrichtungen verarbeiten können. Dafür sind neue Management-Strategien notwendig (smart grids). Der zurzeit stattfindende Ausbau von Flüssiggas-Terminals sollte weiterhin forciert werden, um die Aufnahmefähigkeit von aus Wind- und Solarstrom-Überschüssen an besonders günstigen Standorten erzeugtem Wasserstoff oder Methan zu ermöglichen.

2.3 Flexible energetische und stoffstromorientierte Nutzungsstrategien für Biomasse

Biomasse kann für die Energieversorgung der Zukunft einen wichtigen Beitrag leisten, denn sie hat das Potenzial, eine besondere Rolle im Konzert der erneuerbaren Energien zu spielen. Sie gehört zu den heimischen Ressourcen und sie steht der energetischen Nutzung – im Rahmen definierter Potenziale – bedarfsgerecht zur Verfügung. Damit zählt sie zu den Energieträgern, die in vielfältiger Weise fluktuierende erneuerbare Energieströmen ausgleichen und so als Regelenergie zwischen Angebot und Nachfrage eingesetzt werden können. Besonders aussichtsreich sind hierbei neuartige Konversionstechnologien, mit denen Strom und Wärme (durch Co-Generation) sowie zusätzlich Kraftstoffe (durch Poly-Generation) erzeugt werden. Eine energetische Nutzung von Biomasse mit einer Bereitstellungseffizienz von mehr als 70 % ist vor diesem Hintergrund möglich. Diese Technologien sind somit für den Übergang von der Versorgung mit fossilen Energien in eine Zukunft mit Erneuerbaren unverzichtbar. Dies zeigen unter anderem zahlreiche Projekte zum Ausbau von Bioenergiedörfern.

Während die Biomasse-Reststoffe – allerdings mit einem limitierten Potenzial – weitestgehend unkritisch zur Verfügung stehen und im Rahmen effizienter Nutzungsketten auch langfristig energetisch verwertet werden können, stehen Anbau-Biomassen in Form von Energiepflanzen zukünftig – sowohl im nationalen als auch im globalen Kontext – verstärkt in Konkurrenz zu alternativen Nutzungen (Nahrungsmittel, Ausgangsmaterialien für Bioraffinerien, etc.). Zukünftig sind somit im Bereich der Biomasse differenzierte, stoffstromorientierte Strategien zu verfolgen, welche stringent an Effizienzkriterien, Ausbauerfolgen anderer erneuerbarer Energieträger sowie an der spezifischen Ressourcennachfrage auszurichten sind.

Das Leitszenario 2009 [9] diagnostiziert vor diesem Hintergrund, dass „unter der Voraussetzung einer wesentlich effizienteren Nutzung von Kraftstoffen die Einführung biogener Kraftstoffe dann eine empfehlenswerte Übergangs-

strategie ist, wenn die Nachhaltigkeitskriterien eingehalten werden, die u. a. in der Biomasse strategie des BMU definiert sind. Aus „ökologischen" inländischen Potenzialen steht in der vorgenommenen Nutzungsaufteilung für den Verkehrssektor eine verfügbare Anbaufläche für Biokraftstoffe von maximal 2,35 Mio. ha zur Verfügung. Vor dem Hintergrund der aktuellen Rahmenbedingungen hinsichtlich Biokraftstoffquote und Besteuerung wird bis 2020 ein Anteil von Biokraftstoffen am gesamten Kraftstoffverbrauch von knapp 10 % angesetzt."

Biogas kann bis 2050 zunehmend ersetzt werden durch erneuerbares Methangas, das seinerseits in einer vergleichbaren flexiblen Weise eingesetzt werden kann. Langfristig sollte die Biomasse auch aus Gründen der CO_2-Bindung in Kaskadennutzungssysteme überführt werden, bei denen erst nach Ausschöpfung der stofflichen Nutzungsoptionen eine energetische Verwertung erfolgt.

2.4 Balance zentraler und dezentralen Energieversorgung

Die rasche Entwicklung dezentraler regionaler Energieversorgungskonzepte in Deutschland mobilisiert auch regionale Wirtschaftsstrukturen. Diese Umstrukturierung ist ein Motor des Wandels. Um die notwendigen energiepolitischen Impulse zu geben, muss auf die Balance zwischen Zentralität und Dezentralität in der Energieversorgung geachtet werden. Diese Balance wird wesentlich durch die zukünftigen Kostenstrukturen geprägt sein. Je kostengünstiger die Komponenten und Systeme zur Nutzung von erneuerbaren Energien sind, desto dezentraler wird ihr Einsatz ausfallen.

2.4.1 Netzmanagement von dezentralen Strom- und Wärmenetzen im Verbund mit großen, landesweiten und europäischen Netzen

Für die Nachhaltigkeit eines solchen Netzausbaus ist es notwendig, die zukünftige Entwicklung der erneuerbaren Energien und des gesamten europäischen Kraftwerksparks so genau wie möglich zu simulieren und zu analysieren. Weiter ist es erforderlich, dass neben dem Netzausbau ein leistungsfähiges, europaweites Monitoring den sicheren Netzbetrieb gewährleistet.

Schon 2020 „trägt Strom aus dem sich etablierenden europäischen erneuerbaren Energie-Stromverbund mit knapp 5 TWh/a bereits substantiell zur erneuerbaren Energie-Stromerzeugung Deutschlands bei. Wegen günstiger Stromgestehungskosten um 6,5 – 7 ct2005/-kWh wächst die Stromlieferung aus dem europäischen Stromverbund (Windenergie und solarthermische Kraftwerke) nach 2020 deutlich, beläuft sich in 2030 bereits auf 41 TWh/a und steigt bis 2050 auf 123 TWh/a. Dies entspricht 20 % der gesamten Bruttostromerzeugung" [9].

Gelingt der Ausbau dieses transeuropäischen Supernetzes nicht rechtzeitig oder nicht vollständig, müssen im nationalen Rahmen einerseits Stromüberschüsse aus erneuerbaren Energien gespeichert werden und andererseits Stromlücken durch Residuallast-Kraftwerke aufgefangen werden. Im Gegensatz zu bisher eingesetzten Grund- bzw. Mittellastkraftwerken sind das schnell reagierende Gaskraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung und virtuell vernetzbare Kleinstsysteme wie Blockheizkraftwerke, Mikroturbinen und Brennstoffzellen. Elektrische Energiespeicher, wie sie oft vorgeschlagen werden, könnten im Prinzip diesen Ausgleich ebenfalls leisten, sie sind jedoch auf absehbare Zeit gegenüber starken Netzen bzw. Residuallast-Kraftwerken vermutlich nicht konkurrenzfähig. Mittel- bis langfristig können aber elektrochemische Energiespeicher wie Hochtemperatur- und Redox-Flow-Batterien einen Beitrag leisten [33].

2.4.2 Wie können Systemkonflikte vermieden werden?

Die heutigen Großkraftwerke sind ungeeignet, fluktuierende Ströme aus erneuerbaren Energien auszugleichen, denn sie können die dafür erforderlichen großen Leistungsänderungen nicht abbilden. Häufige und große Laständerungen reduzieren bei Großkraftwerken wegen der dabei auftretenden zusätzlichen Materialspannungen die Lebensdauer und damit auch deren Wirtschaftlichkeit.

Mit anderen Worten, wenn die Vorrangigkeit der Einspeisung erneuerbarer Energien erhalten bleibt, dann werden herkömmliche Grundlastkraftwerke zunehmend ungeeignet, die Residuallast aufzubringen. Geeignete Kraftwerkstypen dafür sind dann: Gaskraftwerke und Kraft-Wärmekopplungsanlagen (Motor-Generatoren, Mikroturbinen, Brennstoffzellen), die über Kommunikationseinrichtungen gesteuert werden können.

Die Konsequenzen, die sich aus der Forderung nach schnell reagierenden Kraftwerken ergeben, sind gravierend: Sie bedeuten, dass Großkraftwerke jeder Art für die zukünftigen Versorgungsstrukturen ungeeignet sind, wenn die fluktuierenden erneuerbaren Energien den Hauptanteil der Versorgung übernehmen sollen. Das bedeutet nicht nur, dass dann weder Kernkraftwerke, noch Fusionskraftwerke, noch Kohlekraftwerke eingesetzt werden können, sondern auch, dass die gegenwärtigen Ansätze der CO_2-Abscheidung und Speicherung bei der Kohleverstromung (CCS) nicht nur aus rein wirtschaftlichen sondern auch aus systemischen Gründen in eine verkehrte Richtung führen.

2.5 Kosten und Nutzen des Umbaus der Energieversorgung

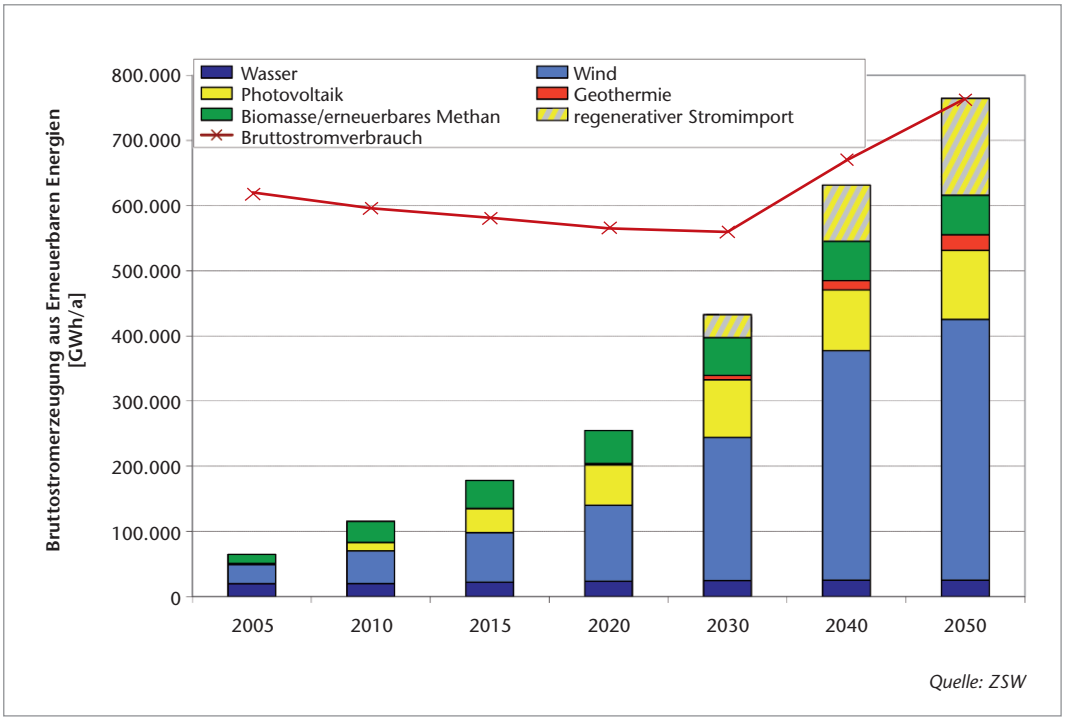
Das vorliegende Energiekonzept 2050 geht davon aus, dass bis zum Jahr 2050 die Transformation zu einem vollständig auf der Nutzung erneuerbarer Energiequellen basierten Energiesystem gelingt. Die Tragfähigkeit dieses Ansatzes wird vor dem Hintergrund der mit der Systemtransformation verbundenen Kosten häufig in Frage gestellt. Dabei wird in der Regel außer acht gelassen, dass durch die Rohstoffverknappung die fossilen Energieträger zunehmend teurer werden, während die erneuerbaren Energien sich noch in der technologischen Entwicklung befinden und durch erhebliche Lern- und Erfahrungseffekte deren Kosten kontinuierlich weiter absinken. Um aufzuzeigen, dass ein 100 %-Erneuerbare-Energien-Szenario für Deutschland in 2050 nicht nur potenzialseitig möglich und technologisch machbar ist, sondern auch zu vertretbaren Kosten umgesetzt werden kann, wird im folgenden ein mögliches Mengengerüst skizziert (2.5.1) und mithilfe einer Differenzkostenbetrachtung (2.5.2) werden die erneuerbaren Energien mit den fossilen Energieträgern verglichen. Die Differenzkostenbetrachtung beschränkt sich auf Bereitstellungstechnologien für Strom, Gas und Wärme aus solar- und geothermischen Quellen. Nicht enthalten sind eventuell anfallende Mehrkosten für die verstärkte Einführung der KWK und von elektrischen Wärmepumpen. Auch Mehrkosten für den erforderlichen Netzausbau sind in dieser Betrachtung, ebenso wie die durch den notwendigen Ausbau der Stromspeicherung entstehenden Mehrkosten nicht enthalten. Diese Mehrkosten liegen jedoch auf jeden Fall unterhalb der Summe für die Einsparungen, die sich aus der Bereitstellung erneuerbarer Energien im Vergleich zu konventionellen Alternativen bis zur Mitte des Jahrhunderts ergeben.

2.5.1 Mengengerüst für 100%-EE-Szenario 2050

Das hier skizzierte, mögliche Mengengerüst für das Energieszenario 2050 berücksichtigt die Bereiche Stromerzeugung, Nutzwärmebereitstellung und Endenergiebedarf des Verkehrs. In allen drei Sektoren wird bis zum Jahr 2050 ein Anteil von 100% erneuerbaren Energien erreicht. Hier sei darauf hingewiesen, dass das vorgestellte Mengengerüst nur einen möglichen Entwicklungspfad hin zu einer rein regenerativen Energieversorgung darstellt und als eine Lösungsoption von vielen für eine erneuerbare Energieversorgung gesehen werden kann. Dabei ist das 100 %-EE-Ziel ein sehr robustes Ziel, denn auch wenn eine bestimmte Technologie nicht das im Mengengerüst angegebene Ausbauziel erreicht, bieten die erneuerbaren Energien genügend technologische Vielfalt, dass der ausfallende Anteil von einer oder mehreren Alternativtechnologien aufgefangen werden kann. Das hier aufgezeigte Mengengerüst ist derart gestaltet, rechnerisch den gesamten Jahresenergiebedarf Deutschlands zu decken, es wird jedoch hiermit keine Autarkie der deutschen Energieversorgung angestrebt. Deutschland ist insbesondere in der Stromversorgung als Teil eines europäischen Verbundnetzes zu sehen, wodurch die zu installierende Speicherkapazität und -leistung auf ein Minimum begrenzt werden kann. Eine Spezifizierung der einzusetzenden Speichertechnologien wird hier nicht vorgenommen.

Abbildung 10
Entwicklung der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien und des Bruttostromverbrauchs in Deutschland bis 2050.

Quelle: ZSW



Für die Entwicklung des Mengengerüsts im Strom- und Wärmesektor diente zunächst das Leitszenario des DLR [8, 9] als Grundlage, im Verkehrssektor erfolgte die Orientierung bedarfsseitig an der WWF-Studie [11]. Die Forderung einer 100 % regenerativen Energieversorgung macht im Vergleich zum zugrunde liegenden Leitszenario 2009 höhere Ausbauraten bei unterschiedlichen Technologien erforderlich. Berücksichtigt wurde hierbei auch der aus dem Ausbau strombasierter Energiebereitstellung in den Bereichen Wärme und Verkehr resultierende Anstieg der Stromnachfrage.

Die vollständige Nutzwärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien wird im Vergleich zum Leitszenario durch einen wesentlich höheren Durchdringungsgrad der elektrischen Wärmepumpen, durch einen höheren Anteil der Solarthermie und nicht zuletzt durch die Unterstellung eines stärkeren Bedarfsrückgangs durch Effizienzmaßnahmen erreicht. Im Vergleich mit den in der WWF-Studie genannten Zielwerten für den Wärmesektor wurde jedoch von geringeren Steigerungsraten im Effizienz- und Sanierungsbereich ausgegangen, so dass der angesetzte Nutzwärmebedarf in 2050 zwischen den im Leitszenario 2009 und in der WWF-Studie genannten Werten liegt.

Im Verkehrsbereich wird im Vergleich zum Ausgangszenario des WWF eine wesentlich stärkere Durchdringung der Elektromobilität, insbesondere im Personenverkehr, unterstellt.

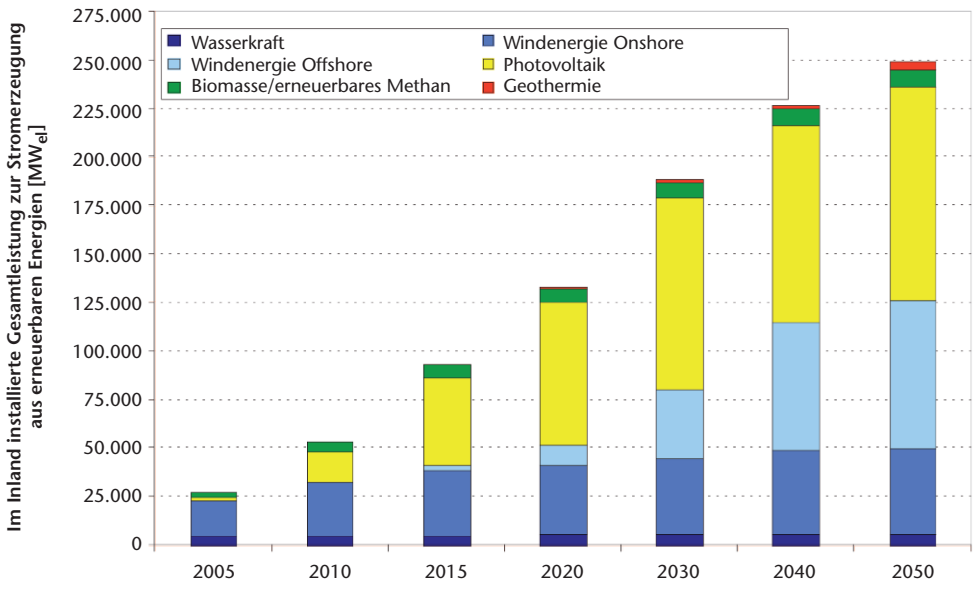
Eine bedeutende Rolle kommt der Nutzung von Überschussstrom aus Wind- und Solarkraftwerken zu: Mit den verfügbaren Stromüberschüssen sollen Wasserstoff bzw. zukünftig erneuerbares Methan oder andere erneuerbare Kraftstoffe erzeugt werden, wodurch die Stromüberschüsse auch über längere Zeiträume speicherfähig werden. Ein Import von auf diese Weise erzeugten Wind- und Solarkraftstoffen ist ebenfalls denkbar. Diese Verknüpfung des Strom- und des Erdgasnetzes und die resultierende Möglichkeit der Nutzung des Erdgasnetzes als Speicher erleichtern das Erreichen des 100 %-EE-Ziels erheblich. Es kann bei Bedarf rückverstromt, als Energiequelle zur Deckung des Wärmebedarfs herangezogen oder im Verkehrssektor eingesetzt werden.

In *Abbildung 10* ist die Entwicklung der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 2005 bis 2050 sowie die erwartete Entwicklung des Bruttostromverbrauchs dargestellt. Im Vergleich zum Leitszenario 2009 muss ein höherer Strombedarf gedeckt werden. Dieser resultiert aus dem erhöhten Einsatz von elektrisch betrie-

benen Wärmepumpen in der Wärmebereitstellung und aus einem wesentlich höheren Elektrifizierungsgrad des Verkehrssektors. Die Wasserstoffbereitstellung für den Verkehrssektor entspricht dagegen dem im Leitszenario 2008 [8] prognostizierten Ausbaupfad. Für seine Bereitstellung wird insbesondere der anfallende Überschussstrom genutzt. Darüber hinausgehende Stromüberschüsse werden ebenfalls zunächst in Wasserstoff und gegebenenfalls durch die erwähnte weitere Umwandlungsstufe in erneuerbares Methan überführt. Falls es gelingt, die Gas- und Öl-Infrastruktur auf Wasserstoff umzustellen, kann Wasserstoff auch direkt genutzt werden.

Der höhere Strombedarf wird durch einen stärkeren Ausbau im Offshore-Wind-Bereich und der Photovoltaik sowie durch eine Erhöhung des Importanteils kompensiert. Bis zum Jahr 2020 kann der Ausbau allein im Inland erfolgen. Erst danach ist der Import von regenerativem Strom erforderlich. Dies schafft unter anderem den nötigen zeitlichen Spielraum für den Ausbau des europäischen Verbundnetzes. Insgesamt werden im Jahr 2050 ca. 764 TWh Strom aus regenerativen Energien bereitgestellt und damit eine vollständige Deckung des Bruttostromverbrauchs durch erneuerbare Energien erreicht. Die Höhe des Strombedarfs liegt leicht oberhalb der Ergebnisse des SRU-Gutachtens [10], das bei einer starken Elektrifizierung des Verkehrssektors von einem Strombedarf von 700 TWh, der auch potenzialseitig in Deutschland zu 100 % aus erneuerbaren Energien gedeckt werden kann, ausgeht.

Im skizzierten Mengengerüst für das Szenario des Energiekonzepts 2050, das nur einen möglichen Pfad für eine 100 % Versorgung mit erneuerbaren Energien darstellt, hat die Stromerzeugung aus Wind – dabei Offshore-Wind mit einem Anteil von ca. 38 % – die größte Bedeutung. Ebenso entwickelt sich die Photovoltaik zu einer wichtigen Säule der Stromerzeugung und produziert im Jahr 2050 knapp 15 % des Strombedarfs, womit die Photovoltaik einen größeren Beitrag leistet, als die Windenergienutzung an Land. Auch der regenerative Stromimport kann zu einem großen Teil aus Photovoltaik und solarthermischen Kraftwerken kommen (gelb-grau schraffierter Säulenbereich – siehe *Abbildung 10*), wodurch bis zu 25 % Solarstrom im deutschen Stromnetz erreicht werden können. Die große Bedeutung der Photovoltaik zeigt sich auch in *Abbildung 11*, aus der die zur Erzeugung der



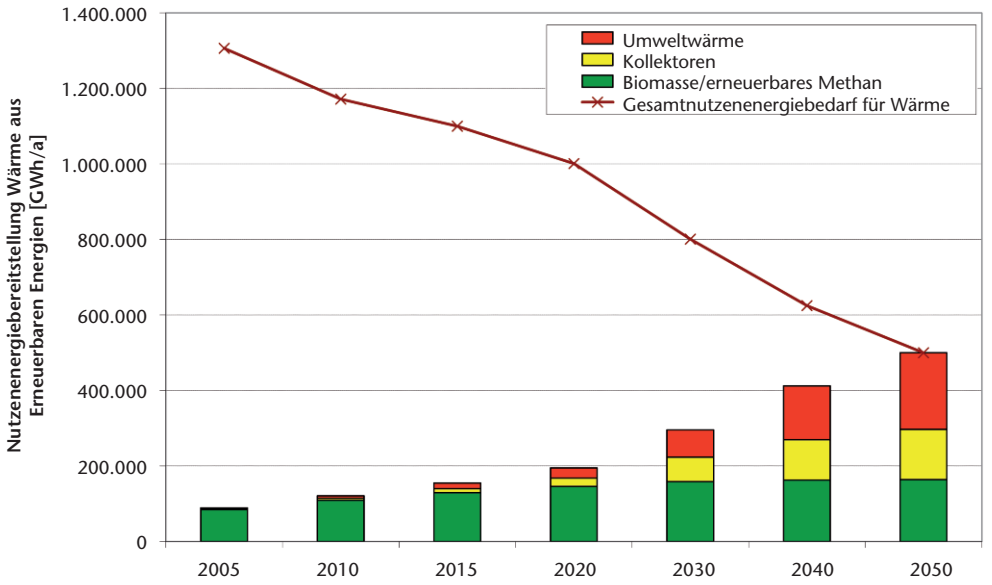
Quelle: ZSW

Abbildung 11
Entwicklung der in Deutschland installierten Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis 2050.

Quelle: ZSW

Abbildung 12
Entwicklung der Nutzenergiebereitstellung für Wärme aus erneuerbaren Energien und des Gesamtnutzenergiebedarfs für Wärme in Deutschland bis 2050.

Quelle: ZSW



Quelle: ZSW

dargestellten Strommengen benötigten installierten Leistungen ersichtlich sind. Auch der Stromaustausch innerhalb des europäischen Verbundnetzes sowie der Import von Regenerativstrom spielt eine wichtige Rolle. Insgesamt werden 2050 knapp 20 % des benötigten Stroms aus dem Ausland importiert.

Im Wärmebereich geht das Leitszenario 2009 auch in 2050 lediglich von einem Deckungsanteil der erneuerbaren Energien von ca. 50 % aus. Um eine 100 %-Versorgung mittels regenerativen Energien bis zum Jahr 2050 realisieren zu können, muss deshalb zunächst der Energieverbrauch für Wärme durch stärkere Energieeffizienzmaßnahmen, vor allem im Gebäudebestand, stärker abgesenkt werden. Die angesetzte Effizienzsteigerung ist größer als in der Leitstudie 2009 [9], verfolgt aber einen weniger ambitionierten Wachstumspfad als in der WWF-Studie im Szenario „Innovation“ zugrunde gelegt ist.

Neben der Reduktion des Nutzenergiebedarfs für Wärme erfolgt im Energiekonzept 2050 ein verstärkter Ausbau der Solarthermie und elektrisch betriebener Wärmepumpen. Der Einsatz von Biomasse wird bis zu dem Grad sukzessive ersetzt, in dem Wasserstoff bzw. erneuerbares Methan aus Überschussstrom zur Verfügung steht. Die Wärmeerzeugung erfolgt dabei vorrangig in dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, die zum Ausgleich von Fluktuationen in der Stromerzeugung eine wichtige Funktion übernehmen.

Insgesamt werden in 2050 rund 500 TWh Wärme aus erneuerbaren Energien erzeugt. Mit einem sehr ambitionierten, aber realisierbaren Ausbaupfad für die Solarthermie, wird diese in betrachtetem Mengengerüst etwa 27 % der benötigten Wärme erzeugen. Außerdem wird zur Deckung des Wärmebedarfs vor allem in Bestandsgebäuden ab 2030 vermehrt auf Wärmepumpen gesetzt, wodurch im Jahr 2050 die Umweltwärme etwa 40 % des Wärmebedarfs bereitstellt. Biomasse bzw. erneuerbares Methan stellen einen Anteil von 33 % wie in *Abbildung 12* gezeigt.

Für die Entwicklung im Verkehrsbereich dient die WWF-Studie [11] als Grundlage für das Mengengerüst: sie prognostiziert, dass in 2050 im Verkehrsbereich keine fossilen Energieträger mehr eingesetzt werden und diese sukzessive durch erneuerbare Energien, vorrangig Biomasse, substituiert werden (z. B. Biodiesel, Benzin aus Biomasse, Kerosin). Das Energiekon-

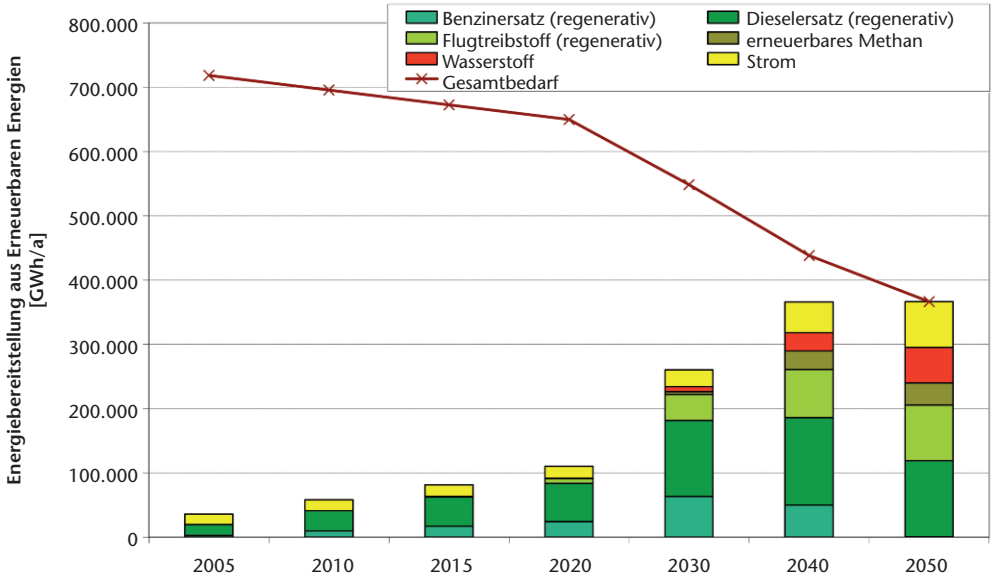


Abbildung 13
Entwicklung des Endenergiebedarfs des Verkehrs aus erneuerbaren Energien und des Gesamtendenergiebedarfs für den Verkehr in Deutschland bis 2050.

Quelle: ZSW

zept 2050 weicht hiervon insofern ab, als dass für den Personenstraßenverkehr angenommen wird, dass er bis 2050 vollständig auf batterieelektrisch-betriebene Fahrzeuge und Brennstoffzellenautos, die mit Wasserstoff bzw. Methan betrieben werden, umgestellt ist. Es wird dabei davon ausgegangen, dass sowohl Benzin- als auch Dieselfahrzeuge ersetzt werden. Auch im Güterverkehr werden einzelne Anteile durch wasserstoff- oder methanbetriebene Fahrzeuge ersetzt. Dies nicht zuletzt auch deshalb, weil die Reservierung des gesamten deutschen Biomasseaufkommens für den Verkehrssektor, wie in der WWF-Studie erfolgt, aus Sicht des Energiekonzepts 2050 aus Gründen der Nachhaltigkeit und der prioritären Nutzung von Biomasse für stoffliche Zwecke nicht realistisch erscheint. Die verbleibenden für den Güter-, Schiffs- und Flugverkehr benötigten Kraftstoffe werden analog zur WWF-Studie bis zum Jahr 2050 vollständig durch Kraftstoffe biogener Herkunft bzw. aus Überschuss-Strom gewonnenen Energieträger ersetzt.

Abbildung 13 stellt eine mögliche Entwicklung der Energieträger im Verkehrssektor bis 2050 dar. Die Entwicklung im Verkehrssektor ist besonders schwer prognostizierbar, da die Produktion von Biomasse im Inland Restriktionen unterworfen ist und ein nicht unerheblicher Anteil aus dem Ausland importiert werden müsste. Alternativ bzw. ergänzend ist der Einsatz von Kraftstoffen aus Strom-Überschüssen zu berücksichtigen.

2.5.2 Differenzkosten für 100%-EE-Szenario 2050

Die Umstellung der drei Sektoren Strom, Wärme und Verkehr auf erneuerbare Energien erzeugt im Vergleich zu den anlegbaren Energiepreisen auf der Basis der herkömmlichen Energieversorgung zunächst Mehrkosten, die hier als Differenzkosten jeweils für die einzelnen Sektoren ausgewiesen werden. Die durch die heute noch über den Preisen von fossilen Energieträgern liegenden Mehrkosten für die erneuerbaren Energien sinken durch Lern- und Erfahrungseffekte im Zeitverlauf bis schließlich der Break-Even-Punkt mit den fossilen Energieträgern erreicht ist. Ab diesem Zeitpunkt werden die Differenzkosten negativ, d. h., durch den Einsatz erneuerbarer Energien können gegenüber einer Nutzung fossiler Brennstoffe Kosten eingespart werden.

Die Differenzkostenermittlung erfolgt hier auf Kostenbasis, d. h., die Energiegestehungskosten der erneuerbaren Energien werden mit den durchschnittlichen Stromgestehungskosten des

fossilen Kraftwerksmixes inklusive Wärmegutschriften[11], mit fossilen Wärmepreisen und mit Kraftstoffpreisen (ohne Steuern) verglichen.

Diese Differenzkosten liegen im Strombereich etwas höher als die EEG-Differenzkosten und unterscheiden sich im Einzelnen, da die Vergütungssätze des EEG generell nicht mit den reinen Stromgestehungskosten identisch sind. Es wird die gesamte Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien betrachtet, das heißt insbesondere, die „alte" Wasserkraft aus größeren Kraftwerken wird miteinbezogen. Sie gehört zu den günstigsten Stromerzeugungsquellen und bewirkt bereits heute „negative" Differenzkosten im Vergleich zu anlegbaren Strompreisen.

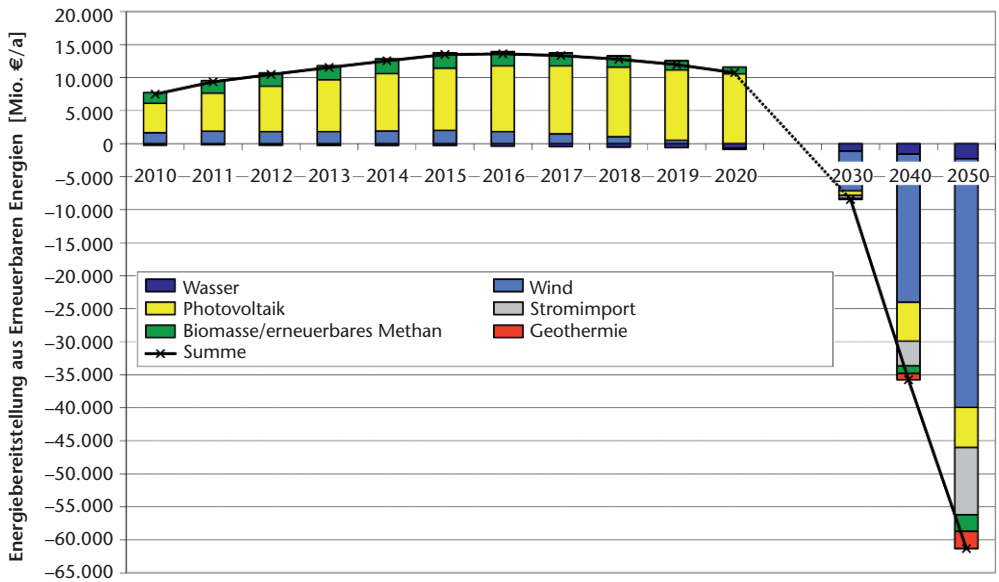
Die Basis zur Ermittlung der Differenzkosten ist die Leitstudie 2008 [8]: einerseits die getroffenen Annahmen für die zukünftige Kostenentwicklung der erneuerbaren Energien-Technologien und andererseits die dortigen Preisszenarien für die Entwicklung der fossilen Energiepreise und der Preise von CO_2-Zertifikaten. Diesbezüglich sind für die Leitstudie 2010 leichte Anpassungen aufgrund der aktuellen wirtschaftlichen Lage in Arbeit, die hier bereits miteinbezogen wurden.

11 Vergütung für Abwärme insbesondere für Biomasse KWK-Anlagen

Diese betreffen aber eher die Kurzfristbetrachtung als die Langfristwirkungen.
Bei der sektorspezifischen Kostenbetrachtung werden zunächst die wichtigsten zugrunde liegenden Annahmen jeweils noch einmal zusammengefasst vorangestellt, um die nötige Transparenz zu schaffen.

2.5.2.1 Differenzkosten der Stromerzeugung

- Die Differenzkosten der gesamten EE-Stromerzeugung sind auf Basis der Stromgestehungskosten der einzelnen Technologien und deren jeweiligem Anteil am erneuerbaren Stromerzeugungsmix berechnet. Durchschnittlich steigen die mittleren Stromkosten für den erneuerbaren Erzeugungsmix von heute 11,5 ct/kWh zunächst auf 13,1 ct/kWh in 2015, womit sie ihr Maximum erreichen. Danach sinken sie kontinuierlich ab. In 2020 liegen sie mit 12,1 ct/kWh noch über dem heutigen Wert. Danach sinken sie deutlich auf 7,6 ct/kWh in 2030, 6,4 ct/kWh in 2040 und 6,3 ct/kWh in 2050.
- Ab 2020 wird die im Preispfad A der Leitstudie 2008 angegebene Energiepreisentwicklung angesetzt.
- Da für den neuen Technologiepfad der Erzeugung von erneuerbarem Methan noch keine verlässlichen Daten zur Verfügung stehen, werden die hierfür entstehenden



Quelle: ZSW

Abbildung 14
Entwicklung der Differenzkosten der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland von 2010 bis 2050.

Quelle: ZSW

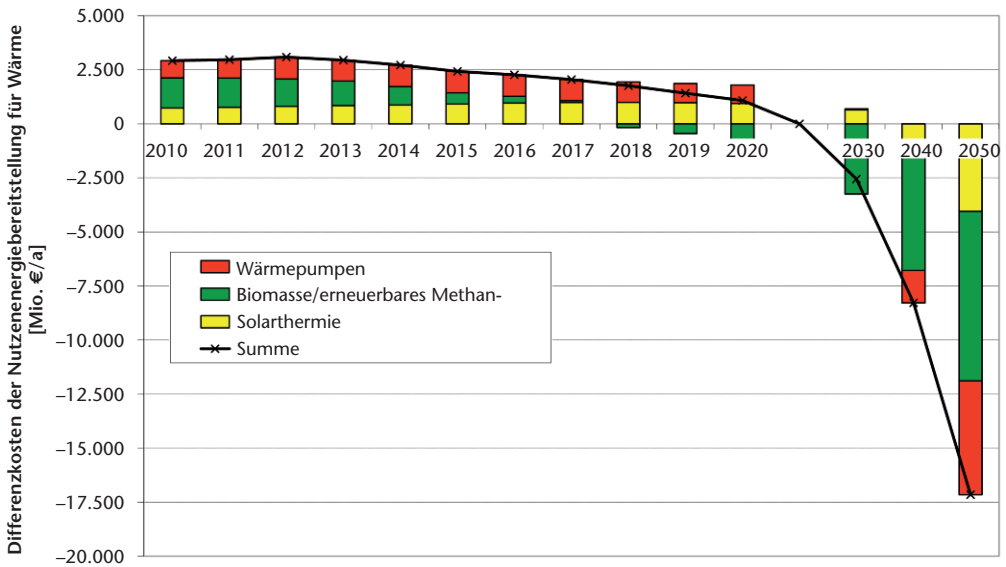


Abbildung 15
Entwicklung der Differenzkosten der erneuerbaren Nutzwärmebereitstellung in Deutschland von 2010 bis 2050.

Quelle: ZSW

Differenzkosten denen der Biomasse gleichgesetzt. Dies stellt eine gewisse Unschärfe in der Kostenbetrachtung dar. Da die Differenzkosten der Stromerzeugung aus Biomasse vergleichsweise hoch sind, handelt es sich hierbei tendenziell eher um eine Überschätzung als um eine Unterschätzung der resultierenden Differenzkosten.

Durch die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien entstehen in Deutschland im Jahr 2010 voraussichtlich Differenzkosten in Höhe von etwa 7,5 Mrd. Euro. Durch den verstärkten Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung werden die jährlichen Differenzkosten zunächst weiter ansteigen. Sie erreichen mit ca. 13,6 Mrd. Euro ihr Maximum im Jahr 2016. Danach sind sie rückläufig. In 2020 betragen sie noch 10,7 Mrd. Euro. Nach Erreichen des Differenzkostenmaximums nehmen die jährlichen Differenzkosten kontinuierlich ab.

Zwischen 2020 und 2030 erreicht der Mix erneuerbarer Energien den Break-Even-Punkt mit den fossilen Energieträgern. Für die Einzeltechnologien ist dabei der Zeitpunkt des Erreichens des Schnittpunkts mit der Kostenkurve der fossilen Energieträger sehr unterschiedlich. So erzielt beispielsweise die Windkraft bereits 2020 Kosteneinsparungen gegenüber den fossilen Energieträgern, während dies bei der Photovoltaik erst 2030 der Fall sein wird. Im Jahr 2050 wird schließlich eine Kostenersparnis von ca. 61,3 Mrd. Euro erreicht.

Insgesamt werden im Zeitraum 2010 bis 2050 durch die Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung Kosten in Höhe von 567 Mrd. Euro eingespart (*Abbildung 14*). Betrachtet man den Verlauf der Differenzkosten über die Jahre, so zeigt sich, dass die erneuerbaren Energien insgesamt mehr Kosten einsparen, als an Vorleistungen bis zum Erreichen des Break-Even-Punkts erbracht werden müssen. Dies bedeutet, dass der Ausbau der Nutzung der erneuerbaren Energien nicht nur im Sinne einer zukunftsorientierten Energiepolitik sondern auch ökonomisch sinnvoll ist.

2.5.2.2 Differenzkosten der Wärmeerzeugung

- Die Differenzkosten der gesamten Nutzwärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien sind auf Basis der Wärmegestehungskosten der einzelnen Technologien und deren jeweiligem Anteil am erneuerbaren Bereitstellungsmix berechnet.
- Ab 2020 wird die im Preispfad A der Leitstudie 2008 angegebene Energiepreisentwicklung angesetzt.

Im Wärmesektor entstehen im Jahr 2010 voraussichtlich Differenzkosten von ca. 2,9 Mrd. Euro. Bei einer Entwicklung der Nutzwärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien gemäß dem aufgezeigten Mengengerüst wird das Maximum der jährlichen Differenzkostensumme mit etwa 3,1 Mrd. Euro bereits im Jahr 2012 erreicht. Danach sinken die Differenzkosten kontinuierlich ab. In 2020 sind sie mit 1,1 Mrd. Euro noch positiv, während sie in 2030 mit -2,6 Mrd. Euro bereits deutlich im negativen Bereich sind. Hier sind also bereits deutliche Kosteneinsparungen zu verzeichnen. Diese steigen im Zeitraum nach 2030 erheblich an. Im Jahr 2050 ergeben sich Einsparungen in Höhe von ca. 17,2 Mrd. Euro.

Die Gesamtdifferenzkosten im Wärmebereich im Zeitraum von 2010 bis 2050 sind negativ, d. h., die Einsparungen überwiegen die Mehrkosten, die bis zum Erreichen des Break-Even-Punkts aufzuwenden sind. Die Gesamtersparnis für den Zeitraum von 2010 bis 2050 beträgt in Wärmesektor 163,1 Mrd. Euro.

2.5.2.3 Differenzkosten des Verkehrssektors

Mehrkosten im Verkehr resultieren für einen Übergangszeitraum aus der zunehmenden Nutzung von Biokraftstoffen und der Einführung von Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben. Maßgeblich dafür sind die Preisrelationen der relevanten Energieträger, die Kosten der Fahrzeuge und die Energiemengen im Vergleich zu einer Referenzentwicklung, die eine Entwicklung unter weitgehend unveränderten politischen Rahmenbedingungen beschreibt, wobei Mobilitätstrends und Effizienzsteigerungen fortgeschrieben werden. Im Unterschied zu Klimaschutzszenarien sind Veränderungen der Treibhausgasemissionen in diesem Fall Ergebnis und nicht Zielgröße. So gehen die CO_2-Emissionen des Verkehrs im Referenzszenario [11] zwischen 2005 und 2050 lediglich um 42 % zurück.

Die wesentlichen Kostenfaktoren für die hier verwendete Referenzentwicklung sind (in heutigen Preisen):

- Der Ölpreis beträgt im Jahr 2020 100 US$ je barrel und steigt in Anlehnung an [WWF 2009] bis zum Jahr 2050 auf 210 US$ je barrel.
- Die Kraftstoffpreise erhöhen sich korrespondierend dazu für Benzin (analog Dieselkraftstoff) auf 1,60 €/Liter bis 2020 und etwa 2,60 €/Liter im Jahr 2050.
- Die CO_2-Gutschriften für regenerative Kraftstoffe betragen 20 €/t CO_2 im Jahr 2020 und erhöhen sich linear auf 50 €/t CO_2 im Jahr 2050.

Für regenerativ erzeugte Kraftstoffe ist unter diesen Annahmen davon auszugehen, dass die Differenzkosten nach dem Jahr 2020 auf Null zurückgehen, da sie die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber unversteuertem Benzin und Dieselkraftstoff erreichen [9]. Für die Bilanzierung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Plug-In-Hybride und reine Elektrofahrzeuge) wird davon ausgegangen, dass sie sich überwiegend in privater Hand befinden und somit für den Betrieb der Fahrzeuge die Strompreise für private Haushalte anzusetzen sind. Im Einklang mit den Zielen des 100 %-Szenarios im Energiekonzept 2050 stammt dieser Strom ausschließlich aus regenerativen Quellen. Entsprechend der Kostenentwicklung des regenerativen Strommixes steigen die Preise bis 2020 auf 27 ct/kWh an und gehen anschließend leicht zurück. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass die Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren deutlich höher sind. Dies ist vor allem im Zuge der anstehenden Markteinführung von Bedeutung. Das Szenario sieht entsprechend des Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität der Bundesregierung vom August 2009 [34] vor, dass bis zum Jahr 2020 eine Million Elektrofahrzeuge und bis 2030 rund fünf Millionen Fahrzeuge betrieben werden. Die Mehrkosten dürften sich im Zuge der Weiterentwicklung von Komponenten und der Serienproduktion bis zum Jahr 2020 auf unter 5.000 € je Fahrzeug reduzieren lassen. Die deutlich geringeren Betriebskosten gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren können zu diesem Zeitpunkt allerdings die höheren Anschaffungskosten noch nicht vollständig kompensieren. Dies wird erst einige Jahre später der Fall sein. Unter Berücksichtigung der zu Beginn der Markteinführung noch deutlich höheren Mehrkosten ergeben sich für den gesamten Bestand an Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 Differenzkosten von etwa 400 Mio. €/a. Sie nehmen danach deutlich ab und schneiden um das Jahr 2030 die Nulllinie. Die bis dahin erbrachten Vorleistungen können anschließend aber in

Abbildung 16
Entwicklung der gesamten Differenzkosten aus den Bereichen Strom, Wärme und Verkehr bis 2030.

Quelle: ZSW

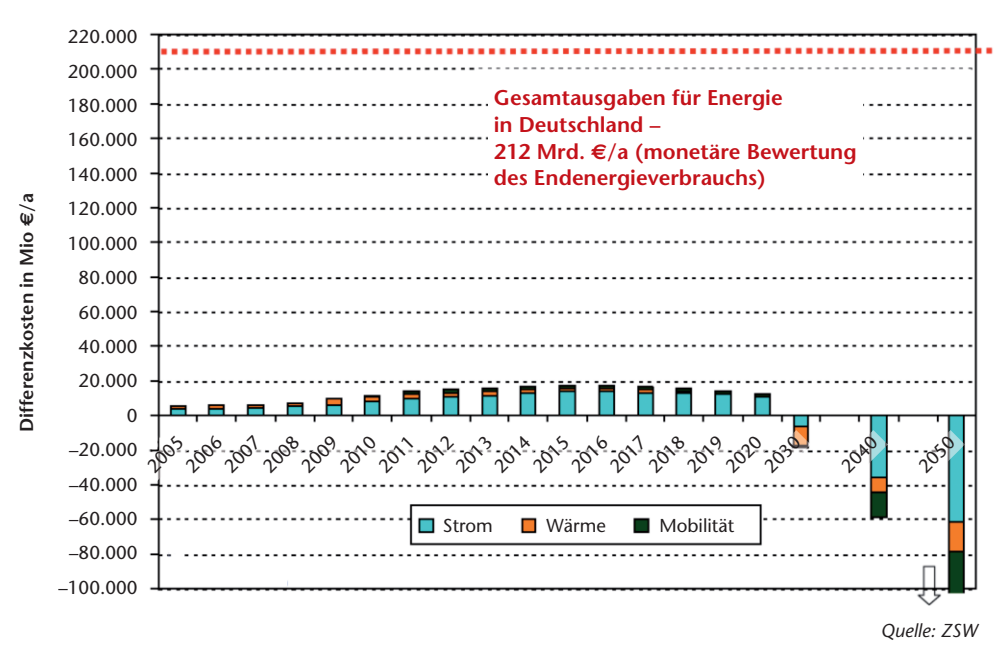


Abbildung 17
Differenzkostenentwicklung bis 2050 im Verhältnis zu den Gesamtausgaben für Energie in Deutschland.

Quelle: ZSW

einem relativ kurzen Zeitraum wieder zurück gewonnen werden.

Anders als bei den reinen Elektrofahrzeugen wird der Einstieg in die Wasserstofftechnologie zunächst über die fossilbasierte Bereitstellung von Wasserstoff erfolgen. Die Gründe hierfür sind infrastruktureller Art, denn zunächst wird nur über eine dezentrale Reformierung von Erdgas Wasserstoff für mobile Anwendungen bereitgestellt werden können.

Erst im Zeitraum um 2030 wird ein Übergang auf regenerative Ressourcen erfolgen. Der steigende Bedarf zur Speicherung regenerativen Überschussstroms in Form von Wasserstoff oder erneuerbarem Methan wird die Technologieentwicklung entsprechend forcieren. Die durch den Einsatz der Brennstoffzellentechnologie entstehenden Mehrkosten können durch den Einstieg in die Serienproduktion sowie die Weiterentwicklung von Komponenten und Fahrzeugtechnologie längerfristig auf 2000 € pro

Fahrzeuge im Vergleich zum benzinbetriebenen Fahrzeug abgesenkt werden, womit das Brennstoffzellenfahrzeug das Niveau des Dieselfahrzeugs erreichen würde /GermanHY 2009/. Dies bedeutet bei mittel- und langfristig erreichbaren Kosten für regenerativ erzeugten Wasserstoff frei Tankstelle von unter 14 Cent/kWh H_2, dass die kilometerbezogenen Kosten auf etwa 30 ct/km gesenkt werden können. Das heißt, dass keine Mehrkosten mehr anfallen, sobald der Ölpreis über 130 $/bbl liegt.

2.5.2.4 Differenzkosten – Einordnung in den Gesamtzusammenhang

Der Ausbau der erneuerbaren Energien verursacht zunächst Mehrkosten sowohl in der Strom- und Wärmeerzeugung als auch im Verkehrssektor. Bei einer jahresspezifischen Betrachtung wird das Maximum der Mehrkosten aber bereits im Jahr 2015 mit einer Summe von rund 17 Mrd. Euro erreicht (*Abbildung 16*). Zum Vergleich: Dies entspricht lediglich ca. 8 % der Gesamtausgaben für Energie in Deutschland, die sich gemäß der monetären Bewertung des Endenergieverbrauchs auf 212 Mrd. €/a belaufen [35] (siehe *Abbildung 17*). Das Argument, wonach erneuerbare Energien erhebliche Kostensteigerungen des Energiesystems verursachen würden, ist mit diesem Vergleich zu entkräften.

Bei der Betrachtung der Differenzkosten der erneuerbaren Energien aus allen drei Sektoren wird deutlich, dass die Transformation in ein vollständig auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem bis zum Jahr 2050 auch aus ökonomischer Sicht vorteilhaft ist. Im Zeitraum 2010 bis 2050 können allein in den Sektoren Strom und Wärme Kosten von insgesamt 730 Mrd. Euro eingespart werden. Die Einsparungen aus dem Verkehrssektor kommen noch hinzu.

2.5.3 Chancen und Risiken der Transformation des Energiesystems

Ein weiterer positiver Aspekt ist die Reduktion der Kosten externer Effekte durch verringerte Emissionen. Dies führt einerseits über die Reduktion der Kosten beispielsweise im Gesundheitswesen zu einem unmittelbaren volkswirtschaftlichen Nutzen andererseits kommt es durch die Emissionsminderung zu einer Abschwächung des Klimawandels und somit zu geringeren Anpassungskosten.

Gleichzeitig reduziert Deutschland seine Rohstoffabhängigkeit gegenüber dem Ausland. Diese Abhängigkeit stellt ein besonderes Risiko dar, weil ein großer Teil der bezogenen fossilen Rohstoffe aus Staaten bezogen werden muss, die als politisch instabil oder undemokratisch geführt angesehen werden müssen. Die Abhängigkeit von diesen Lieferländern würde ohne die vorgeschlagene Transformation zukünftig noch steigen, da die Rohstoffvorkommen der verlässlichen Staaten Europas zunehmend ausgeschöpft sein werden.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil des Einsatzes erneuerbarer Energien ist eine wesentliche Verbesserung der Prognostizierbarkeit der ökonomischen Entwicklung. Die Verlässlichkeit von Prognosen zur der Rohstoffpreisentwicklung, insbesondere für Öl und Gas, ist ausgesprochen gering. Einige Studien aus dem Jahr 2001 prognostizierten beispielsweise für 2010 einen Ölpreis von etwa 18-21 US-Dollar pro Barrel. Problematisch ist dabei weniger, dass diese Vorhersagen deutlich übertroffen wurden, sondern vielmehr die immense Volatilität der Rohstoff- und Energiepreise. Es gibt keinen kontinuierlichen Trend, sondern erhebliche Schwankungen innerhalb sehr kurzer Zeit. Die Energiebereitstellungskosten von erneuerbaren Energien schwanken hingegen kaum, da sie im Wesentlichen durch die Höhe der Anfangsinvestition und die entsprechenden Kapitalkosten bestimmt werden. Einzige Ausnahme ist die Biomasse, aber auch hier ist nicht annähernd eine vergleichbar hohe Volatilität der Preise zu erwarten.

Wirtschaftlicher Strukturwandel – Deutschlands Position auf dem Weltmarkt

Durch eine weltweite Transformation des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energien wird ein globaler Strukturwandel eingeleitet. Für deutsche Unternehmen ergeben sich dadurch Chancen, aber auch Risiken. Deutschland als Exportnation kann durch den weltweiten Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien erheblich profitieren, wenn die Weichen rechtzeitig gestellt werden. Bereits heute nehmen deutsche Unternehmen beispielsweise im Bereich der

Windenergie Spitzenpositionen auf dem Weltmarkt ein. Ob Deutschland jedoch auch in Zukunft vom Ausbau der erneuerbaren Energien wird profitieren können, hängt von mehreren Faktoren ab: Ein besonders wichtiger Punkt ist das Technologieprofil. Deutschland besitzt bislang vor allem Stärken im Maschinenbau und in der Elektrotechnik. Dies wird beispielsweise bei der Entwicklung der deutschen Windenergiebranche deutlich. Aufgrund der jahrelangen Aufbaus und der Stärkung des Know-hows und der Erfahrung in diesem Bereich nehmen deutsche Unternehmen eine führende Rolle auf dem Weltmarkt ein. Auch die innovativen Entwicklungen im Bereich der Systemdienstleistungen, die Windenergieanlagen für das Stromnetz erbringen können und die teilweise auch auf gesetzliche Vorgaben zurückzuführen sind, bedeuten Wettbewerbsvorteile für deutsche Unternehmen gegenüber ihren ausländischen Konkurrenten. Vor allem in Ländern mit einer schlechten Strominfrastruktur bietet dies Vorteile. Dennoch sind erhebliche Anstrengungen nötig, um dem zunehmenden Konkurrenzdruck auf dem Weltmarkt standzuhalten, die Wettbewerbsposition behaupten zu können und diese nach Möglichkeit noch weiter auszubauen. Hierzu bedarf es insbesondere weiterer Leistung im Bereich der Forschung und Entwicklung auf sehr hohem Niveau. Eine Forderung, die ebenfalls in bzw. zu Deutschlands Technologieprofil als High-Tech-Standort passt.

Ebenso stellt sich die Situation für den Anlagenbau in der Photovoltaik dar. Auch an deren starken Wettbewerbsposition kann man das deutsche Technologieprofil erkennen. Die deutsche Weltmarktführerschaft (50 %) in diesem Teil der Wertschöpfungskette zeigt sich nicht zuletzt in hohen Exportraten für Maschinen und Produktionsanlagen bis hin zu schlüsselfertigen Fabriken. Die starke Nachfrage gerade aus dem asiatischen Raum und folglich deren Ausstattung mit einem hochwertigen Anlagenpark erhöht zwangsläufig auch den Konkurrenzdruck auf den folgenden Stufen der Wertschöpfungskette. Die weltweit stark wachsende Konkurrenz beschleunigt aber die gewünschte Kostenreduktion und stellt die deutschen Zell- und Modulproduzenten vor erhebliche Herausforderungen. Dies nicht zuletzt deshalb, weil der asiatische Raum im Bereich der elektronischen Massenprodukte, wie z. B. LCD-Bildschirmen, auf dem Weltmarkt führend ist und diese Erfahrung auch in der Photovoltaik zunehmend einzusetzen versteht. Doch auch im Bereich der Produktion von PV-Modulen nimmt Deutschland derzeit noch eine wichtige Rolle im Weltmarkt ein. Diese kann gehalten und ausgebaut werden, wenn durch intensive Forschung und Entwicklung exklusives Know-how, von deutschen PV-Herstellern generiert und genutzt wird, das dann vom Anlagenbau aber erst zeitverzögert weiterverbreitet wird.
Bei (im Vergleich zu PV-Modulen) komplexeren Photovoltaikprodukten, wie Wechselrichtern oder PV-Produktionsmaschinen, ist Deutschland weltweit führend und dürfte diese Position auch zukünftig halten können.

Neben den bereits erwähnten Produktionsanlagen gehört hierzu auch der Bereich der Wechselrichtertechnologie für die Windenergie und die Photovoltaik. 60 % der weltweiten PV-Wechselrichterproduktion stammten 2009 aus Deutschland. Asiatische Hersteller versuchen diesen Markt zu erobern, jedoch sind Wechselrichter inzwischen äußerst komplex, besonders im Bereich der Regelungstechnik. Durch die zunehmende Integration von Funktionen zur Netzbildung und Stabilisierung wird sich diese Komplexität weiter erhöhen. Es ist deshalb zu erwarten, dass Deutschland bei konsequenten Forschungsanstrengungen seine führende Stellung hier halten oder sogar ausbauen kann.

Elektromobilität

Die Bedeutung der Elektromobilität in und für Deutschland ist ebenfalls nicht zu unterschätzen. Die deutsche Industrie besitzt zwar seit langer Zeit eine wettbewerbsfähige Automobilindustrie, allerdings wird die Hauptkomponente der Elektrofahrzeuge die Batterie sein. Und in diesem Bereich haben deutsche Unternehmen erhebliche Wettbewerbsnachteile gegenüber den Spitzenreitern aus dem asiatischen Raum, allen voran Japan, China und Korea. Um diesen Vorsprung einholen zu können, sind erhebliche Investitionen verbunden mit großen Forschungs- und Entwicklungsleistungen erforderlich.
Zudem wird für die deutsche Automobilindustrie die Fertigung des Verbrennungsmotors zurückgehen, weil diese zukünftig wohl nur noch in LKWs und Reisebussen eingesetzt werden

dürfte. Da in absehbarer Zeit bei der Batterietechnologie der asiatische Raum weiterhin führend und die Nachfrage nach der Technologie des Verbrennungsmotors rückläufig sein wird, könnten für Deutschland durch den Ausbau der Elektromobilität Arbeitsplatzverluste entstehen. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken sind erhebliche Anstrengungen der deutschen Automobilindustrie erforderlich. Die Aktivitäten der deutschen Automobilindustrie deuten aber darauf hin, dass dieses Risiko bereits erkannt wurde und die Chance ergriffen wird, sich bzw. dass Technologieprofil den sich verändernden Gegebenheiten anzupassen. Hierzu passen auch die Aktivitäten im Bereich der Brennstoffzellenentwicklung, sowohl für die mobile als auch für die stationäre Anwendung.

Leistungselektronik und Elektromotoren sind eine Domäne der deutschen elektrotechnischen Industrie und das vorhandene Know-how kann auf die Elektromobilität übertragen werden. So können beispielsweise viele Funktionen für Antriebswechselrichter im Elektroauto von Frequenzumrichtern für industrielle Anwendungen übernommen werden und an bidirektionale Ladegeräte für die Batterien im Elektroauto werden ähnliche Anforderungen gestellt wie an PV-Wechselrichter.

Forschung und Entwicklung

Um die genannten Ziele in der zur Verfügung stehenden Zeit zu erreichen,sind erhebliche Leistungen in Forschung und Entwicklung notwendig. Aktive Forschungstätigkeit bewirkt jedoch so genannte Spill-over-Effekte, d. h., dass beispielsweise in Deutschland erzielte Forschungsergebnisse auch zu Fortschritten und Verbesserungen der Technologie bei der ausländischen Konkurrenz führen. Dies kann bewirken, dass deutsche Unternehmen zu wenig in Forschung investieren, um die Spill-over-Effekte zu minimieren, gleichzeitig aber von ausländischen Spill-over-Effekten zu profitieren. Es wird also weniger investiert als volkswirtschaftlich optimal wäre. Um dies auszugleichen und den High-tech-Standort Deutschland zu stärken, müssen öffentliche Forschungsgelder bereitgestellt werden, insbesondere in sich so schnell entwickelnden Bereichen wie den Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien und der Elektromobilität.

Kosten und Nutzen der Gebäudesanierung

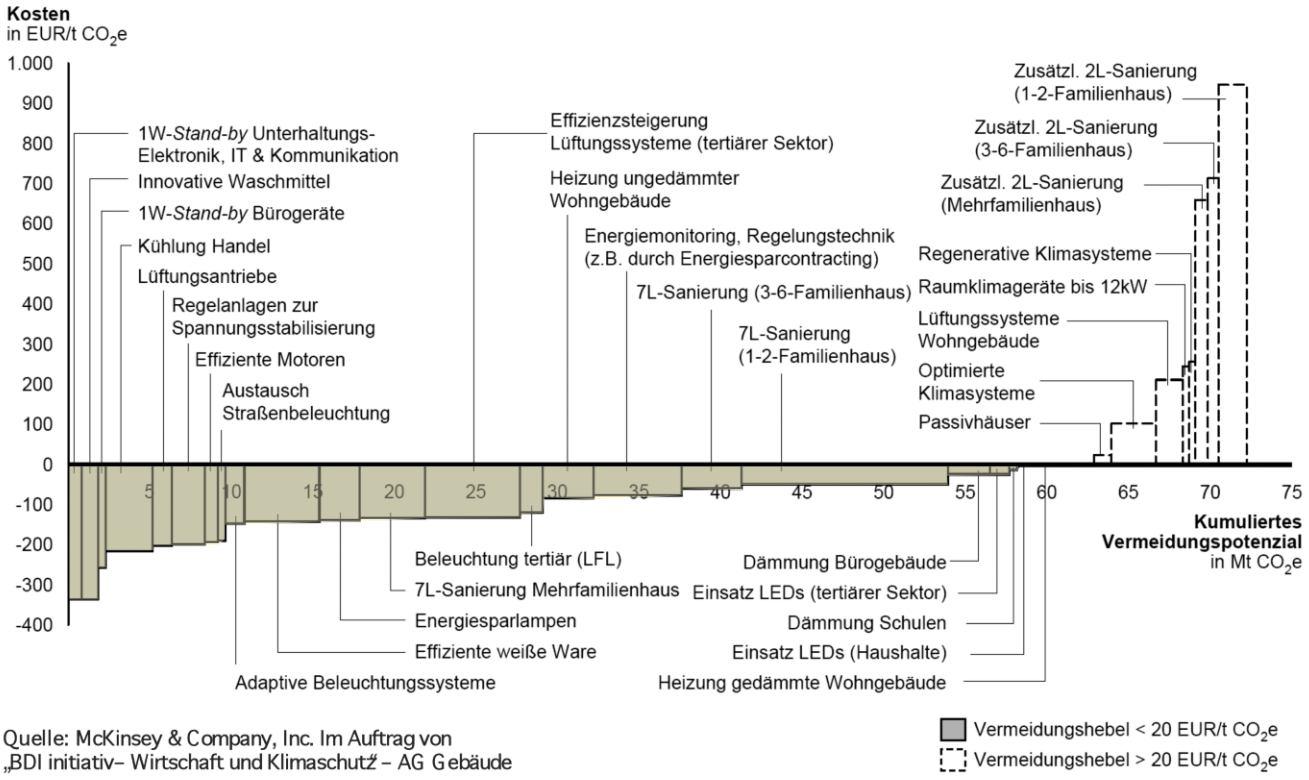
Neben den erneuerbaren Energien spielt die Absenkung des Energieverbrauchs und damit die Steigerung der Energieeffizienz eine bedeutende Rolle, sowohl mit Blick auf die Reduktion der CO_2-Emissionen (*Abbildung 18*) als auch auf lokale Wertschöpfung. Gleichzeitig führen Maßnahmen zur energetischen Gebäudesanierung auch zum Werterhalt und der Wertsteigerung einer Immobilie.

Hinzu kommt eine steigende Bedeutung der Gebäudesanierung für den gesamten Bausektor, denn inzwischen entfallen rund 70 % des gesamten Hochbauvolumens in Deutschland auf Sanierungsmaßnahmen. Somit ist die energetische Gebäudesanierung auch als tragende Säule für Arbeit und Beschäftigung im Baugewerbe zu sehen. Denn jede in den Gebäu-

Szenario		Primärenergiebedarf		CO_2-Emissionen	
		TWh/a	kWh/m²a	Mio. t/a	kg/m²a
Ist	Status Quo 2005	750	226	191	58
1	Fortschreibung bis 2020	624	162	157	41
2	nur erhöhte EnEV für Neubau (IEKP-Szenarium 30/30)	619	161	156	41
3	Zuwachs auf jährl. 3 Prozent Vollsanierung	577	150	145	38
4	Maßnahmenbündel „CO_2 minus 40 Prozent“	458	119	114	30

Abbildung 18
Primärenergiebedarf und CO_2-Emissionen für einzelne Sanierungsszenarien: Entsprechend den im CO_2-Gebäudereport der Bundesregierung ermittelten Wirkungen unterschiedlicher Szenarien können die gebäudebedingten CO_2-Emissionen bis 2020 bezogen auf das Jahr 2005 um 40 % gesenkt werden. Dabei sind Gesamtinvestitionen von ca. 344 Mrd. € notwendig, entsprechend jährlich 23 Mrd. €, die eine Heizkostensenkung von 51 Mrd. € bewirken [36].

Quelle: CO_2-Gebäudereport 27.11.07, S. 72–73



Quelle: McKinsey & Company, Inc. Im Auftrag von „BDI initiativ– Wirtschaft und Klimaschutz" – AG Gebäude

Abbildung 19
Kosten und Potenziale verschiedener Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland

debestand investierte Milliarde Euro sichert oder schafft rund 25.000 Arbeitsplätze im Bauhandwerk und Baugewerbe. Ein Vergleich der Kosten und der CO_2-Vermeidungspotenziale mit anderen Bereichen veranschaulicht die hohe Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung im Gebäudebereich (*Abbildung 18*), die um ein Vielfaches erhöht wird, sobald Maßnahmen im Zusammenhang mit anstehenden Sanierungen durchgeführt werden. Nicht zuletzt deshalb hat sich in den vergangenen Jahren gezeigt, dass sich über öffentliche Förderprogramme mit vergleichsweise geringem finanziellem Aufwand eine hohe Investitionsbereitschaft für die energetische Gebäudemodernisierung anstoßen lässt.

Ein Vergleich der Kosten und der CO_2-Vermeidungspotenziale mit anderen Bereichen (siehe *Abbildung 19*) veranschaulicht die hohe Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung im Gebäudebereich, die um ein Vielfaches erhöht wird, sobald Maßnahmen im Zusammenhang mit anstehenden Sanierungen durchgeführt werden [36].

3. Die Bedeutung von Forschung und Entwicklung

Die technologischen, ökonomischen und soziologischen Herausforderungen bei der Transformation zum Energiesystem 2050 sind nur mit Forschung und Entwicklung zu bewältigen.

Vom heutigen Zustand der Energiesysteme zu einem nachhaltigen, emissionsfreien, bzw. -neutralen System benötigen wir eine ständige Weiterentwicklung der erneuerbaren und energieeffizienten Technologien und der sozialen Begleitforschung.

Denn die heute verfügbaren Technologien erneuerbarer Energien sind noch nicht alle weit genug entwickelt, den Herausforderungen eines Massenmarkts gewachsen zu sein. Neue Materialien für den Ersatz teurer oder seltener Elemente, Verfahrenstechniken, Systemtechniken, Kommunikationstechniken usw. müssen für hohe Stoffumsätze entwickelt werden. Dabei sollten technologische und infrastrukturelle Fehlentwicklungen vermieden und die Versorgungssicherheit auch während der Transformationsphase gewährleistet werden (no regret strategy). Die Transformationsphase benötigt daher sowohl die Entwicklung von Übergangstechnologien als auch ein kontinuierliches Monitoring durch systemanalytische Forschung und Technikfolgenabschätzung.

Kostenreduzierung durch Lernkurveneffekte

Wesentlicher Vorteil der erneuerbaren Energien sind ihre sinkenden Kosten bei zunehmender Nutzung.

Die *Abbildungen 20* und *21* zeigen die Fortschritte bei der Kostenreduzierung am Beispiel von waferbasierten Silizium-Photovoltaikmodulen und PV-Wechselrichtern. Die Lernkurve weist über eine lange Zeit eine Reduzierung von 22 % der Modul- bzw. Wechselrichterkosten bei Verdopplung der kumulierten Installationsmenge aus. Diese Kostenreduktion ist das Ergebnis von

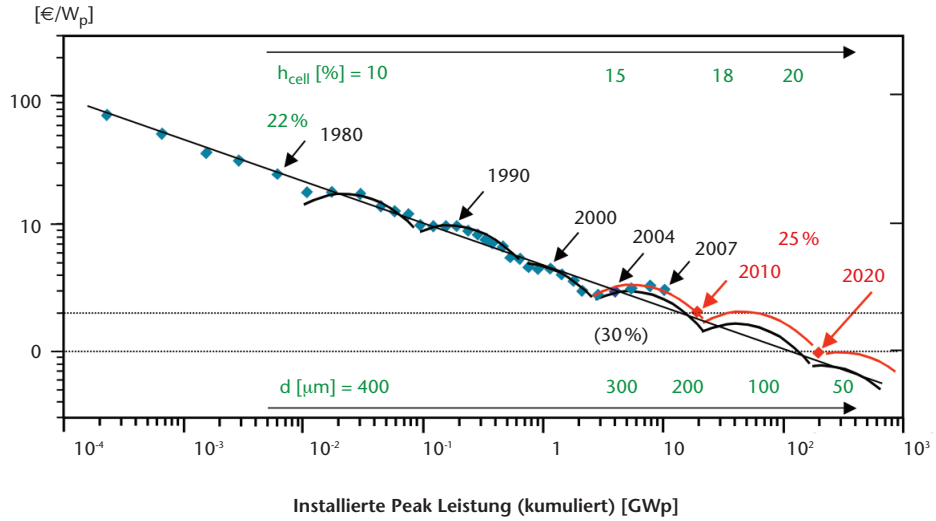


Abbildung 20
Lernkurve für waferbasierte Silizium-Photovoltaikmodule

Quelle: G. Willeke, Fraunhofer ISE [37]

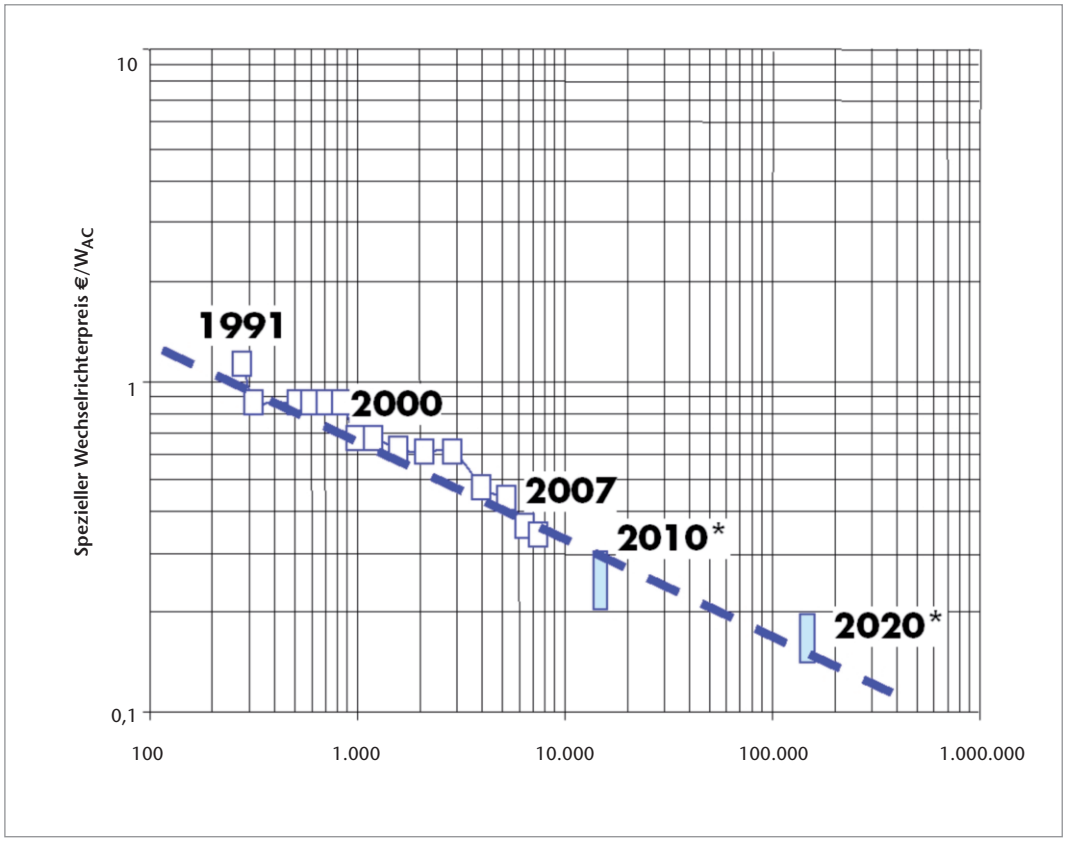


Abbildung 21
Lernkurve für Photovoltaikwechselrichter

Quelle: M. Meinhardt, B. Burger, A. Engler: „PV-Systemtechnik – Motor der Kostenreduktion für die Photovoltaische Stromerzeugung“

Forschung und Entwicklung zusammen mit technologischen Fortschritten wie Wirkungsgradsteigerung und reduziertem Materialeinsatz, verbesserter Produktionstechnologie, effizienterer Vermarktung und sonstigen Skaleneffekten. Kostenreduktionen stellen sich also dann ein, wenn Forschung und Entwicklung in Instituten und Industrie in Kombination mit einem kontinuierlichen Marktausbau erfolgen.

Forschung und Entwicklung sind daher eine wichtige Voraussetzung für künftige Kostensenkungen. Dabei steigt mit wachsendem Marktvolumen auch die Dynamik der Technologieentwicklung deutlich an, weshalb die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten entsprechend gesteigert werden müssen.

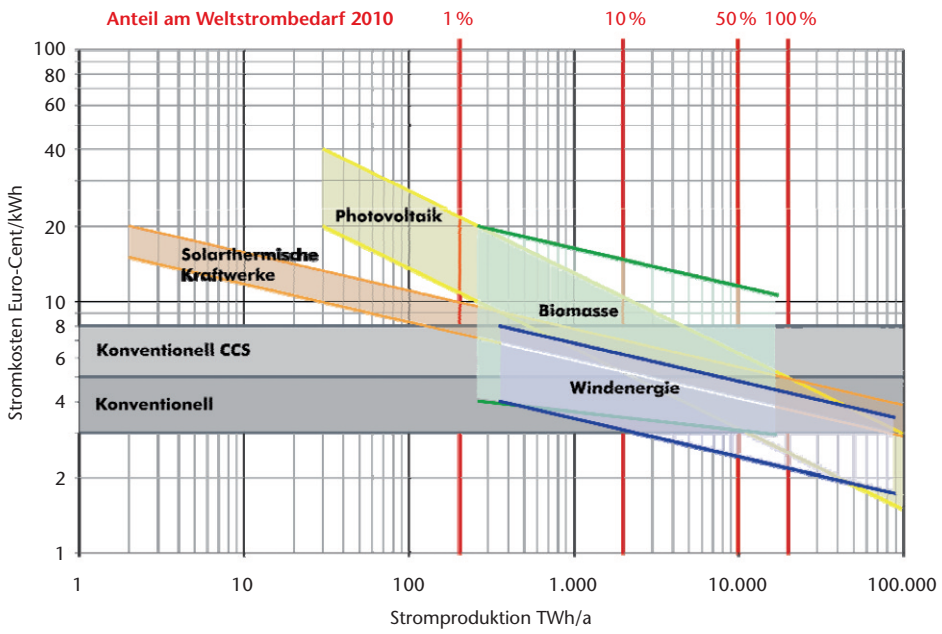
Weitere Lernkurven sind in *Abbildung 22* für verschiedene erneuerbare Energien zusammengestellt, wobei die Kosten über der erzeugten Energie betrachtet werden. Dabei wird deutlich, dass alle Erneuerbaren konkurrenzfähig zu den konventionellen fossilen Energieträgern werden, wenn ihr globaler Anteil etwa bei 10 % oder darüber liegt. Das gilt für alle gleichermaßen, die Wirtschaftlichkeit ist also keine grundsätzliche, sondern nur eine zeitliche Frage:

- Die Photovoltaik hat zurzeit global einen Anteil von etwas über einem Promille, aber ihre Lernkurve zeigt einen Kostenrückgang um 20 % je Verdoppelung der installierten Leistung.
- Der globale Anteil der Windenergie liegt schon bei rund 1,5 %. In den vergangenen Jahren hatte die Windenergie jährliche Zuwächse zwischen 30 und 40 %. Das wird in den nächsten Jahren zwar etwas geringer ausfallen, aber auch hier zeigt die Lernkurve einen Rückgang der Kosten um 10 % je Verdoppelung der installierten Leistung.

Ausgelöst durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz haben Forschung und Entwicklung eine bedeutende Stimulanz aus der Wirtschaft erhalten. In *Abbildung 23* sind die Stromkosten und die EEG-Vergütungssätze für Deutschland dargestellt. Die Photovoltaik erreicht mit den geplanten Absenkungen in naher Zukunft die

Abbildung 22
Entwicklungspotenzial der Kosten für Strom aus erneuerbaren Energien – weltweit

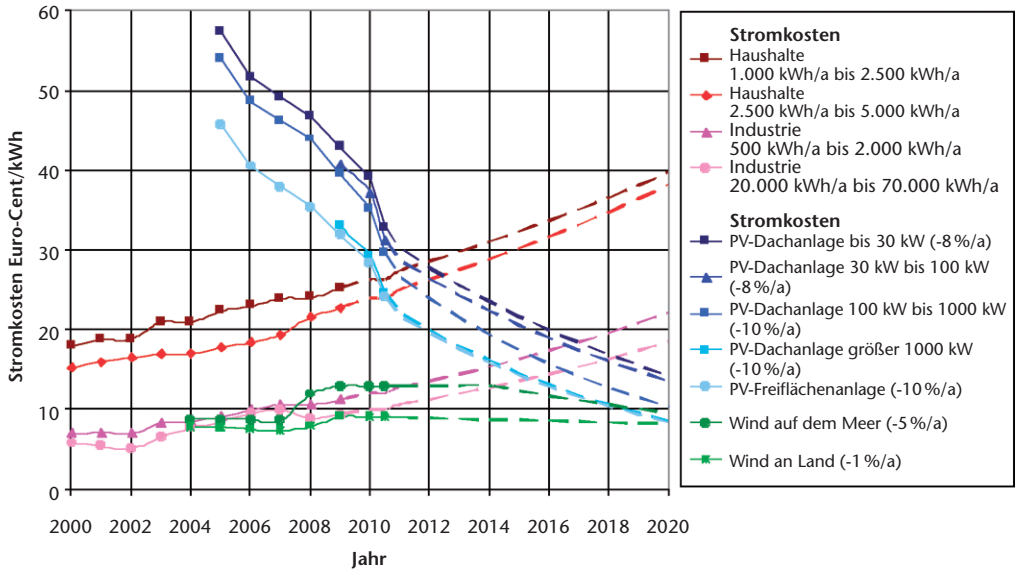
Quelle: J. Schmid, Fraunhofer IWES 2010



Die Startwerte der Kostenbänder stellen die aktuellen globalen Mengen und Kosten dar, die Endwerte entsprechen den Potenzialen des exemplarischen Pfads. Die Entwicklung der Stromerzeugungskosten entsprechend den Lernraten der jeweiligen Technologie als Funktion der globalen jährlichen Stromproduktion in doppeltlogarithmischer Auftragung im Vergleich zu als (sogar) konstant angesetzten Stromkosten konventioneller Kraftwerke heute und zukünftig mit CO_2-Sequestrierung (CCS).

Abbildung 23
Entwicklung der Stromkosten und der EEG-Vergütungssätze in Deutschland

Quelle: BMU und BMWi



so genannte Grid-Parity mit Haushaltsstrom. Ab 2020 können also die Stromkosten von fossilen Kraftwerken deutlich höher als bei Wind und PV liegen. Dies spiegelt sich auch in den Differenzkosten der Stromerzeugung wider, wobei dort ein Übergangsbereich zwischen 2020 und 2030 angenommen wurde.

3.1 Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus Sicht des Energiekonzepts und langfristige Forschungsziele bis 2050

Für die Umsetzung des vorgestellten Energiekonzepts sind auch in Zukunft umfangreiche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Effizienz-Steigerung, der Bereitstellungstechnologien erneuerbarer Energien, der systemischen Optimierung und der Akzeptanz durch die Nutzer erforderlich. Die wichtigsten Forschungsfelder aus Sicht des Energiekonzepts 2050 werden im Folgenden vorgestellt.

3.1.1 Energieeffizientes und solares Bauen

Ein besonders wichtiges Ziel der Forschung und Entwicklung ist es, zunächst den Energiebedarf im Gebäudebereich signifikant zu reduzieren und den verbleibenden Energiebedarf durch erneuerbare Energiequellen zu versorgen. Der Gebäudesektor kann durch Plusenergiehäuser im Neubaubereich und allmähliche Annäherung des Gebäudebestands an den Niedrigenergiestandard einen erheblichen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung leisten. Die Geschwindigkeit dieser Annäherung hängt wesentlich von der Forschungs- und Entwicklungsförderung ab, die von der Politik bestimmt wird. Wesentliche Elemente sind:

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Passivhäuser, Plusenergiehäuser und Solaraktivhäuser werden je nach Region und Bedarf zum Baustandard
- neuartige, kostengünstige Wärmedämmsysteme mit Zusatzfunktionen wie Luftführung für Wärmerückgewinnung und Solarenergieaufnahme insbesondere für Modernisierungen
- teilmechanische, bedarfsgesteuerte Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung auch für den Modernisierungsfall
- verglasungsintegrierte, automatisierbare Sonnenschutzsysteme mit großem Schalthub
- thermische Bauteilaktivierung zur Raumkonditionierung ohne Beeinträchtigung der Raumakustik
- vollständige Substitution von Heizkesseln durch Wärmepumpen und BHKW
- Gebäudeleittechnik zur optimalen Einbindung fluktuierender Energieangebote und -bedarfe
- Wirtschaftlich nutzbare Abwärmenutzung durch optimierte Nah- und Fernwärme zu einem städtischen Standard machen und dabei quartiersbezogene Versorgungssysteme, die auf die niedrigen spezifischen Bedarfe reagieren, einbeziehen
- Verstärkter Einsatz von Low-Exergy-Technologien für den Restheizbedarf

3.1.2 Strom aus erneuerbaren Energien

Strom aus Photovoltaik

Solarzellen besitzen im Bereich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in Mitteleuropa ein sehr hohes technisches Potenzial. In einigen Bundesländern Deutschlands liegt der PV-Stromanteil derzeit schon zwischen 1 und 2 %. Der PV-Beitrag zur Stromerzeugung steigt weltweit rasant an. Dies führt in absehbarer Zukunft zu energiewirtschaftlich nennenswerten Stromversorgungsbeiträgen. Langfristig wird die Photovoltaik eine entscheidende Säule eines nachhaltigen Energieversorgungssystems bilden. Die Preise für Photovoltaikmodule und Photovoltaikwechselrichter sind in den letzten 30 Jahren schon um einen Faktor 10 gesunken (*Abb. 20* und *Abb. 21*) und dieser Trend kann weiter anhalten.

Da eine abschließende Bewertung der unterschiedlichen Technologieansätze im Hinblick auf langfristige Entwicklungen bei der Photovoltaik derzeit noch nicht möglich ist, muss die breitgefächerte Förderung verschiedener Technologien mit einem Fokus auf eine schnelle Kostenreduktion beibehalten werden zu denen die kristalline Si-Photovoltaik (Wafer und Dünnschicht), die klassischen Dünnschichttechniken (amorphes Silicium, Kupferindiumdiselenid), sowie neue Ansätze (organische Solarzellen und Nanotechnolgie) gehören.

Die Photovoltaikwechselrichter sind eine Domäne der deutschen PV-Industrie und werden als Massenprodukt hergestellt. Durch neue Halbleitermaterialien wie z. B. Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) können in

Zukunft noch höhere Wirkungsgrade erzielt werden. Gleichzeitig sinken die Kosten durch höhere Integrationsdichte und kompaktere Bauweise. Da die heute netzbildenden rotierenden Generatoren zunehmend entfallen, übernehmen die Wechselrichter zunehmend die Netzregelung und Stabilisierung. Sie kommunizieren mit Netzleitstellen und erhalten von diesen Vorgaben für die Betriebsweise.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Photovoltaik-Modul-Wirkungsgrade erreichen im Durchschnitt 22 %
- Erhöhung der Modullebensdauer durch besseres Verständnis der Degradationsmechanismen
- Photovoltaikmodule werden integriert verschaltet
- Die Materialstärke beträgt bei allen Dünnschichtmaterialien nur wenige Mikrometer und auch beim kristallinen Silizium unter 30 µm.
- Zell- und Modulfertigung bilden eine Einheit.
- Die prozessierten Flächen betragen viele Quadratmeter. Die Wirkungsgrade der Dünnschichttechniken (inkl. kristallinen Si-Dünnschichttechnik) erreichen 20 %. Photovoltaikmodule fungieren als Dachhülle und reduzieren so die Installationskosten.
- Konzentrierende Photovoltaik (CPV) erreicht einen Modulwirkungsgrad von 50 %
- Photovoltaikwechselrichter werden durch den Einsatz neuer Halbleiterbauelemente effizienter, kompakter und kostengünstiger
- Photovoltaikwechselrichter übernehmen Aufgaben der Netzregelung und werden über Leitwarten ferngesteuert
- Reduktion der Materialmengen (Halbleiter, Metalle, Beschichtungen, Gläser, Verbinder, Verkapselung
- Die Kosten photovoltaisch erzeugten Stroms liegen selbst in Deutschland unter den Kosten von Strom aus fossilen Energieträgern

Strom aus solarthermischen Kraftwerken

Schnell wachsende Märkte für solarthermische Kraftwerke entwickeln sich zurzeit in Südeuropa, den USA und in einigen Entwicklungs- und Schwellenländern des Sonnengürtels.

Deutsche Industrieunternehmen sind dabei federführend beteiligt. Neben den rasch wachsenden Energiemärkten im Sonnengürtel der Erde existieren schon heute die technischen Voraussetzungen, um den dort erzeugten Strom auch in Mitteleuropa zu nutzen, wenn entsprechende Netzwerkkapazitäten für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) ausgebaut werden.

Insbesondere die Möglichkeit, kostengünstig Energiespeicher integrieren zu können oder durch Zufeuerung von biogenen Brennstoffen Strom bedarfsgerecht zu produzieren, erlaubt es langfristig, große Anteile des Strombedarfs durch solarthermische Kraftwerke zu decken.

Auch in Verbindung mit Meerwasserentsalzungsanlagen zeigen solarthermische Kraftwerke für den südlichen Mittelmeerbereich ein interessantes Potenzial, den steigenden Strom- und Wasserbedarf kostengünstig zu decken.

Die Forschungsthemen an Parabolrinnensystemen umfassen vielfältige Aspekte der Kostensenkung und der Lebensdauer sowie den Einsatz neuer Wärmeträger mit höherer thermischer Stabilität und den Einsatz von Direktverdampfungstechnologie, um über eine Erhöhung der Austrittstemperaturen höhere Wirkungsgrade im nachgeschalteten Kraftwerk zu erzielen. Der Forschungsbedarf an Turmkraftwerken reicht noch deutlich weiter in grundlegende Arbeiten zu verbesserten oder neuartigen Receivern und zu den sich anschließenden Fragen des Wärmekreislaufs bei Temperaturen bis zu 1000 °C.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele:

Übergreifendes Ziel ist die Senkung der Stromgestehungskosten um 50 % und mehr, was durch mehrere Pfade erreicht werden soll:

- Erhöhung des Wirkungsgrades von Parabolrinnen-Kraftwerken durch alternative Wärmeträgerfluide z. B. Wasserdampf oder Salzschmelze um Betriebstemperaturen über 400 °C zu ermöglichen und die Gesamteffizienz zu erhöhen
- Entwicklung von Hochtemperaturreceivern für solarthermische Turmkraftwerke mit unterschiedlichen Wärmeträgerfluiden (Salz, Dampf, Luft, Partikel) für Temperaturen jenseits von 500°C

- Kostensenkung für Konzentratoren durch innovative Reflektoren, effizientere Nachführsystem und auf Windlasten optimierte Designkonzepte
- Weitere Optimierung von Betrieb und Wartung solarthermischer Kraftwerke
- Demonstration der kombinierten Erzeugung von Strom und Trinkwasser in Nordafrika zu wettbewerbsfähigen Preisen

Strom aus Windenergie

Der Ausbau der Windenergienutzung ist wesentlich durch zwei Herausforderungen geprägt. Für die Onshore-Nutzung wird das größte Wachstum erwartet. Hier steht die Industrie vor der Herausforderung einer weltweiten Markterschließung bei gleichzeitiger Kostenreduktion, die eine Technologieentwicklung mit Schwerpunkten auf Standardisierung und höchster Zuverlässigkeit in der Großserienproduktion erfordert.

Auch für den weiteren Ausbau der Windenergienutzung in Schwellen- und Entwicklungsländern sind verstärkte Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten notwendig. Gerade unter den besonderen klimatischen und topographischen Bedingungen (stark strukturiertes Gelände) ergeben sich hier neue Herausforderungen.

Eines der wichtigsten Ziele der Forschung und Entwicklung ist eine weitere Kostenreduktion durch grundlegende Innovationen wie zum Beispiel eine Weiterentwicklung der Anlagentechnik und die Entwicklung neuer Materialien und Verbundwerkstoffe. Parallel hierzu müssen die Aerodynamik, die Aeroelastik und die Aeroakustik der Anlagen durch Anwendung von Erkenntnissen und Werkzeugen der Strömungsmechanik weiter optimiert werden. Weitere Forschungsthemen sind die Untersuchungen zur Wind-Klimatologie, Standortfindung im komplexen Gelände und Energieertragsprognose.

Für die Offshore-Nutzung bestehen zusätzliche Herausforderungen, die sich vor allem aus den größeren Lasten durch Wind und See und der erschwerten Zugänglichkeit ergeben. So müssen innovative Konzepte für Gesamtanlagen, Regelungen und technischer Zuverlässigkeit sowie Wind- und Wellencharakteristik für Offshore-Anwendungen untersucht werden.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Windenergieanlagen werden standardisiert, modularisiert und als Technologieplattformen für die Großserienproduktion entwickelt.
- Die Effizienz von Windenergieanlagen ist um 20 % gesteigert bei gleichzeitiger Halbierung der Lärmemissionen
- Windturbinen erreichen Leistungen von über 10 MW und besitzen Kraftwerkseigenschaften
- Die Offshore-Windenergienutzung etabliert sich als wesentlicher Faktor in der Stromversorgung. Die technische Verfügbarkeit kann signifikant gesteigert werden.
- Präzise Prognoseverfahren und ein leistungsfähiges Energiemanagement ermöglichen eine zuverlässige Stromversorgung aus erneuerbaren Energiequellen.

Strom aus Erdwärme

Voraussetzung für eine breitere Anwendung der Geothermie ist die Entwicklung von Verfahren, mit denen kostengünstig und sicher gebohrt und der wirtschaftliche Ertrag von Lagerstätten gezielt gesteigert werden kann. Die Herausforderung der Forschung besteht deshalb darin, die Lernkurve hin zur wirtschaftlichen Bereitstellung von geothermischem Strom zu erarbeiten. Dazu sollen insbesondere so genannte Enhanced Geothermal Systems (EGS) entwickelt werden. Diese basieren überwiegend auf Heißwasserlagerstätten und trockenen Gesteinsformationen, die außerhalb der vulkanisch oder tektonisch aktiven Zonen liegen und damit, bezogen auf die gewinnbare Energie, mit größerem Erschließungs- und/oder fördertechnischen Aufwand verbunden sind. Diese Reservoire stellen aber den größten Teil des weltweiten tiefengeothermischen Potenzials dar und sind auch in Deutschland verfügbar.

Aufgrund des noch frühen Standes der Technik gilt es, die Ansätze und Erfolge der EGS-Forschung zukünftig in adäquaten Programmen fortzuschreiben und auszuweiten. Zusätzlich sollten europaweite Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, nationale Förderprogramme und Kompetenzen zukünftig stärker zusammengeführt und vernetzt werden. Schwerpunktmäßig sollten die geothermischen Technologien gefördert und weiterentwickelt werden, die

nicht auf geothermisch besonders günstige Gebiete beschränkt und somit weltweit auf ähnliche Situationen übertragbar und exportfähig sind. Aufgrund der vorhandenen technologischen Synergien zu konventionellen geothermischen Systemen werden die Forschungserfolge v. a. aus dem Bereich Materialforschung und Komponentenwahl weitere Export-Möglichkeiten bieten.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Wirtschaftliche Reservoirerschließung soll mit nur einer Förder- und einer Injektionsbohrung erreichbar sein durch verbesserte Plan- und Durchführbarkeit von Bohrungen sowie signifikanter Erhöhung der Produktivität geothermischer Reservoire durch innovative Stimulationsverfahren. Dabei stehen Belange der Bevölkerung im Zentrum der Betrachtung, so dass „public acceptance" gegeben sein wird.
- Effiziente Wandlung geothermischer Wärme in Strom
- Geothermische Stromerzeugung ist ökonomisch besser planbar bei absehbaren Bohrkosten und verbesserten Wirkungsgraden

3.1.3 Strom und Wärme aus Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind effiziente Energiewandler, denn sie erreichen bei besonders niedrigen Schadstoffemissionen besonders hohe elektrische Wirkungsgrade und einen hohen Gesamtnutzungsgrad bei gleichzeitiger Wärmenutzung. Sie können sowohl mit Wasserstoff, mit kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen (zum Teil nach Reformierung) oder direkt mit Methanol betrieben werden und sind sowohl für die dezentrale Strom- und Wärmeversorgung als auch für den Antrieb von Elektrofahrzeugen geeignet. Andere vielversprechende Einsatzmöglichkeit sind z. B. die Bordstromerzeugung in Fahr- und Flugzeugen sowie der Akkumulatorersatz für elektronische Geräte

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Ersatz der Elektrodenmaterialien durch kostengünstigere Materialien
- Alternative kostengünstigere Katalysatorenbeschichtungen der Elektroden
- Vermeidung von Degradationsmechanismen im Stack
- Brennstoffzellen werden eine hohe Leistungsdichte und eine Betriebsdauer von 10 Jahren und mehr haben und wirtschaftliche Lösungen für den stationären und auch den mobilen Bereich bieten

3.1.4 Chemische Energieträger aus erneuerbaren Energien

Energetische Nutzung der Biomasse

Forschung und Entwicklung der Biomasse sind zu flankieren durch eine wissenschaftlich fundierte Einschätzung vorhandener Biomassepotenziale einschließlich biogener Reststoffe im Hinblick auf bestehende Nutzungskonflikte, Fragen des Boden- und Naturschutzes, potenzielle Produktionsrisiken, technologische Restriktionen und soziale, ökologische und ökonomische Implikationen eines internationalen Biomassehandels. Langfristig ist neben der energetischen Verwertung biogener Reststoffe vor allem eine Kaskadennutzung mit (mehreren) vorgelagerten stofflichen Nutzungsprozessen im Bereich der Anbau-Biomasse anzustreben.

Ein hohes Entwicklungspotenzial hat vor allem die kombinierte Nutzung der Biomasse mit einem hohen Gesamtwirkungsgrad: eine optimierte Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen durch „Polygeneration", die auch eine CO_2-neutrale Substitution im Verkehrssektor eröffnet. Bei der Synthesegaserzeugung aus Biomasse können schon jetzt etwa 75 % der in Biomasse gespeicherten Energie als chemische Energie des Wasserstoffs bereitgestellt werden. Eine wichtige strategische Frage bezieht sich auf den Umgang mit biomassebasierten Nahwärmenetzen im Rahmen eines verstärkten Ausbaus der Gebäude- und Wärmedämmung. Hier sind dynamische Modelle zu entwickeln, welche einerseits eine CO_2-neutrale Wärmeversorgung als Übergangslösung ermöglichen, andererseits aber auch genügend Anreize bieten, um Dämmmaßnahmen im Sinne einer Reduzierung der Wärmenachfrage umzusetzen.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Die verfügbare Biomasse wird mit Biomasse-Prognose-Verfahren über Satelliten-Monitoring zur Verwendungsoptimierung prioritär der Nahrungskette und stofflichen Nutzung zugeführt und erst abschließend energetisch genutzt (z. B. für Kraftstoffe).
- Durch die Nutzung der regenerativen Ressourcen „erneuerbare Elektrizität“ und „Biomasse“ lässt sich Biomasse-Kohlenstoff nahezu vollständig in Kraftstoff-Kohlenstoff überführen.

Effiziente Erzeugung von Wasserstoff

Die Entwicklung effizienter Verfahren zur großtechnischen Umwandlung erneuerbarer Energien in Wasserstoff ist Voraussetzung entweder für die Etablierung des Wasserstoffs oder/und die Herstellung von erneuerbarem Methan und dessen Einführung als Energieträger.

Wasserstoff mit Hilfe von Strom über die Zersetzung von Wasser aus erneuerbaren Energien zu erzeugen, erscheint – zumindest für Zentraleuropa – als die sinnvollste Variante der Wasserstoffbereitstellung. Die dafür notwendigen Technologien müssen vor allem für großtechnische Anwendungen weiter entwickelt werden.

Eine zunehmend interessante Möglichkeit für die Länder im Sonnengürtel bieten konzentrierende Solarsysteme. Hier wird Sonnenlicht auf direktem thermochemischen Wege zur Brennstofferzeugung genutzt. Dieses Verfahren hat das Potenzial für sehr hohe Umwandlungswirkungsgrade: Diese sogenannten thermochemischen Kreisprozesse haben das Potenzial, Wasserstoff mit höchsten Wirkungsgraden und niedrigen Kosten bereitstellen zu können. Erste Pilotanlagen befinden sich im Aufbau. Für die Weiterentwicklung ist es notwendig, dass Materialien und Komponenten verfügbar werden, die den Betrieb von Anlagen bei Temperaturen über 1000 °C ermöglichen.

Auch die Realisierung der direkten Wasserspaltung mit Hilfe von katalytischen Verbindungen ist eine wichtige Option. Dafür müssen kostengünstige Materialien entwickelt werden, um den Wasserstoff herzustellen.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Ersatz von Edelmetallen durch kostengünstigere Materialien für die Elektrolyse von Wasser
- Wasserstofferzeugung durch solar unterstützte thermochemische Reaktionen ergänzen die Wasserstoffgewinnung aus Elektrolyse, bzw. aus Hochdruck- oder Hochtemperatur-Elektrolyse.
- Solare Brennstofferzeugung vorzugsweise von Wasserstoff mit Hilfe biologischer Wandler oder von nanotechnologisch maßgeschneiderten Katalysematerialien. Auch eine elektrochemische CO_2-Reduktion zu Methanol und Methan ist ein lohnendes Forschungsziel.
- Die Wasserstoff- bzw. ‘Biomethan’-Speicherung in Kavernen zur Glättung fluktuierender erneuerbarer Energien spielt für die großmaßstäbliche Energiespeicherung ab mehreren hundert GWh eine wichtige Rolle.

Effiziente Erzeugung von Methan

Für die Stromspeicherung existieren in Deutschland zurzeit fast ausschließlich Pumpspeicherkraftwerke mit einer Speicherkapazität von 0,04 TWh. Für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien sind jedoch ca. 20 TWh erforderlich. Diese hohen Speicherkapazitäten können nur durch chemische Energieträger bereit gestellt werden. Neben Wasserstoff ist erneuerbares Methan als Erdgassubstitut (Substitute Natural Gas) die interessanteste Option, weil hierfür die bestehende Infrastruktur und die bestehende Speicherkapazitäten von > 200 TWh genutzt werden können. Dieses neue Speicherkonzept sollte deshalb durch verstärkte Forschung und Entwicklung zur Marktreife geführt werden.

Die Prozesskette zur Erzeugung von erneuerbarem Methan aus elektrischer Energie, Wasser und CO_2 besteht aus den beiden Hauptkomponenten Wasserelektrolyse und Methanisierung.

Dazu ist eine Weiterentwicklung der Methansynthese und die Einbindung des erneuerbaren Methans ins Energiesystem zu realisieren.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele:

- Strom und erneuerbares Methan sind bidirektional ineinander umwandelbar und verfügen über eine voll ausgebaute Infrastruktur, so dass die Speicherkapazität des Gasnetzes auch für die saisonale Speicherung im Stromsektor genutzt werden kann.
- Erneuerbares Methangas und erneuerbare Kraftstoffe aus Wind, Solar und Wasserkraft werden mit hoher Effizienz erzeugt; dezentrale und zentrale Anlagen sind am Markt verfügbar.

3.1.5 CO_2 als Rohstoff nutzen

Die in der Erforschung befindliche CO_2-Abtrennung und -Speicherung stellt eine klassische 'End of pipe'-Technologie dar, die den Produktionsprozess selbst nicht verändert, sondern nur nachgeschaltet Umweltschäden zu mindern versucht. Selbst im Erfolgsfall können dadurch nur sehr begrenzte CO_2-Mengen aus der Atmosphäre ferngehalten werden. Vielversprechender und vor allem nachhaltiger ist es, CO_2 als Rohstoff zu nutzen für die Chemieindustrie, für die Herstellung erneuerbaren Methans und danach für jede Art von Kunststoffen [38]. Wirtschaftlicher, ökologischer und sozial förderlicher sind auch weltweite Aufforstungen und Humusaufbau, die der Atmosphäre das Treibhausgas entziehen. Dadurch kann man Bodenerosion und -zerstörung entgegen wirken und gewinnt damit einen doppelten Nutzen für den Nahrungsmittelanbau und für Energiepflanzen.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Erhöhung der Bereitstellungseffizienz der CO_2-Methanisierung

3.1.6 Energiespeicher

In fast allen Bereichen der Energietechnik lässt sich durch Speicherung von Energie der „Energieverbrauch“ erheblich senken, und viele sinnvolle Prozessoptimierungen werden durch den Einsatz von Speichern überhaupt erst möglich. Energiespeicher sind demnach zentrale Komponenten für eine nachhaltige Energiewirtschaft, die für alle drei Handlungsstränge der Energiepolitik relevant sind:

- Verringerung des Endenergieverbrauches
- Steigerung der Energieumwandlungs- und -bereitstellungseffizienz
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie im Energiemix

In der Vergangenheit wurde die Entwicklung von Energiespeichern kaum vorangetrieben. Dies betrifft sowohl Speicher für elektrische Energie (Batterien), als auch thermische Speicher und chemische Speicher (alternative Brennstoffe). Es müssen in allen Bereichen grundlegend neue technologische Ansätze entwickelt und neue Forschungskapazitäten aufgebaut werden. Die Arbeiten reichen von stark grundlagenorientierten Aspekten bis hin zur Anwendung und erfordern die Zusammenarbeit verschiedenster wissenschaftlicher Disziplinen. Parallel zu Forschung und Entwicklung muss die Markteinführung von Speichern bzw. die Umsetzung energieoptimierter Systeme vorangetrieben werden.

Stromspeicher

Der Bedarf an elektrischen Energiespeichern (Primärzellen und Akkumulatoren), elektrochemischen Speichern (Hochtemperatur- und Redox-Flow-Batterien) und Hybridsystemen aus Batterien und Superkondensatoren mit hoher Leistungsdichte und langer Lebensdauer wird in den kommenden Jahren stark ansteigen. Denn der Anteil an Strom aus dezentralen und fluktuierenden Quellen wird sich erhöhen, was den stationären Einsatz dieser Technologien forcieren wird. Gleichzeitig wird deren mobile Anwendung im Verkehr zunehmend an Bedeutung gewinnen. Forschung und Entwicklung können dazu beitragen, den in den vergangenen Jahren entstandenen Rückstand aufzuholen.

Die Herausforderungen liegen in einer nutzerfreundlichen Kostenstruktur elektrochemischer Speicher und der Produktion von anwendungsorientierten Systemlösungen. Dies gilt insbesondere für eine stationäre elektrochemische Stromspeicherung für fluktuierende Einspeisungen aus PV- und Windanlagen. Hier zeichnet sich eine Entwicklung ab, mit der überschüssiger Windstrom in große Batteriesysteme geleitet wird, um diese in ein Energiedienstleistungssystem einzubinden, das Spannung und Frequenz im Verteilnetz effizient stabilisiert.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele:

- Batterien und Akkumulatoren haben eine hohe Energie- und Leistungsdichte, die der Elektromobilität zum Durchbruch verhilft.
- Die dezentrale Speicherung elektrischer Energie in Hochtemperatur- oder Redox-Flow-Batterien wird in der Fläche wirksam
- Die Anzahl großer Druckluftspeicher wird verfünffacht
- Fluktuierend anfallende erneuerbare Elektrizität kann durch die Speicherung in Form von erneuerbarem Methan nach Bedarf rückverstromt werden und ist damit planbar.

Wärmespeicher

Für neue Speichertechniken sind umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Durch die Entwicklung neuer Speichermaterialien auf der Basis von Phasenwechsel- und Sorptionsmaterialien sind prinzipiell völlig neue Ansätze zur Wärmespeicherung mit geringen Speicherverlusten möglich, die höhere Energiedichten erlauben und den Einsatz dezentraler Wärmeversorgungssysteme unterstützen. Dabei macht der reduzierte Energieverbrauch in modernen Gebäuden derartige neue Ansätze aus systemtechnischer Sicht besonders aussichtsreich.

Darüber hinaus eröffnen sich durch neue Speichermaterialien auch neue Einsatzmöglichkeiten im Bereich hoher Temperaturen für die solarthermische Kraftwerkstechnik und für die bessere Nutzung industrieller Prozesswärme. Interessant sind in diesem Zusammenhang Speicher für kleine Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlagen, da mit diesen Komponenten ein optimierter stromgeführter Betrieb möglich ist und die anfallende Wärme bis zu einigen Tagen gespeichert werden kann. Bei solarthermischen Kraftwerken können die Verfügbarkeit und die Stromgestehungskosten durch Installation von Wärmespeichern deutlich verbessert werden.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Neue Materialien, Komponenten und Systeme ermöglichen es, den Wärmetransport gezielt zu beeinflussen, d. h. ihn zu erleichtern und zu beschleunigen oder ihn zu reduzieren und zu verzögern.

Saisonale geothermische Wärmespeicher

Saisonale Speicherung thermischer Energie in Aquiferen sowie die Integration der Speicher in Energieversorgungssysteme haben ein bisher nur unzureichend beachtetes enormes Potenzial. Die Kombination aus saisonaler Wärmespeicherung und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) verbessert zudem die bedarfsgerechte Strombereitstellung eines Energiesystems. Durch das Einspeichern von Überschusswärme in Zeiten von geringer Wärmenachfrage können KWK-Anlagen ganzjährig stromgeführt betrieben werden, da die eingespeicherte Überschusswärme später bei hoher Wärmenachfrage genutzt werden kann. Aquiferwärmespeicher eignen sich hierzu besonders aufgrund ihrer hohen Speicherkapazität und der hohen Wärmerückgewinnungsgrade im saisonalen Betrieb.

Aquiferkältespeicher ermöglichen die Nutzung der niedrigen Temperaturen im Winter für die Kühlung im Sommer. Im Vergleich zur konventionellen Kältebereitstellung, werden deutlich höhere COP-Werte (Coefficient of Performance) für die Kältebereitstellung erreicht (Faktor 5 bis 10), wodurch der Elektrizitätsbedarfs für die Kältebereitstellung insbesondere in den Sommermonaten reduziert werden kann. Die Nutzung von Aquiferen als thermische Energiespeicher ist durch die geologischen Verhältnisse bestimmt. In Deutschland sind ca. 70 % der Fläche generell für die Nutzung als Speicher mit einer Kapazität von je 5-10 GWh geeignet, wie das beispielsweise bei den Parlamentsbauten in Berlin genutzt wird. Bei einer angenommenen Anzahl von 2000 Anlagen in Deutschland ist eine Speicherkapazität von über 10 TWh möglich.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Trotz guter Erfahrungen mit den bisherigen Projekten bestehen Hemmnisse in der Umsetzung weiterer Speicher, die in der Komplexität des Planungsprozesses und der Systemtechnik begründet sind. Hierfür sind grundsätzliche Technologiekonsolidierungen erforderlich, aus denen Planungs- und Betriebsrichtlinien entwickelt werden, die auf Erfahrungen aus vorwettbewerblichen Demonstrationsprojekten mit einem erkennbarem Forschungsanteil basieren. Die sich

daraus ergebende Standardisierung der Planung, des Baus und des Betriebs von Energieversorgungssystemen mit Aquiferspeichern ist essentiell für die Schöpfung des hohen Potenzials.

3.1.7 Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energien

Wärme und Kälte aus solarthermischen Kollektoren

Solarthermische Kollektoren wandeln die auftreffende Sonnenstrahlung in Wärme um. Sie kann mit unterschiedlichen Technologien in verschiedenen Temperaturbereichen genutzt werden:

- Solarthermische Flach- oder Vakuumröhrenkollektoren erwärmen Brauch- und Trinkwasser für Haushalt und Raumheizung.
- Konzentrierende Solarkollektoren (Parabolrinnen und lineare Fresnelsysteme) oder hocheffiziente Flachkollektoren stellen Prozesswärme auf höherem Temperaturniveau bereit für industrielle Anwendungen und zur Gebäudeklimatisierung.

Kollektorsysteme zur Wärmeerzeugung bis zu 90°C müssen weiter entwickelt werden, um Kosten zu reduzieren und neue Anwendungen zu erschließen. Insbesondere für eine Integration von Solarkollektoren in die Gebäudehülle. Dies ist eine Voraussetzung für die Entwicklung der Systemtechnik für das Solaraktivhaus, dessen Wärmebedarf vollständig mit Solarwärme gedeckt wird und als Zwischenschritt das „Solarhaus 50+“, dessen Wärmebedarf zu mehr als 50 % mit Solarwärme gedeckt wird.

Auf der Basis solarthermischer Kollektoren lassen sich optimierte Gesamtsysteme zur Kraft-Wärme-Kopplung aufbauen, die im Sommerhalbjahr weitgehend solarbetrieben, im Winterhalbjahr mittels erneuerbaren Methans oder Biobrennstoffe Strom erzeugen und die Abwärme in ein Wärmenetz einspeisen. Eine ökonomische Optimierung – effiziente Sanierung gegenüber Abwärmenutzung in Nahwärmesystemen – ist ebenfalls ein wichtiger Forschungsgegenstand.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Kollektorsysteme zur Wärmeerzeugung weiterentwickeln, um Kosten zu reduzieren und eine Integration in die Gebäudehülle zu erleichtern.
- Weiterentwicklung von solarthermisch angetriebenen Kühlsystemen
- Konzentrierende Solarkollektoren (Parabolrinnen und lineare Fresnelsysteme) oder hocheffiziente Flachkollektoren werden für industrielle und gewerbliche Prozesswärme – auch in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung – sowie Meerwasserentsalzung entwickelt.

Wärme und Kälte aus Geothermie

Die wesentliche Forschungs- und Entwicklungsaufgabe besteht darin, diese Technik planungssicher bereitzustellen. Für eine kostengünstigere und wirtschaftlichere Bereitstellung geothermischer Energie bedarf es einer Steigerung der Jahresarbeitszahlen (Verhältnis Heizwärme zur Antriebsarbeit) geothermischer Anlagen. Abhängig von der eingesetzten Wärmequelle werden bei kleinen Anlagen verbesserungsfähige Jahresarbeitszahlen von 3 (Umgebungsluft) bis über 4 (Erdsonden/Wasser) erreicht – in Kombination mit Low-Exergy-Heizflächen sind wesentlich bessere Werte erreichbar. Größere Versorgungssysteme sollten durch kostengünstige saisonale Speicherung von Wärme oder Kälte im Untergrund verbessert werden. Wärmequellen des tieferen Untergrundes müssen wirtschaftlicher erschlossen werden.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Steigerung der Jahresarbeitszahlen (Verhältnis Heizwärme zur Antriebsarbeit) geothermischer Anlagen
- Entwicklung geeigneter Wärmeübertragung über Tage, z. B. in Niedrigtemperatur-Heiznetze und direkte Nutzung der Wärme

3.1.8 Mobilität

Die Klimaproblematik erfordert neue Wege der Mobilität. Die Entwicklung von Technologien für batterie- und brennstoffzellengestützte Elektrofahrzeuge führt zu extrem energieeffizienten Elektroantrieben mit Wirkungsgraden von bis zu 80 % (vom Speicher bis zur Antriebsachse) und bietet die Möglichkeit, die Energieversorgung

für den Verkehr aus erneuerbaren Quellen wie Sonnen- oder Windenergie zu realisieren.

Das Energiekonzept 2050 sieht in der Elektromobilität und in der Entwicklung kostengünstiger und zuverlässiger stationärer Stromspeicher für Deutschland die Chance, ökonomisch und ökologisch in eine neue Dimension vorzustoßen. Mit dem notwendigen Technologiewandel im Mobilitätssektor bietet sich auch die Chance, unser heutiges Energiesystem nicht nur anzupassen, sondern es strukturell zu transformieren.

Das zukünftige Elektroauto wird aus einer technologischen Kombination von Brennstoffzellen, Batterien und Superkondensatoren bestehen. Deshalb ist es notwendig, Batterie- und Brennstoffzellentechnologie parallel weiter zu entwickeln, beziehungsweise die Potenziale der Hybrid-Betriebsweise zu erforschen, denn nur über die Erschließung dieser Technologiepfade ist die Transformation des Mobilitätssektors und eine internationale Technologieführerschaft möglich. Die verschiedenen Speichertechnologien werden durch hocheffiziente kompakte Leistungselektronik an die Traktion gekoppelt. Intelligente Betriebsführungen entscheiden, wie die Last auf die verschiedenen Speicher verteilt wird.

Neben der Forschung im Bereich der Batteriesystemtechnik müssen auch geeignete Energiesysteme und Systemkomponenten der Leistungselektronik und Regelungstechnik entwickelt werden.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Der Wirkungsgrad von Elektromotoren erreicht 98 %
- Induktive Stromübertragung wird in viele Straßen eingebaut.
- PKW sind weitgehend elektrifiziert und beladen ihre On-Board-Energiespeicher mit Strom aus erneuerbaren Energien oder Wasserstoff, Methan oder anderen erneuerbaren Kraftstoffen – hergestellt aus Wind, Solarenergie und Wasserkraft
- Überschüsse aus erneuerbarer Stromerzeugung werden dem Verkehrssektor in Form von erneuerbaren Kraftstoffen (Wasserstoff, Methan, Dimethylether, Kerosin, etc.) über Energieinfrastrukturen zugeführt.
- Superkondensatoren können Systeme mit geringen Leistungsdichten so ergänzen, dass auch kurzfristig hohe Leistungen umgesetzt werden können. Dies ermöglicht eine besonders günstige Systemauslegung. Eine breite Einführung erfordert allerdings eine weitere Steigerung der Energiedichten bei an die Anwendung angepassten Leistungsdichten.
- Es müssen hocheffiziente, kompakte und bidirektionale Umrichter entwickelt werden, um Batterien von Elektroautos möglichst verlustarm zu laden und sie gleichzeitig als schnellen Energiespeicher ins Netz integrieren zu können. Dazu sind Ladeinfrastruktur und die Fahrzeug-Netzschnittstelle zu entwickeln mit den Aspekten Identifikation, Metering, Abrechnung und Kommunikation (zwischen Fahrzeug, Netz und Nutzer).
- Herausforderung an die Sicherheitstechnik von Lithium-Batterien ist die unbedingte Vermeidung eines „thermischen Durchgehens“. Gleichzeitig soll aber eine Schnellladefähigkeit der Zellen ermöglicht werden. Dies erfordert ein detailliertes Verständnis der thermochemischen Mechanismen, eine optimale Auslegung des thermischen Managements, sowie die Entwicklung von thermisch stabilen Elektrodenmaterialien.

3.1.9 Elektrische Systemtechnik, Netzmanagement und verteilte Kraftwerke

Ziel zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen muss es sein, die sich ändernden Versorgungsstrukturen so zu gestalten, dass die Netzstabilität und die Versorgungssicherheit bei wachsender Anzahl fluktuierender Einspeiser auch ohne große Leistungsreserven gewährleistet bleiben. Die Wechselrichter von Wind- und PV-Anlagen müssen netzbildende Funktionen übernehmen und die Versorgungssicherheit sicherstellen. Das heute von rotierenden Generatoren gebildete Netz geht über zu einem leistungselektronischen, stromrichtergeführten Netz.

Der Stromtransport und der Energieausgleich auf deutscher und europäischer Ebene spielen für die Nutzung der fluktuierenden Energiequellen eine Schlüsselrolle. Zentrale Themen sind der Netzausbau, die Netzregelung und die optimale Einbindung der erneuerbaren Energien

mittels leistungselektronischer Energiewandler, die aktiv an der Netzregelung teilnehmen und die Netzstabilität sicherstellen. Dafür sind leistungsfähige Kommunikationsstrukturen, Online- und Prognoseverfahren für die Netzeinsatzplanung sowie bidirektionale Energiemanagement und -handelssysteme für den Dialog zwischen Energieerzeuger, Verteiler und Verbraucher von besonderer Bedeutung.

So können die regenerativen Erzeuger alle für den sicheren Netzbetrieb erforderlichen Systemdienstleistungen von den konventionellen Kraftwerken übernehmen. Hierfür ist die Entwicklung moderner Informations- und Kommunikationstechniken für verbesserte Energiemanagementverfahren unverzichtbar. Eine Schlüsselrolle kommt der dynamischen Netzsimulation für den europäischen Raum und darüber hinaus zu. Nur mit Hilfe dieser Simulationen läßt sich der Einfluss der in Europa geplanten Ausbauszenarien für erneuerbare Energien, der unterschiedlichen Einbindungsstrategien von Pumpspeicherwerken, von Tarifstrukturen und vom Ausbaugrad des europäischen Transportnetzes in Bezug auf Versorgungssicherheit und Energiebereitstellungskosten analysieren.

Langfristige Forschungs- und Entwicklungsziele

- Smart Grids werden überall eingeführt und kommunizieren mit den Smart Control-Geräten[12] der Gebäude
- Weiträumige Stromübertragung mit Hilfe der HGÜ Technik hat sich 2050 global durchgesetzt und hilft bei der Verteilung des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen
- Leistungsfähige Mittel- und Hochspannungsumrichter zur Kopplung von Gleich- und Wechselstromnetzen werden entwickelt
- Neue Regelungsmethoden zur Netzstabilität für das leistungselektronisch geführte Netz werden entwickelt. Die Leistungsflüsse zwischen Wechselstromnetz, Gleichstromnetz und den Energiespeichern werden intelligent geregelt.
- Stromtransport mit Supraleitern wird in Zonen hohen Leistungsbedarfs eingesetzt.
- Strom-, Gas- und Wärmenetze sind optimal vernetzt und ökonomisch optimal ausgebaut

12 Smart Control-Geräte sind z. B. bidirektionale Energiemanagement Interfaces (BEMI)

3.1.10 Systemanalyse und Technikfolgenabschätzung für finanzielle Anreize und politischen Regulierungsbedarf

Die Entwicklung neuer Energietechnologien erfolgt innerhalb eines komplexen Umfeldes mit zahlreichen technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und energiepolitischen Rahmenbedingungen.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Markteinführung ist deshalb eine vorbereitende und flankierende Analyse dieser Zusammenhänge. Hier setzt die Systemanalyse an. Mittels Potenzialanalysen werden die Zukunftsperspektiven neuer Energietechnologien und -systeme ausgelotet. Anschließend werden Szenarien ausgearbeitet, die mögliche Entwicklungspfade aufzeigen. Die Umsetzung dieser Szenarien durch den gezielten Einsatz von Politikinstrumenten, deren spezifische Anpassung, Modifizierung bzw. Neugestaltung und die begleitende Politikberatung gehören zu den fundamental wichtigen Ansatzpunkten der systemanalytischen Arbeit, um die Umsetzung zu erreichen.

Während der Umsetzungsphase werden Energietechnologien und -systeme, ebenso wie die gewählten Förderinstrumente von einem Monitoring begleitet. Systemanalysen und Technikfolgenabschätzungen werden benötigt, um politische Konzepte an unvorhergesehene Entwicklungen anzupassen. Diese kontinuierliche und umfassende Bewertung ermittelt Chancen und Risiken, hilft mögliche Fehlentwicklungen rechtzeitig zu erkennen und alternative Lösungsansätze zu erarbeiten. Zu beachten sind dabei sowohl ökonomische Aspekte – wie die Liberalisierung und Globalisierung der Energiemärkte –, ökologische Aspekte, Fragen der Versorgungssicherheit als auch die Vorgaben der internationalen Klimaschutzpolitik.

3.1.11 Soziale Begleitforschung

Eines der wichtigsten Forschungsfelder besteht in der sozialen Begleitforschung, bei der vor allem die Fragen der Akzeptanz neuer Technologien behandelt und Verfahren zur Verbesserung des Dialogs zwischen Technik und Nutzer entwickelt werden müssen. Als besonders wichtig wird dieser Aspekt für die Realisierung eines Nordafrikanischen-Europäischen Stromverbunds betrachtet.

4. Politische Handlungsempfehlungen

Das bis zum Jahr 2050 reichende Energiekonzept 2050 für Deutschland sieht einen vollständigen Wandel des heutigen fossil-nuklearen, klimaschädigenden, zentral ausgerichteten, und hauptsächlich auf Energieimporten aufbauenden Energieversorgungssystems hin zu einem nachhaltigen Energieversorgungssystem vor, das zu 100% erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Energiespeicherung nutzt und dabei sicher, zuverlässig und kostengünstig ist.

Das Energiekonzept geht für das Jahr 2050 von folgenden Voraussetzungen aus:

- Der weltweite Bedarf an Energiedienstleistungen wird weiter angestiegen sein
- Fossile und nukleare Energien werden bei weitem nicht mehr ausreichen, den weltweiten Energiebedarf zu decken,
- Es wird noch kein kommerziell einsetzbares Kernfusionskraftwerk zur Verfügung stehen,
- Strom, Wärme und Treibstoffe aus erneuerbaren Energien werden deutlich kostengünstiger sein als Strom aus fossilen und nuklearen Energiequellen.
- Neue Technologien werden zur Verfügung stehen, die ein Energieversorgungssystem, das auf 100 % erneuerbare Energien aufbaut, versorgungssicher und kostengünstig realisierbar machen.

Diese Einschätzung stimmt insoweit mit der Einschätzung der Regierungsparteien überein, die im Koalitionsvertrag das Ziel formuliert haben, „dass die erneuerbaren Energien den Hauptteil an der Energieversorgung übernehmen."

Ein solch weitreichendes Energiekonzept benötigt zu seiner Realisierung ein Transformationskonzept, wie es in Kapitel 2 vorgestellt wurde. Hieraus lassen sich die folgenden Handlungsempfehlungen ableiten.

4.1 Markteinführungsmaßnahmen

Energiepolitik hat die Aufgabe, notwendige Transformationen des Energiesystems, die nicht von selbst oder nicht in der gewünschten Geschwindigkeit ablaufen zu stimulieren oder zu beschleunigen.

Energieeffizienzmaßnahmen und erneuerbare Energien sind schon seit Jahren einsatzbereit und der Transformationsprozess mit kontinuierlich steigenden Anteilen erneuerbarer Energien an der Energieversorgung hat bereits begonnen. Teilweise wurden dabei unerwartet große Erfolge erzielt, z. B. bei der Windkraft und der Photovoltaik.

Aber die Umsetzung des Energiekonzeptes erfordert politische Unterstützung für die Verstetigung der Markteinführung, wo sie erfolgreich ist und Ergänzung und Verstärkung, wo die Transformationsgeschwindigkeit bislang unzureichend ist. Technologieführerschaft gelingt vor allem durch eine konsequente und frühzeitige Markteinführung, denn die meisten Innovationsideen entstehen bei der Produktion der Techniken und der Anwendung in der Praxis.

4.1.1 Energieeffizienzmaßnahmen stimulieren

Die Stimulierung von Energieeffizienzmaßnahmen hat sich bisher als besonders schwierig erwiesen. So liegt beispielsweise die Sanierungsrate beim Gebäudebestand mit unter 1% jährlich bislang weit hinter den politischen Zielen zurück. Die Stimulation von Effizienzmaßnahmen muss durch ein Bündel von verschiedenen Maßnahmen verstärkt werden:

- Umsetzung der Europäischen Gebäuderichtlinie (EPBD) und Verschärfung der Energieeinsparverordnung (EnEV)
- Umsetzung der europäischen Endenergieeffizienz- und Energiedienstleistungs-Richtlinie

- Umstellung des Gebäudeenergieausweises in einen verpflichtenden bedarfsorientierten Energiepass
- Ausbau des Gebäudesanierungsprogramm
- Deutlicher Ausbau der KWK durch verstärkte Förderung lokaler und regionaler Nah- und Fernwärmenetze
- Abbau von rechtlichen Hemmnissen und Akzeptanzproblemen bei der Realisierung von Nah- und Fernwärmenetzen
- Erhöhung der Stromnutzungseffizienz z. B. durch Top-Runner-Programme
- Umsetzung der der EU Richtlinie über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (EDL) [39][13]
- Einrichtung eines Energieeffizienzfonds zur Finanzierung von Effizienzprogrammen

4.1.2 Markteinführung von EE-Stromerzeugung stimulieren

Die größten Erfolge bei der Markteinführung erneuerbarer Energien wurden bislang im Strombereich erzielt, wo sich das Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG als äußerst wirkungsvoll bewährt hat.

Die Fortsetzung der Markteinführung der EE-Stromerzeugung erfordert folgende Maßnahmen:

- Beibehaltung und kontinuierliche Weiterentwicklung des EEG
- Erhalt der Vorrangregelung zur Einspeisung erneuerbaren Energiestroms ins Stromnetz
- Ausgleichszahlungen für abgeregelten erneuerbaren Strom nur als Übergangsregelung- bis zum Netz- bzw. Speicherausbau
- Bonus für die bedarfsgerechte Energieversorgung (Regenerative Kombikraftwerke)
- Einführung eines saisonalen Energiespeicherbonus als Anreiz zur Entwicklung von Energiespeichertechnologien und -systemen

Aufgrund des großen Erfolgs des EEG plädiert der FVEE dafür, dass sich die deutsche Bundesregierung für eine europaweite Einführung von EEG-ähnlichen Instrumenten einsetzt.

4.1.3 Markteinführung von EE-Wärmeerzeugung stimulieren

Obwohl mehr als 50 % des Endenergieverbrauchs im Bereich Wärme anfällt und in vielen Wärmenutzungsbereichen Effizienz- und erneuerbare Energien-Technologien vorhanden und vorteilhaft sind, ist die Geschwindigkeit der Transformation in diesem Bereich bislang bei weitem nicht ausreichend. Mit dem Erneuerbare Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) wurde ein erster Anfang gemacht, der nun konsequent fortgesetzt werden muss.

Folgende Maßnahmen sind geeignet, die Markteinführung im EE-Wärmebereich zu beschleunigen:

- Verschärfung der Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV)
- Novellierung der Heizkostenverordnung
- Fortsetzung des Marktanreizprogramms (MAP) mit ausreichender finanzieller Ausstattung, besonders zur Stimulation von neuen Marktsegmenten wie Solarhäusern, Wärmenetzen mit erneuerbaren Energien etc.
- Ausweitung der Nutzungspflicht im EEWärmeG auf den Gebäudebestand
- Möglichkeit der Verrechnung erneuerbarer Energien bei der Erfüllung von Anforderungen bei Altbausanierungen

4.1.4 Markteinführung von EE-Mobilitätskonzepten stimulieren

Die Transformation des Transportsektors ist sehr aufwändig und langwierig, auch weil die erforderlichen Elektrofahrzeuge und Mobilitätssysteme heute noch nicht zur Verfügung stehen.

Neben der verstärkten Forschung und Entwicklung im Bereich Biotreibstoffe und Elektromobilität sind folgende Maßnahmen zur Markteinführung sinnvoll:

- Pilotprojekte zur Einführung von Elektrofahrzeugen
- Pilotprojekte zur Umsetzung innovativer Mobilitätskonzepte

13 Die EU-Mitgliedsstaaten haben sich auf eine gemeinsame Richtlinie mit einem anspruchsvollen Energieeinsparziel verständigt: Die EU-Richtlinie über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (2006/32/EG, EDL-Richtlinie) wurde am 5. April 2006 verabschiedet. Gemäß dieser EDL-Richtlinie sollen mit gezielten Maßnahmen in 9 Jahren 9 % Endenergie gegenüber einer Referenzperiode eingespart werden.

4.2 Ressourcenproduktivität erhöhen

Eine nachhaltige Energieversorgung muss nicht nur die Energieerzeugung im Blick haben, sondern auch die dafür notwendigen Stoffkreisläufe. Eine Voraussetzung für die Realisierung des Energiekonzepts 2050 ist eine radikale Verbesserung der Ressourcenproduktivität von Elementen und Materialien, die in einem Massenmarkt erneuerbarer Energietechnologien eine Rolle spielen, wie zum Beispiel Elemente für Stahllegierungen, Kupfer, Platin und Lithium. Doch auch alle anderen verwendeten Materialien sind in einen Stoffkreislauf einzubinden, von einer effizienteren Nutzung der Materialien bis zu einem möglichst vollständigen Recycling. Sowohl das sparsamere Nutzen von Materialen als auch die Recyclingprozesse zur Wiederverwendung der Stoffe ist mit Forschung und Entwicklung verbunden, die zu einem Querschnittthema werden müssen, das zu einem integralen Bestandteil aller Vorhaben gehört.

4.3 Infrastruktur und Rahmenbedingungen

4.3.1 Netze um- und ausbauen

Voraussetzung für Effizienzsteigerung und Integration steigender Mengen an fluktuierenden erneuerbaren Energien ist der Um- und Ausbau unserer Versorgungsnetze. Dafür sind u. a. folgende Maßnahmen erforderlich:

- Rascher und systematischer Ausbau des Stromnetzes zur Aufnahme und zum Transport des erneuerbar erzeugten Stroms in die Ballungszentren
- Förderprogramme für Maßnahmen zur Anpassung des Stromverbrauchs an fluktuierende Stromerzeugung, z. B. durch den Eigenverbrauch-Bonus im EEG
- Weiterentwicklung der zentralen zu dezentralen Stromnetzen
- Einführungsprogramme für ITC-Technologien
- Gezielter Ausbau von Nah- und Fernwärme- und -kältenetzen in Ballungszentren zur Erreichung der Ausbauziele für KWK- und erneuerbare Energien
- Pilotprogramme zur Einführung intelligenter Netze (Smart Grids)

4.3.2 Speicher integrieren

Hohe Anteile fluktuierender Energiequellen erfordern mittel- bis langfristig die Integration von Kurz-, Mittel- und Langzeitspeichern in die Strom-, Wärme-/Kälte- und Gasnetze. Auch wenn viele Speichertechnologien erst noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase sind, sollte mit der stufenweisen Integration von vorhandenen Speichertechnologien heute schon begonnen werden. Dafür sind u. a. folgende Maßnahmen sinnvoll:

- Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken und anderen elektrischen Speichern
- Ausbau von saisonalen Wärmespeichern in Wärmenetzen

4.3.3 Gaskraftwerke mit KWK ausbauen

Um in der Transformationsphase Kohle- und Kernkraftwerke zu ersetzen, sollten schnell regelbare Gaskraftwerke bzw. GuD-Anlagen - vorzugsweise mit Kraft-Wärme-Kopplung und dezentrale Kleinst-Blockheizkraftwerke (Motoren, Mikroturbinen, Brennstoffzellen) breit eingeführt werden.

4.3.4 Integration in europäisches Energiekonzept

Eine wichtige Voraussetzung für ein tragfähiges Energiesystem 2050 ist die Kompatibilität der nationalen Strategie mit einem gesamteuropäischen Ansatz. Dabei sind vor allem nationale Ausbauziele zu erneuerbaren Energien auf ihre Einflüsse in Bezug auf die sich daraus ergebenden Lastflüsse in den Netzen für Strom und Gas zu identifizieren. Auf dieser Basis lässt sich dann eine europäische Strategie zum Ausbau dieser Netze ableiten.

Wichtiges Element einer europäischen Vernetzung ist ein neues, sehr intelligentes und sehr leistungsfähiges Stromübertragungsnetz, das die bei der lokalen Stromerzeugung entstehenden Schwankungen großflächig ausgleicht. Denn es ist energetisch und wirtschaftlich vorteilhaft, dezentrale Energieversorgungsstrukturen über „Backbone"-Netze miteinander zu verbinden. Über diese Netze können mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien Lastschwankungen oder Angebotsschwankungen auch über große Entfernungen ausgeglichen und zusätzliche Stromlieferanten

eingebunden werden (z. B. Wasserkraft aus Skandinavien, Windenergie aus Portugal oder Solarstrom aus Nordafrika).

4.3.5 Aus- und Weiterbildung von Fachkräften

Eine erfolgreiche Transformation der Energieversorgung erfordert Fachkräfte, die diese technisch umsetzen. Diese stehen nur zur Verfügung, wenn die Aus- und Weiterbildung der Fachkräfte für ein erneuerbares Energieversorgungssystem zielgerichtet ausgebaut wird für alle Einsatzbereiche in Spitzenforschung, Produktentwicklung, Planung, Vertrieb, Installation und Energieberatung sowie den Behörden, die entsprechende Planungsaufgaben haben. Dazu gehören die Einrichtung von Bachelor- und Masterstudiengängen im Bereich Erneuerbare Energien ebenso wie ihre stärkere Integration in die berufliche Ausbildung.

4.4 Akzeptanz erhöhen und Öffentlichkeitsarbeit verstärken

Die vollständige Transformation des Energieversorgungssystems in wenigen Jahrzehnten erfordert die Akzeptanz und aktive Teilnahme der Bevölkerung sowohl als Investor, z. B. bei der Gebäudedämmung, als auch als Verbraucher, Betreiber und als politischer Souverän. Deshalb ist es unerlässlich, das Energiekonzept und das Transformationskonzept ausführlich zu kommunizieren und zu erläutern durch intensive und kontinuierliche Öffentlichkeitsarbeit für alle relevanten Zielgruppen. Generell sind soziale und gesellschaftspolitische Hemmnisse beim Transformationsprozess zu eruieren und zu überwinden. Insbesondere sollten folgende Kommunikationsziele verfolgt werden:

- Verständnis für die unbedingte Notwendigkeit der Nachhaltigkeitskriterien für eine künftige Energieversorgung (ökologisch, ökonomisch und sozial)
- Aufklärung über die Potenziale der Energieeffizienz und der Erneuerbaren, die Versorgungssicherheit gewährleisten
- Information über die technisch-wissenschaftlichen Innovationen, die neue Energieeffizienztechniken und Umwandlungstechniken ermöglichen und bekannte Techniken kostengünstiger machen
- Aufklärungsmaßnahmen zur Überzeugung von Gebäudeeigentümern Energieeinsparmaßnahmen umzusetzen und sich an Nahwärmenetze anzuschließen.
- Information über die wirtschaftlichen Potenziale der Energieeffizienz und der Erneuerbaren: Kostensenkungspotenziale, Arbeitsplatzschaffung, Exportpotenzial Werbung von Nachwuchs für Forschung und Wirtschaft für Erneuerbare.

4.5 Technologieentwicklung durch Forschung und Entwicklung

Jedes neue Energieversorgungssystem erfordert eine Vielzahl von weiterentwickelten und neuen Technologien, weshalb die Energieforschung deutlich ausgebaut werden muss. Die Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte in den kommenden Jahren werden im 6. Energieforschungsprogramm beschrieben, das Anfang 2011 verabschiedet werden soll.

Die Herausforderung in der Energieforschung besteht darin, verschiedene mögliche Entwicklungspfade offen zu halten und gleichzeitig die knappen finanziellen und Forschungsressourcen zielgerichtet genug einzusetzen, um die notwendigen Erfolge zu erzielen.

Das Energiekonzept 2050 plädiert dafür, die Verteilung der Ausgaben für Forschung und Entwicklung auf die verschiedenen Technologien an ihrer langfristigen Bedeutung zu orientieren. Entsprechend der Zielsetzung der Regierungskoalition und dem vorgestellten Energiekonzept 2050 ist deshalb bei der Forschungsförderung die Priorität auf die erneuerbaren Energien und Energieeffizienz zu legen.

Forschung und Entwicklung ist auch als Maßnahme der Industriepolitik zu begreifen. Denn nur dort, wo deutsche Produzenten im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz weltweit technologisch führend sind besteht die Chance, die Produktion von Komponenten des neuen Energieversorgungssystems in Deutschland zu halten. Deshalb müssen Markteinführung und Forschungspolitik Hand in Hand gehen.

Literatur

[1] Rolf Brendel: Entwicklung neuer Produktionstechnologien für die Solarenergienutzung, FVS-Themenheft 2007 „Produktionstechnologien für die Solarenergie“

[2] Robert Pitz-Paal: Strategische Ausrichtung des DLR für die Qualitätssicherung solarthermischer Kraftwerke, l12. Kölner Sonnenkolloquium, 9. Juni 2009

[3] Cerbe, G. (2008): Grundlagen der Gastechnik. Gasbeschaffung – Gasverteilung – Gasverwendung. 7., vollst. neu bearb. Aufl. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches (Hg.). München: Hanser

[4] David Nestle: „Dezentrales Energiemanagement im elektrischen Verteilnetz – was kann Gebäudeautomation beitragen?“, FVS-Themenheft 2008

[5] Gerhard Stryi-Hipp: Die Forschungsstrategie der Deutschen Solarthermie-Technologie-Plattform (DSTTP), Solarthermie Technologie Konferenz 26./27.1.2010

[6] WBGU-Gutachten 2010 „Transformation“ (noch in Arbeit – unveröffentlicht)

[7] WBGU-Gutachten 2008 „Welt im Wandel – Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung“

[8] Leitstudie 2008, Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas. Dr. Joachim Nitsch, Stuttgart, in Zusammenarbeit mit der Abteilung „Systemanalyse und Technikbewertung“ des DLR-Instituts für Technische Thermodynamik

[9] Nitsch, J., Wenzel, B., Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland – Leitszenario 2009; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Berlin; August 2009 und weiterführende Arbeiten.

[10] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): „100 % erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar“ Vorläufige Fassung vom 5. Mai 2010

[11] Kirchner, A.; Matthes F.; Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken; WWF; Basel/Berlin; Oktober 2009.

[12] IEA-Prognose 2008

[13] Bundesministerium für Wirtschaft, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen, Berlin 2008

[14] Specht, M.; Baumgart, F.; Feigl, B.; Frick, V.; Stürmer, B.; Zuberbühler, U.; Sterner, M.; Waldstein,. G. (2010): Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. Themenheft 2009 „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“ FVEE Jahrestagung 2009.

[15] Dr. Rolf-Michael Lücking, Prof. Dr. Gerd Hauser „Nachhaltige Energieversorgung von Gebäuden“, TAB-Technik am Bau, Zeitschrift für Technische Gebäudeausrüstung, 10, 2009, S. 62

[16] Prof. Dr. Gerd Hauser: Energieeffizientes Bauen – Umsetzungsstrategien und Perspektiven in „Energieeffizientes und solares Bauen“ FVEE-Themenheft 2008

[17] Sterner, M.; Schmid, J.; Wickert, M. (2008): Effizienzgewinn durch erneuerbare Energien – der Primärenergiebeitrag von erneuerbaren Energien. BWK No. 60, 08/2008. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag.

[18] (Harvard) Lu, X.; McElroya, M. B.; Kiviluomac, J. (2009): Global potential for wind-generated electricity. In: PNAS. www.pnas.org/content/early/2009/06/19/0904101106

[19] (UNDP) Goldemberg, J. (2000): World Energy Assessment.Energy and the Challenge of Sustainability. 1. print. New York, NY: UNDP/UN-DESA/World Energy Council

[20] (DLR) Teske, S.; Schäfer, O.; Zervos, A.; Beranek, J.; Tunmore, S.; Krewitt, W. et al. (2008): energy [r]evolution. A Sustainable Global Energy Outlook. Greenpeace und European Renewable Energy Council. Berlin. www.energyblueprint.info/

[21] FAO (2008b): The State of Food and Agriculture 2008: Biofuels – Prospects, Risks and Opportunities. Rome: FAO.

[22] BP (2009): BP Statistical Review of World Energy June 2009. London: BP.

[23] Von Bremen, L.; Hofmann (2009): Storage and Transport Capacities in Europe for a full Renewable Power Supply System. Fraunhofer IWES Studie für Siemens AG. Präsentation auf der ewec 2009 (European Wind Energy Conference). Marseille.

[24] Sterner, M.; Pape, C.; Gerhardt, N.; Jentsch, M.; Saint-Drenan, Y.M.; von Oehsen, A. (2010): Modellierung einer 100-Prozent erneuerbaren Stromerzeugung in 2050 – das UBA Szenario Regional. Unveröffentlichte Studie, Fraunhofer IWES, Umweltbundesamt: Kassel, Dessau.

[25] Sterner, M.; Specht, M.; Gerhardt, N.; Saint-Drenan, Y. M.; Stürmer, B.; Zuberbühler, U. (2010): Erneuerbares Methan – Eine Lösung zur Integration und Speicherung Erneuerbarer Energien und ein Weg zur regenerativen Vollversorgung. Solarzeitalter 01/2010. Eurosolar, Berlin. www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/SZA%201_2010_Sterner_farbig.pdf

[26] Michael Sterner. Bioenergy and renewable power methane in 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Dissertation, Universität Kassel 2009. www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-89958-798-2

[27] Mackensen, R.; Rohrig, K.; Emanuel, H. (2008): Das Regenerative Kombikraftwerk; Abschlussbericht. ISET e. V. Kassel.

[28] Sterner, M.; Gerhardt, N.; Saint-Drenan, Y.M.; von Oehsen, A.; Hochloff, P.; Kocmajewski, M.; Lindner, P.; Jentsch, M.; Pape, C.; Bofinger, S.; Rohrig, K. (2010): Energiewirtschaftliche Bewertung von Pumpspeicherwerken und anderen Speichern im zukünftigen Stromversorgungssystem. Fraunhofer IWES, Kassel. www.schluchseewerk.de/105.0.html

[29] Robert Pitz-Paal, Henner Gladen, Werner Platzer: Solarthermische Kraftwerke – Exportschlager ohne Heimatmarkt, FVEE-Themenheft 2009

[30] Dr. Knut Kübler (BMWi), „Der Schlüssel für mehr Energieeffizienz in Deutschland: Neue Technologien für energieoptimierte Gebäude“, FVEE-Themenheft 2008 „Energieeffizientes und solares Bauen“

[31] BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Energiezahlen (2008). Berlin, BMWi.

[32] Jürgen Schmid, et al. „Integration der erneuerbaren Energien in die Strom- und Wärmeversorgung“ Themenheft 2009 „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“

[33] Forschungsstrategie des FVEE für elektrochemische Stromspeicher und Elektromobilität (April 2010) Link: www.fvee.de/fileadmin/politik/10_04_strategie_stromspeicher_kurzfassung.pdf

[34] Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung, August 2008

[35] Bundesministerium für Wirtschaft und technologie (BMWi): Trends und Hintergründe zur Energieversorgung in Deutschland. Berlin. April 2009.

[36] Friedrich, M., Becker, D., Grondey, A., Laskowski, F., Erhorn, H., Erhorn-Kluttig, H., Hauser, G., Sager, Ch. und Weber, H: CO_2-Gebäudereport 2007. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin (2007).

[37] Eicke R. Weber, Der globale Forschungsmarkt für erneuerbare Energien: Wettbewerb und Technologiepartnerschaften, FVEE-Themenheft 2009 „Forschen für globale Märkte“

[38] Patent DE102006034712 A1, Verfahren zur Reduzierung der CO_2-Emission fossil befeuerter Kraftwerksanlagen, Anmelder: Steag-Saar Energie und IZES gGmbH

[39] EU-Richtlinie über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (2006/28/EG, EDL-Richtlinie) vom 5. April 2006

Impressum

Das Konzept wurde vom FVEE-Fachausschuss „Nachhaltiges Energiesystem 2050“ erstellt in Zusammenarbeit mit dem Direktorium.

Mitglieder des FVEE-Fachausschusses „Nachhaltiges Energiesystem 2050“

Federführung:
Prof. Dr. Jürgen Schmid (Fraunhofer IWES)

Dr. Andreas Hauer (ZAE Bayern)
Dr. Dietrich Schmidt (Fraunhofer IBP)
Maike Schmidt (ZSW)
Prof. Dr. Frithjof Staiß (ZSW)
Dr. Gerd Stadermann (FVEE)
Dr. Michael Sterner (Fraunhofer IWES)
Gerhard Stryi-Hipp (Fraunhofer ISE)

Dank sagen für ihre Mitarbeit möchten wir auch Herrn Dr. Joachim Nitsch (DLR), Dr. Kurt Rohrig und Dr. Hans-Gerd Busmann (Fraunhofer IWES), Prof. Dr. Uwe Leprich (IZES), Andreas Püttner (ZSW) und Petra Szczepanski (FVEE).

Das Energiekonzept 2050 wird von folgenden Mitglieds-instituten und Direktoren getragen

- Fraunhofer IBP – Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Prof. Dr. Gerd Hauser
- Fraunhofer ISE – Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme: Prof. Dr. Eicke Weber
- Fraunhofer IWES – Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik: Prof. Dr. Jürgen Schmid
- ISFH – Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal: Prof. Dr. Rolf Brendel
- IZES gGmbH – Institut für ZukunftsEnergie-Systeme: Prof. Dr. Horst Altgeld
- ZAE Bayern – Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung: Prof. Dr. Vladimir Dyakonov
- ZSW – Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg: Prof. Dr. Frithjof Staiß

Gesamtproduktion

Hoch3 GmbH – Design- und Werbeagentur

Berlin, Juni 2010

Geschäftsstelle des ForschungVerbunds Erneuerbare Energien c/o Helmholtz-Zentrum Berlin • Kekuléstraße 5
12489 Berlin Telefon: 030/8062-1338 • Telefax: 030/8062-1333 • fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de