

Beitrag des FVEE zum 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Forschungsaufgaben
in den Bereichen
erneuerbare Energien,
Energieeffizienz und
Systemintegration

Beitrag des FVEE zum 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Forschungsaufgaben in den Bereichen
erneuerbare Energien, Energieeffizienz
und Systemintegration

Erarbeitet vom Fachausschuss 6. Energieforschungsprogramm
des ForschungsVerbund Erneuerbare Energien FVEE

Oktober 2010

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Visionen für das Energiesystem 2050	4
1.2	Verstärkung der Forschungsförderung erneuerbare Energien und Energieeffizienz	5
1.3	Forschungsstrukturen	7
1.4	Wirtschaftliche Vorteile eines erneuerbaren Energiesystems	8
1.5	Schwerpunkt Systemtechnik	9
1.6	Aufbau dieses Dokuments und Anleitung zur Nutzung	9
2	Energiebereitstellung	11
2.1	Photovoltaik	11
2.2	Solarthermische Wärme- und Kälte-Erzeugung	25
2.3	Solarthermische Stromerzeugung	29
2.4	Bioenergie	33
2.5	Geothermie	35
2.6	Windenergie	38
2.7	Meeresenergie	46
2.8	Wasserkraft	48
3	Energietransport, -verteilung, -speicherung	50
3.1	Elektrische Systemtechnik	50
3.2	Netze für Gas-, Wärme- und Kälteverteilung	56
3.3	Chemische Speicher	59
3.4	Elektrochemische Speicher	65
3.5	Thermische Energiespeicher	68
4	Energieumwandlung	72
4.1	Elektrisch und thermisch angetriebene Wärmepumpen	72
4.2	Adsorptions- und Absorptionskühlung	75
4.3	Kraft-, Wärme-, (Kälte-)Kopplung	78
4.4	Brennstoffzellen	80
4.5	Elektrolyse	82
5	Energienutzung	85
5.1	Energieeffizientes und solares Bauen	85
5.2	Energiesystem Stadt – Smart Cities	88
5.3	Elektromobilität	91
6	Systemanalyse und Transformationsforschung	95
6.1	Systemanalyse und Technikfolgenabschätzung	95
6.2	Transformationsforschung	98
	Literatur	101
	Autoren	107
	Standorte der FVEE-Mitgliedsinstitute	108
	Mitgliedsinstitute und Ansprechpartner	109
	Impressum	110



1 Einleitung

Derzeit werden grundlegende Weichenstellungen für die Energieversorgung in Deutschland und Europa gestellt. Der zunehmende Klimawandel, die steigende Importabhängigkeit von knapper werdenden fossilen und nuklearen Energieressourcen und stark fluktuierende Energiepreise erfordern eine grundsätzliche Neuausrichtung des Energiesystems. Wir werden unsere Lebensqualität und unseren Wohlstand auch für unsere Kinder nur erhalten können, wenn es uns gelingt, in den nächsten drei bis vier Jahrzehnten unser heutiges Energiesystem in Deutschland und Europa vollständig zu einem nachhaltigen System umzubauen.

Mit dem „Beitrag für das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“ empfiehlt der Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) Wege der Forschung und Entwicklung für ein Energiesystem, in dem erneuerbare Energien und Energieeffizienz eine zentrale Rolle spielen.

Auch wenn aktuell noch viele Fragen über den richtigen Weg in der Energiepolitik offen sind, besteht ein breiter gesellschaftlicher und politischer Konsens über das Ziel, langfristig die Energieversorgung auf einem möglichst großen Anteil erneuerbarer Energien aufzubauen. Die Bundesregierung macht in Ihrem Energiekonzept vom 28. September 2010 deutlich: „Beim Energiemix der Zukunft sollen die erneuerbaren Energien den Hauptanteil übernehmen“ [BReg 2010]. Etwa 60 % des Energiebedarfs sollen im Jahr 2050 von den erneuerbaren Energien gedeckt werden. Einige Forschungsinstitute des FVEE halten sogar eine 100 %-Versorgung mit erneuerbaren Energien in der Mitte des Jahrhunderts für möglich [FVEE 2010-1] [FVEE 2010-2]. In die gleiche Richtung zeigen Gutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU) [SRU 2010] und auch des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung globale Umweltveränderungen (WBGU).

Große Einigkeit besteht auch darin, dass mit dem Umbau der Energieversorgung eine Vielzahl neuer beziehungsweise deutlich weiter entwickelter Technologien in Bereitstellung, Transport, Verteilung, Speicherung, Umwandlung und Nutzung von Energie eingesetzt werden müssen. Forschung und Entwicklung von Energietechnologien sind

dafür grundlegende Voraussetzung. Angesichts der umfangreichen Aufgabe und des bestehenden Zeitdrucks müssen die Energieforschung und Technologieentwicklung deutlich intensiviert und Innovationsprozesse beschleunigt werden.

Das 6. Energieforschungsprogramm, das Anfang 2011 von der Bundesregierung beschlossen werden soll, wird für die Energieforschung in den kommenden Jahren wegweisend sein. Es hat die Aufgabe, die Weichen für Forschung und Entwicklung so zu stellen, dass der Umbau des Energiesystems möglich wird. Zudem soll es Deutschland helfen, weiterhin Technologieführer in den Energietechnologien zu bleiben, die weltweit an Bedeutung zunehmen werden.

Für das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung lassen sich daraus vor allem zwei Grundsätze ableiten:

1. **Die Energieforschung muss deutlich und dauerhaft intensiviert werden.**
2. **In der Energieforschung muss eine deutliche Stärkung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz erfolgen, da sie die wichtigsten Pfeiler des künftigen Energiesystems sind.**

Von diesen Grundsätzen ausgehend hat der Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) im vorliegenden „Beitrag zum 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“ eine Übersicht über die wichtigsten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben im Bereich erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Transformation des Energiesystems zusammengestellt. Diese Übersicht macht deutlich, wie vielfältig die technologischen Herausforderungen sind, sie zeigt aber auch, wie groß das technologische Entwicklungspotenzial im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz ist, das nun gezielt erschlossen werden muss.

Bereits mit dem 5. Energieforschungsprogramm (2004–2010) hat die Bundesregierung im Bereich der Energieeffizienz- und erneuerbarer Energietechnologien eine erfolgreiche Entwicklung angestoßen. Diese haben sich im Zuge einer stetig zunehmenden Forschungsförderung, die insgesamt zu einer Verdopplung der Projektfinanzie-

rung geführt hat, zu ernstzunehmenden Technologien entwickelt, die heute schon einen nennenswerten Beitrag zur Energieversorgung leisten, obwohl sie erst am Anfang der Technologieentwicklung stehen.

Diese Entwicklung gilt es fortzusetzen und im 6. Energieforschungsprogramm deutlich zu intensivieren. Die gegenwärtige Innovationsdynamik muss durch eine deutliche Ausweitung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Forschungsinstituten, Universitäten und der Industrie verstärkt werden, um im Transformationsprozess die notwendigen Effizienz- und erneuerbare Energietechnologien rechtzeitig bereitstellen und schnellstmöglich ihre Kosten bis zur Wettbewerbsfähigkeit reduzieren zu können. Entscheidend ist deshalb die Fokussierung des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung vor allem auf Effizienz- und erneuerbare Energien-Technologien.

Da die Mitgliedsinstitute des FVEE in allen Bereichen der erneuerbaren Energien und Energieeffizienztechnologien tätig sind, ist der FVEE in der Lage, in den kommenden Kapiteln umfassende Empfehlungen für die künftige Forschungsförderung in diesem Bereich zu geben.

1.1 Visionen für das Energiesystem 2050

Die Bundesregierung hat am 28. September 2010 erstmals einen Entwurf für ein umfassendes Energiekonzept beschlossen, das prinzipiell sehr zu begrüßen ist, da es weitreichende Zielsetzun-

gen nennt und die Notwendigkeit für einen grundlegenden Umbau des Energiesystems unterstreicht (siehe Tab. 1). In den Handlungsfeldern wurden Maßnahmen vorgeschlagen, die den gezielten Umbau des Energiesystems voranbringen sollen [BReg 2010].

Bis 2050 soll der Primärenergieverbrauch um 50 % sinken, was die Bedeutung von Effizienztechnologien belegt. Erneuerbare Energien sollen einen Anteil von 60 % am Bruttoendenergieverbrauch einnehmen und damit zur Hauptenergiequelle werden. Allerdings baut das Energiekonzept der Bundesregierung sehr stark auf den forcierten Ausbau der Bioenergie auf. Vor dem Hintergrund der limitierten Biomasse-Ressourcen, der Nutzungskonkurrenz zwischen Nahrung und energetischer Nutzung bei gleichzeitig großen Potenzialen anderer erneuerbarer Energien in Deutschland im Bereich Photovoltaik, Solarthermie und Geothermie, empfiehlt sich ein wesentlich breiterer Mix aller erneuerbaren Energien. Die parallele Entwicklung aller erneuerbaren Energien ist auch als Maßnahme zur Risikoreduzierung im Transformationsprozess zu verstehen, denn bei einer breiteren Nutzung mehrerer Technologien ist es leichter möglich, Pläne nachzuzustieren.

Der Forschungsverbund Erneuerbare Energien hat im Jahr 2010 die weitergehende Vision eines nachhaltigen Energiesystems diskutiert. Einige Institute kommen dabei zum Ergebnis, dass bis 2050 sogar eine vollständige Versorgung mit erneuerbaren Energien möglich ist [FVEE 2010-1], [FVEE 2010-2]. Für dieses nachhaltige Energiesystem wurde ein quantitatives Konzept entwickelt. Dabei leisten alle erneuerbaren Energien einen wichtigen

Tabelle 1
Energiepolitische Zielsetzungen der Bundesregierung bis zum Jahr 2050
Quelle: [BReg 2010]

Zielsetzungen für das Jahr:	2020	2030	2040	2050
Reduktion Treibhausgasemissionen (gegenüber 1990)	-40%	-55%	-70%	-80–95%
Reduktion Primärenergieverbrauch (gegenüber 2008)	-20%	Steigerung Energieproduktivität um 2,1%/a		-50%
Reduktion Stromverbrauch (gegenüber 2008)	-10%			-25%
Reduktion Endenergieverbrauch im Verkehrsbereich (gegenüber 2005)	-10%			-40%
Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch	18%	30%	45%	60%
Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch	35%	50%	65%	80%



Beitrag, wobei die Biomassenutzung vor allem auf Rest- und Abfallstoffen aufbaut, da Biomasse nur begrenzt vorhanden ist und eine steigende stoffliche Nutzung erwartet wird. Ebenso ist die Nutzung von neuen Technologien wie Effizienztechnologien, Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetze (HGÜ), Smart Grids, erneuerbar erzeugter Wasserstoff und Methan, Elektrofahrzeuge und vor allem Effizienztechnologien vorgesehen.

Die Eckpunkte für eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien sind:

- Die wichtigsten Beiträge in der Stromversorgung kommen aus Wind, Sonne, Wasserkraft, Geothermie und biogenen Reststoffen.
- Im Wärmesektor kommen die Beiträge aus der Anwendung von Kraft-Wärme-Kopplung, Solarthermie und Wärmepumpen.
- Die Einführung der Elektromobilität führt im Verkehrssektor zu einer erheblichen Effizienzsteigerung.
- Auch in allen anderen Bereichen wird durch Effizienzsteigerungen der Energiebedarf erheblich reduziert.
- Die Nutzung von mit erneuerbaren Energien produzierten chemischen Energieträgern in Form von Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen wie z. B. Methan, ermöglicht eine Speicherung der Überschüsse von Wind- und Sonnenenergie und erlaubt die Umwandlung von Strom in Kraftstoffe und Wärme.
- Eine Vernetzung der Elemente des Energiesystems über ein europaweites Verbundnetz mit hoher Kapazität und lokalen Smart-grids sowie der Ausbau von Speicherkapazitäten gewährleistet trotz hoher Anteile von fluktuierender Wind- und Solarenergie zu jedem Zeitpunkt eine hohe Versorgungssicherheit der elektrischen Energieversorgung.
- Auf den Import von flüssigen und gasförmigen Energieträgern aus außereuropäischen Ländern kann verzichtet werden.
- Das erneuerbare Energiekonzept ist langfristig kostengünstiger als nicht nachhaltige Konzepte und schafft mehr Arbeitsplätze.
- Die Transformation des Energiesystems erfordert die Akzeptanz der Bevölkerung und muss deshalb wissenschaftliche begleitet, erläutert und kommuniziert werden.

1.2 Verstärkung der Forschungsförderung für erneuerbare Energien und Energieeffizienz

Der grundlegende Umbau des Energiesystems setzt die Verfügbarkeit und den Einsatz einer Vielzahl neuer Technologien für Bereitstellung, Transport, Verteilung, Speicherung, Umwandlung und Nutzung von Energie sowie neuer Methoden im Bereich Systemanalyse, Technikfolgenforschung und Transformationsforschung voraus. Die Bundesregierung hat dementsprechend in ihrem Energiekonzept die Notwendigkeit einer „tiefgreifenden Modernisierung der Energiewirtschaft“ und „zukunftsweisender Innovationen“ unterstrichen.

Die Weichen für die erforderlichen Forschungsaktivitäten sollen mit dem 6. Energieforschungsprogramm gestellt werden, das die Bundesregierung im Jahr 2011 verabschieden will und das für die Zeit bis 2020, und in Eckpunkten darüber hinaus, die Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten beschreiben soll. Der FVEE stimmt mit der Bundesregierung überein, als Schwerpunkte im 6. Energieforschungsprogramm die Themen erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Energiespeichertechnologien, Netztechnik sowie Integration der erneuerbaren Energien in die Energieversorgung und das Zusammenwirken von diesen Energietechnologien zu setzen.

Der Umbau des Energiesystems kann nur mit einer deutlichen Ausweitung der Forschungsaktivitäten und Erhöhung der Forschungsförderung bewältigt werden. Deshalb ist die Ankündigung der Bundesregierung, das Budget des Bundes für die Energieforschung ab dem Jahr 2011 zu erhöhen, sehr zu begrüßen. Der Umfang der Erhöhung muss eine signifikante Erhöhung des bisherigen Energieforschungsbudget von 691 Mio. Euro im Jahr 2010 darstellen und damit die Steigerungen der letzten Jahre beschleunigt fortsetzen (siehe Tab. 2).

Unter der Energieforschung nimmt die Projektforschungsförderung der erneuerbaren Energien, für die das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) mit Ausnahme der Biomasseförderung zuständig ist,

Tabelle 2

Ausgaben für die Energieforschung und die Forschung für erneuerbare Energien im Bundesumweltministerium von 2005 bis 2010

Quelle: [BMU 2010], [BMBF 2010]

Ausgaben für Energieforschung (in Mio Euro)	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Ausgaben des Bundes für Energieforschung und Energietechnologie im Bereich Forschung und Entwicklung	450,0	444,6	468,2	517,5	678,4	691,0
<i>Davon:</i>						
Nukleare Energieforschung (ohne Beseitigung kerntechnischer Anlagen)	88,7	89,3	87,8	94,7	108,8	110,4
Beseitigung kerntechnischer Anlagen; Risikobeteiligung	4,0	4,2	4,1	7,7	33,6	34,6
Kernfusionsforschung	115,0	114,4	121,5	119,4	142,5	143,0
Kohle und andere fossile Energieträger/ Erneuerbare Energien und rationelle Energieverwendung	242,3	236,8	254,8	295,7	393,5	403,0
<i>Davon:</i>						
Forschungsförderprogramm für Erneuerbare Energien des Bundesumweltministeriums	85,8	81,2	81,3	98,5	109,6	120,0

mit 120 Mio Euro im Jahr 2010 und damit 17 % der gesamten Energieforschungsausgaben bislang nur eine untergeordnete Rolle ein. Allerdings wird Forschung im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz auch durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert, wobei das BMBF auch für die institutionelle Förderung großer Forschungseinrichtungen zuständig ist, die teilweise auch im Bereich der erneuerbaren Energien tätig sind.

Da der Anteil der Forschung erneuerbarer Energien zusammen mit der Förderung der Energieeffizienztechnologien bislang unter 50 % der gesamten Energieforschungsausgaben liegt, diese aber langfristig in der Lage sein sollen, 60 % bis 100 % des Energiebedarfs zu decken und dabei erst am Anfang ihrer Entwicklung stehen, muss im Rahmen der anstehenden Budgeterhöhung auch der Anteil der erneuerbaren Energien und Energieeffizienz an den Energieforschungsausgaben deutlich ansteigen.

Für die künftige Forschungsförderung ergeben sich deshalb folgende Anforderungen:

Erforschung der gesamten Breite erneuerbarer Energien- und Energieeffizienztechnologien

Das Energiekonzept der Bundesregierung misst der Bioenergie im künftigen Energiemix eine relativ große Bedeutung bei. Um aber auch andere Szenarien für einen Energiemix mit 60 % erneuerbaren Energien im Jahr 2050 oder höher zu ermöglichen, ist die Erforschung der erneuerbaren Energien- und Effizienztechnologien in der gesamten Breite erforderlich, insbesondere auch deshalb, weil die Biomasse in zwei Jahrzehnten eventuell viel stärker stofflich genutzt werden wird.

Zusätzliche Forschungsmittel für erneuerbare Energien und Energieeffizienz einsetzen

Forschung, Entwicklung und Demonstration der einzelnen erneuerbaren Energien- und Effizienztechnologien müssen deutlich intensiviert werden, sie erhalten bislang weniger als 50 % der Finanzmittel für Energieforschung, was angesichts ihrer Bedeutung im künftigen Energiesystem deutlich erhöht werden muss. Es empfiehlt sich, die Budgeterhöhung der Energieforschung vor allem im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz einzusetzen.

Ausgewogener Mix aus Grundlagen-, Vorlauf- und angewandter Forschung

Neben der Verstärkung der angewandten Forschung mit dem Ziel, baldmöglichst sichtbare Erfolge im Energiesystem zu erreichen, darf die Grundlagen- und Vorlaufforschung nicht vernachlässigt werden, um die nächsten Technologiegenerationen vorzubereiten.



1.3 Forschungsstrukturen

Steuerung der Forschungsförderung

Mit der Intensivierung der Energieforschung geht auch der Ruf nach einer stärkeren Koordination und Steuerung der Forschungsförderung einher. Der von der Bundesregierung angekündigte Ausbau der „Koordinierungsplattform Energieforschungspolitik“ und die Erhöhung der Transparenz durch ein zentrales Informationssystem werden von Seiten des FVEE sehr begrüßt.

Die teilweise geforderte Zentralisierung der Steuerung der gesamten Energieforschung ist aus Sicht des FVEE dagegen weder erforderlich noch sinnvoll. Der FVEE empfiehlt deshalb, die Steuerung der Energieforschung in zwei oder drei Bereiche zu bündeln (erneuerbare Energien und Energieeffizienz einerseits und andererseits fossile Energien und Nuklearenergie, ebenfalls jeweils verbunden mit Energieeffizienz). Die Verteilung der Forschungsbudgets auf diese Bereiche sollte sich an der Bedeutung der einzelnen Technologien im künftigen Energiemix und der hieraus abzuleitenden technologischen Herausforderungen orientieren.

Vernetzung dezentraler Forschungsstrukturen

Die Forschung im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz ist bislang sehr dezentral strukturiert. Dies entspricht der großen Vielfalt der unterschiedlichen Herausforderungen für Forschung und Entwicklung in den einzelnen Technologien. Diese reichen von der Halbleiterforschung in der Photovoltaik über den Maschinenbau im Windbereich, zur Verbrennungstechnik in der Biomasse und der Thermodynamik in der Solarthermie, um nur einige wenige Beispiele zu nennen. Die dezentralen Forschungsgruppen nutzen dabei vielfach auch das Know-how anderer Fachbereiche und Institutionen vor Ort für die Bearbeitung ihrer spezifischen Forschungsaufgaben und befördern damit auch den Technologietransfer in kleine und mittelständische Unternehmen (KMU). Eine zentrale Großforschungseinrichtung könnte diese lebendige Vielfalt an technologischen Ansätzen nicht erhalten, weshalb die Dezentralität der Forschung und Entwicklung erneuerbarer Energien unerlässlich ist. Die Schaffung eines Großforschungszentrums im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz wäre aus Sicht des FVEE kontraproduktiv und ist deshalb nicht zu empfehlen.

Mit den steigenden Herausforderungen, vor allem auch in den Fragen der Systemtechnik ist eine Stärkung der teilweise noch kleinen, oftmals aber international renommierten Forschungsgruppen und -institutionen erforderlich, um in relevanten Bereichen eine kritische Masse an Forschungskapazitäten zu schaffen. Dabei empfiehlt es sich, die dezentralen Forschungseinrichtungen im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz durch gezielt geförderte Netzwerkforschung zu stärken.

Ein erfolgreiches Beispiel einer Selbstorganisation vernetzter, dezentraler Forschung und Entwicklung ist der Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE). Er vertritt 11 Forschungsinstitute bzw. -institutionen mit ca. 2000 Mitarbeitern und repräsentiert damit etwa 80 % der Forschung im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Deutschland. Er hat sich seit seiner Gründung vor 20 Jahren zu einem leistungsfähigen und europaweit größten Forschungsnetzwerk entwickelt, das einer dezentralen Großforschung entspricht. Die wichtigsten Forschungs- und Entwicklungsergebnisse der letzten 20 Jahre auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien, Energieeffizienz, Brennstoffzellen, Energiespeicherung, Systemtechnik und Systemanalyse wurden innerhalb des FVEE erzielt.

Die Stärke des FVEE-Verbunds ist, dass neben der exzellenten Forschung in den Sparten der Mitgliedsinstitute die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Instituten lebendig ist. Da viele Fragestellungen im Bereich der erneuerbaren Energien interdisziplinäre Forschungsansätze erfordern, bietet der FVEE eine effiziente Basis, um Netzwerke zur Bearbeitung dieser Aufgabenstellungen zu bilden.

Der Ausbau von Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz bedarf auch einer engeren Vernetzung universitärer, institutioneller und industrieller Forschung und Entwicklung, um einen schnelleren und effizienteren Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zu ermöglichen. Grundlage hierfür ist der Ausbau der Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur.

Vereinheitlichung der Projektförderung auf Bundesebene

Beim Ausbau der dezentralen Forschungsinstitute ist für ein gesundes Wachstum auch die Herstellung von vergleichbaren Rahmenbedingungen im Wettbewerb um Forschungsmittel erforderlich. So haben Forschungsinstitute auf Länderebene, die in den vergangenen Jahren teilweise zu bedeutenden Einrichtungen der Energieforschung auf den Gebieten der erneuerbaren Energien, der Energieeffizienz und der Energiespeicherung geworden sind, bislang keine Möglichkeit, die verschiedenen Fördermodelle in gleicher Weise in Anspruch zu nehmen wie sie Bundeseinrichtungen gewährt wird.

Die existierende unterschiedliche Forschungsförderpraxis für Bundes- und für Landesinstitute behindert einen fairen Wettbewerb um Forschungsmittel und verhindert den Ausbau exzellenter Forschungskapazitäten. Es ist deshalb eine Angleichung der Förderbedingungen erforderlich, die sowohl im Interesse der Landes- als auch der Bundesinstitute liegt.

1.4 Wirtschaftliche Vorteile eines erneuerbaren Energiesystems

Es besteht in Deutschland ein breiter gesellschaftlicher Konsens zur Notwendigkeit einer zügigen Transformation des bestehenden Energiesystems. Nicht zuletzt dadurch konnte mit hoher Kontinuität eine internationale Vorreiterrolle bei der Erschließung erneuerbarer Energien erreicht werden. Dies trägt erste Früchte: Die Förderung erneuerbarer Energien ist zum wichtigsten Klimaschutzinstrument in Deutschland geworden und es ist eine Branche mit über 300.000 Beschäftigten entstanden, die im In- und Ausland schon heute zweistellige Milliardenumsätze erwirtschaftet. Die umfassende Erhöhung der Energieeffizienz in allen Bereichen senkt den spezifischen Primärenergieverbrauch, der zur Erreichung der angestrebten Transformation notwendig ist.

Internationale Spitzenforschung und der schnelle Transfer von Ergebnissen aus der Wissenschaft in die Wirtschaft waren und sind ein Garant für diese Erfolge und die hohe Wettbewerbsfähigkeit der

Unternehmen. Dafür verfügt Deutschland in der thematischen Breite und Struktur über eine weltweit einzigartige Forschungslandschaft.

Beachtliche Fortschritte bei der technischen Leistungsfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit von energietechnischen Anlagen haben zum Entstehen internationaler Märkte für erneuerbare Energien geführt. Damit ist aber gleichzeitig der Aufbau von Wertschöpfungsketten und Forschungskapazitäten im Ausland verbunden und eine steigende Zahl global agierender Unternehmen ist in der Lage, sich Forschungsleistungen bei den weltweit Besten zu sichern. Auf dem Schlüsselmarkt „Erneuerbare Energien und Energieeffizienz“ der nächsten Jahrzehnte ist wachsender Erfolg nur möglich, wenn es gelingt, sich im rasch stärker werdenden unternehmerischen und wissenschaftlichen Wettbewerb zu behaupten. Für die Absicherung der in weiten Bereichen vorhandenen Technologieführerschaft Deutschlands, ist es daher zwingend, die wissenschaftliche Basis deutlich und nachhaltig zu stärken.

Der FVEE empfiehlt eine klare Stärkung der Energieforschung auf den Bereich der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz, weil die Entwicklungspotenziale nach wie vor immens sind und die erneuerbaren Energien in eine Phase der Marktdurchdringung eintreten, in der neue Technologiepfade und die Kopplung von Systemen und Anwendungsfeldern ganz neue Chancen bietet, aber auch Herausforderungen stellt. Beispiele hierfür sind die Speicherung von Elektrizität, regenerative Mobilität und die Optimierung von Netzinfrastrukturen. Dies bedeutet die systemischen Weichen in Richtung einer nachhaltigen Energieversorgung so zu stellen, dass sich die Energieeffizienztechniken mit den erneuerbaren Energietechnologien zu einem flexiblen, leistungsfähigen und dynamischen Energiesystem verbinden.



1.5 Schwerpunkt System - technik zur Verknüpfung der Energietechnologien

Neben den Forschungsthemen einzelner Technologien der erneuerbaren Energien, der Netz- und Speichertechnik und der Energieeffizienz muss insbesondere die Systemtechnik ein neuer Schwerpunkt in der künftigen Energieforschung werden. Denn das künftige Energiesystem wird vielfältiger, komplexer, dezentraler, es wird ein wesentlich stärker fluktuierendes Angebot und einen variablen Verbrauch aufweisen und gleichzeitig auch einen großräumigen, europäischen Ausgleich umfassen. Es wird wesentlich stärker vernetzt sein und benötigt deshalb eine intelligente Konzeption und eine intelligente Steuerung. Den systemtechnischen Fragestellungen ist deshalb eine besondere Aufmerksamkeit im 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung zu schenken.

Dabei sind u. a. folgende Aspekte wichtig:

- Neue Systemlösungen sind zu entwickeln, die die technologische Wechselwirkung der Energieeffizienztechniken mit erneuerbaren Energie- und Speichertechniken optimieren wie z. B. mit Strom aus erneuerbaren Energien betriebene Wärmepumpen, die energiewirtschaftlich eine hohe Effizienz aufweisen.
- Die optimale systemtechnische Einbindung und Markteinführung von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs (KWKK)-Technologien ist gezielt zu entwickeln, da sie mit umfangreichen Investitionen in Wärme- und Kältenetzen verbunden sind.
- Die Umwandlung der Energieträger Strom, Wärme, Kälte und Kraftstoff untereinander führt zu deutlichen Effizienzsteigerungen im Gesamtsystem beziehungsweise zu einer höheren Versorgungssicherheit, weshalb hierfür intelligente System- und Steuerungskonzepte entwickelt werden müssen.
- Energiebereitstellung, -speicherung und Nutzung müssen intelligent verknüpft werden, um eine hohe Netzstabilität und Versorgungssicherheit bei möglichst geringen Leistungsreserven trotz wachsendem Anteil fluktuierender Energiequellen zu gewährleisten.
- Fragen der intelligenten Stromnetzregelung sind gezielt zu bearbeiten, da das heute von

rotierenden Generatoren gespeiste und stabilisierte Stromnetz in ein leistungselektronisch, stromrichtergeführtes Netz übergeht, dafür sind leistungsfähige Kommunikationsstrukturen, Online- und Prognoseverfahren für die Netzeinsatzplanung sowie bidirektionale Energiemanagement und -handelssysteme für den Dialog zwischen Energieerzeuger, Verteiler und Verbraucher zu entwickeln.

- Die Synergieeffekte bei der systemischen Verknüpfung von erneuerbaren Energien und Effizienztechnologien müssen identifiziert werden, um die einzelnen Energietechnologien nicht unabhängig voneinander zu optimieren. In diesem Beitrag soll gezeigt werden, wie sich die erneuerbaren Energien in ihren systemischen Eigenschaften miteinander ergänzen und zusammen mit Energieeffizienz- und Speichertechnologien zu einem zuverlässigen und robusten „Regenerativen Kombikraftwerk Deutschland“ entwickeln lassen.

1.6 Aufbau dieses Dokuments und Anleitung zur Nutzung

Dieser „Beitrag zum 6. Energieforschungsprogramm“ beschreibt alle Technologien aus dem Bereich erneuerbare Energien und Energieeffizienz, die für ein erneuerbares, nachhaltiges Energiesystem erforderlich sind. Mit der Bezeichnung „erneuerbare Energien und Energieeffizienztechnologien“ werden im Folgenden immer auch alle Technologien verstanden, die zur Realisierung eines erneuerbaren Energiesystems erforderlich sind, also auch die entsprechende Netztechnik, die Speichertechnologie und insbesondere die Systemtechnik sowie die Systemanalyse, Technikfolgenabschätzung und Transformationsforschung.

Dieses Dokument ist so aufgebaut, dass im ersten Kapitel die Technologien der Energiebereitstellung, im zweiten Kapitel die Technologien für Energietransport, -verteilung und -speicherung, im dritten Kapitel der Energieumwandlung und im vierten Kapitel der Energienutzung vorgestellt werden. Im fünften Kapitel werden die Themen der Begleit- und Transformationsforschung behandelt.

Viele Begriffe in der Energietechnik sind nicht eindeutig. In diesem Dokument wird unter Energiebereitstellung die direkte Bereitstellung von Energie (Strom, Wärme, Kraftstoffe) mittels erneuerbarer Energien verstanden, die im Volkswirtschaftsdeutsch auch Energieerzeugung genannt wird. Unter Energienutzung ist die Nutzung der Endenergie durch den Verbraucher und damit die Umwandlung zur Energiedienstleistung gemeint, oft auch Energieverbrauch genannt.

Die einzelnen Kapitel sind so aufgebaut, dass zuerst in einer Übersicht die wichtigsten Zielsetzungen und Forschungsthemen der jeweiligen Technologie zusammengefasst sind. Danach folgen eine einleitende Beschreibung der Technologie und eine generelle Beschreibung des Forschungsbedarfs. Im zweiten Teil jedes Kapitels werden konkrete Forschungsthemen aufgelistet, meist mit einer kurzen Erläuterung der Herausforderung, der Forschungsaufgaben und der Zielsetzung.

In jeder einzelnen Technologie sind die wichtigsten Forschungsthemen aufgelistet, wobei die Aufzählungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Sie geben jedoch einen guten Überblick über die anstehenden Forschungs- und Entwicklungsaufgaben. Die einzelnen Technologien sind untereinander nicht gewichtet. Eine Priorisierung einzelner Technologien bezüglich der Forschungsnotwendigkeiten ist derzeit nicht möglich und kann auch aus dem Umfang der Beschreibung der einzelnen Technologien nicht abgeleitet werden. Vielmehr wird aus der Zusammenstellung deutlich, dass in allen Bereichen wichtige und vielversprechende Forschungsaufgaben vorhanden sind. Im Sinne der Risikominimierung ist die parallele Entwicklung aller erneuerbaren und Effizienztechnologien sehr zu empfehlen.

Dieser Bericht wurde vom FVEE-Fachausschuss zum 6. Energieforschungsprogramm erarbeitet, dem alle Mitgliedsinstitute angehören und vom Direktorium des FVEE verabschiedet. In die einzelnen Kapitel sind jeweils das Know-how und die Positionen der Forscher und Experten aus den Instituten eingeflossen, die in den jeweiligen Themenfeldern aktiv sind. Der Bericht spiegelt in diesem Sinne die Meinung aller FVEE-Mitgliedsinstitute wider.



2 Energiebereitstellung

2.1 Photovoltaik

2.1.1 Einführung Photovoltaik

Die direkte Umwandlung von Solarstrahlung in elektrische Energie mittels Photovoltaik ist aufgrund der unerschöpflichen und weltweit in ausreichendem Maße verfügbaren Solarstrahlung ein wichtiges Standbein aller nachhaltigen Szenarien einer zukünftigen Energieversorgung und spielt daher auch in der deutschen Politik, Forschungs- und Industrielandschaft eine wichtige Rolle. Eine solide und kontinuierliche Markteinführungspolitik insbesondere durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG hat dazu geführt, dass sich diese Technologie in den letzten Jahren zu einem Jobmotor von mittlerweile über 60.000 Beschäftigten in Forschung, herstellender Industrie, Großhandel und installierendem Gewerbe entwickelt hat (Stand 2009). Der deutsche Photovoltaikmarkt ist von einer hohen Dynamik geprägt und von 15 MWp im Jahr 1999 auf 3.800 MWp im Jahr 2009 gewachsen. Die gesamte installierte PV-Leistung lag Ende 2009 bei 9.800 MWp in Deutschland und weltweit bei 23.000 MWp.

In Deutschland überstieg der Anteil des Solarstroms an der Stromerzeugung im Jahr 2009 mit 1,1 % erstmals die Prozentmarke. Der Nationale Aktionsplan, den die Bundesregierung im Juni 2010 bei der Europäischen Union eingereicht hat, sieht bis 2020 die Erhöhung der installierten Leistung auf 52 GWp vor, was zu einem Solarstromanteil von etwa 10 % führt. Die erfreulichen Markterfolge der Photovoltaik führen in bestimmten Regionen Deutschlands, insbesondere in Bayern, dem Flächenland mit der weltweit größten PV-Installationsdichte, langsam dazu, dass ein weiterer Ausbau gezielte Maßnahmen zur Integration der fluktuierenden Stromerzeugung ins Stromnetz erfordert. Große Anteile Solarstrom lassen sich jedoch problemlos ins Stromnetz integrieren, indem die Photovoltaikanlagen künftig Netzdienstleistungen zur Netzstabilisierung beisteuern, durch eine Kombination der fluktuierenden Photovoltaik mit anderen Stromquellen, intelligentes Lastmanagement, überregionalen Ausgleich von überschüssigen Strommengen und

die Einbindung von Stromspeichern, unter anderem auch im Rahmen von E-Mobility-Konzepten.

Voraussetzung für eine noch stärkere Verbreitung der Photovoltaik ist eine weitere Kostenreduktion. Diese wird durch kontinuierliche Wirkungsgradsteigerungen bei gleichzeitig reduziertem Materialeinsatz sowie verbesserter Produktionstechnologie und daraus resultierenden Skaleneffekten realisieren. Bei der Kostenreduktion leisten sich die verschiedenen Photovoltaik-Technologien kristallines Silizium, Dünnschicht und Konzentrador-Photovoltaik derzeit ein enges Kopfan-Kopf-Rennen. Die kristallinen Silizium-Module konnten in den vergangenen 30 Jahren einen Lernfaktor von 20 % nachweisen, d. h., bei jeder Verdopplung der insgesamt hergestellten Module konnte eine mittlere Preisreduktion von 20 % beobachtet werden. Ein ähnliches Verhalten wird von den anderen PV-Technologien erwartet. Künftig wird zusätzlich eine Steigerung der Technologievielfalt erwartet, da in neuen Anwendungsfeldern, wie zum Beispiel der Gebäudeintegration, andere Kriterien wie Ästhetik oder mechanische Flexibilität im Vordergrund stehen.

Aufgrund der langjährigen kontinuierlichen Forschungspolitik kombiniert mit der konsequenten Markteinführungspolitik gehört die deutsche Photovoltaikindustrie heute zur technologischen Spitzengruppe weltweit. Etwa 200 Hersteller von Solarstromkomponenten und Produktionsanlagen erzielten im Jahr 2009 einen Umsatz von etwa 11 Mrd. Euro mit einem Exporterlös von 5,6 Mrd. Euro bei einem inländischen Wertschöpfungsanteil von 65 %. Diese internationale technologische Spitzenstellung von Industrie und Forschungsinstituten gilt es angesichts einer rasch zunehmenden weltweiten Konkurrenz in Produktion und Forschung zu erhalten. Grundlage hierfür ist eine Intensivierung von Forschung und Entwicklung.

Übersicht Forschungsbedarf

2.1.2 Forschungsbedarf kristalline Silizium-Photovoltaik

Zielsetzungen

- Erhöhung des Wirkungsgrads von industriellen Solarzellen/Modulen aus kristallinem Silizium auf 20/18 % im Standard- und 24/22 % im Spitzentechnologiebereich
- Bereitstellung von Verfahren und Materialien im Bereich Produktionstechnologien zur kostengünstigen Umsetzung dieser Architekturen mit Gesamtmodulherstellkosten unter 0,7 €/Wp bis zum Jahr 2020
- Bereitstellung von integrierten Analysemethoden und Simulationsmodellen der Solarzellen und Module sowie aller involvierten Verfahren und Materialien

Forschungsthemen

- Neue Solarzellen- und Modul-Konzepte mit verbesserten Energiekonversionseigenschaften
- Neue hochproduktive und -präzise Produktionsverfahren und damit verbundene Anlagenkonzepte
- Neue Materialien und Materialherstellungsverfahren

Die Herstellung von photovoltaischen Modulen auf der Basis von kristallinem Silizium ist mit einem Marktanteil von derzeit immer noch deutlich über 80 % die dominierende Photovoltaik-Technologie. Diese birgt aufgrund ihrer grundlegenden Eigenschaften weiterhin enorme Kostenreduktionspotenziale:

- Flachmodule mit sehr hohem Wirkungsgrad ermöglichen aufgrund der einfachen Systemintegration mit Festaufständerung oder Nachführung einen sehr hohen Flächennutzungsgrad; kristallines Silizium hat neben den III-V-Halbleiter-Strukturen aufgrund seines günstigen Bandabstandes und der guten Möglichkeiten zur Aufreinigung das höchste Effizienzpotenzial der Halbleitermaterialien.
- Alle wesentlichen in den Prozess eingehende Materialien, insbesondere reiner Quarzsand zur Silizium- und Glasherstellung, Silber, Aluminium und Kupfer als stromführende Elemente und einfache Kohlenwasserstoffverbindungen für die Verkapselungsmaterialien sind ungiftig und hinreichend verfügbar, Preissteigerungen aufgrund Materialverknappung sind sehr unwahrscheinlich.
- Die verbreitete Einführung von neuen Konzepten wie beispielsweise den Rückseitenkontakt-Zelltechnologien bietet erhebliche Wirkungsgradsteigerungs- und Kosteneinsparungspotenziale.

- Die Nähe der kristallinen Siliziumphotovoltaik zu innovationsstarken verwandten Technologiebereichen (beispielsweise Mikroelektronik, Flachbildschirme) erleichtert eine kostengünstige Übernahme von innovativen technischen Lösungen, die ausgezeichnete technologische Positionierung der überwiegend deutschen Produktionsanlagenhersteller sichert dabei einen schnellen Technologietransfer.
- Die ausgezeichnete Forschungs- und Entwicklungslandschaft in Deutschland ist eine hervorragende Basis zur Realisierung von technologischen Kostensenkungspotenzialen, dies belegen diverse Rekordwirkungsgrade, beispielsweise 20,5 % auf multikristallinem Silizium, und eine Vielzahl erfolgreicher Technologietransfers, beispielsweise von Oberflächenbeschichtungsprozessen, Laserbearbeitungsprozessen zur Hochdotierung und elektrischen Isolation.

2.1.2.1 Grundlagenforschung

Solarzellenkonzepte

Der Wirkungsgrad von herkömmlichen Siliziumsolarzellen ist nach gängiger Einschätzung auf einen Wirkungsgrad von 29–30 % beziehungsweise 25–26 % bei Standardtestbedingungen beschränkt. Durch den Einsatz innovativer Konzepte soll diese Wirkungsgradgrenze nach oben verschoben werden.



Hierzu sollen vor allem die Möglichkeiten zur Herstellung potenziell kostengünstiger Strukturen für Mehrfachsolarzellen und Photonenkonversion erforscht werden. Im Bereich der Mehrfachsolarzellen erfordert dies die Evaluierung von kostengünstigen, stark absorbierenden Halbleitermaterialien, deren Bandlücke entweder deutlich über oder unterhalb Silizium liegt, sowie geeigneter Tunnelübergänge für Stapelsolarzellen oder spektrale Aufspaltung bei räumlicher Trennung. Hierzu sind die Möglichkeiten zur Analytik und numerischen Simulation der elektrischen und optischen Eigenschaften solcher Solarzellen und Solarmodulen weiterzuentwickeln.

Als Ziel der Arbeiten soll bis 2020 eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrad auf theoretisch 35 % und praktisch 30 % demonstriert werden.

Prozess- und Produktionstechnologie

Aufgrund der sehr schnellen, meist empirischen Entwicklung von neuen Prozesstechnologien sind viele der Prozesse noch teilweise oder vollständig unverstanden. Dies verhindert die sinnvolle Abschätzung von Verbesserungspotenzialen und grundsätzlichen physikalischen Begrenzungen, was die Gefahr von Fehlinvestitionen in sich birgt.

Aufgrund der schnellen Entwicklung im Bereich der analytischen Verfahren und der gestiegenen Rechenleistung können beispielsweise Strömungen in Reaktoren, die Fluid-Dynamik von Druckprozessen, die Laser-Materie-Wechselwirkung oder Beschichtungsprozesse zunehmend simultan beschrieben werden. Hierdurch soll nicht nur das grundlegende Verständnis der Physik der Bearbeitungsprozesse verbessert sondern vor allem die Möglichkeit zur apriori-Abschätzung beziehungsweise der Ersatz von Experimenten ermöglicht werden.

Als Ziel soll bis 2020 durch die Entwicklung von analytischen Verfahren und Simulationsmodellen eine prognosefähige Beschreibung aller wesentlichen Prozesse entlang der Produktionskette vorliegen.

Materialentwicklung

Solarzellen und Module haben einen Materialkostenanteil von über 75 %, der ein substanzielles Einsparungspotenzial bietet. Insbesondere bei der Herstellung der Wafer aus reinem Silizium können erhebliche Einsparungen erzielt werden. Erforderlich sind hierzu unter anderem grundlegende

Materialforschungsaktivitäten, deren Ziel es ist, z. B. durch fortschrittliche Methoden des „Defect Management“ neue kostengünstigere Materialien zu entwickeln. Darüber hinaus sollen neue Verbrauchsmaterialien mit verbesserten Eigenschaften entwickelt werden, die beispielsweise deutlich bessere Kontakt- oder Oberflächenpassivierungseigenschaften aufweisen.

Das Ziel der Entwicklung muss das Aufzeigen von Potenzialen zur Reduktion der Materialkosten auf maximal die Hälfte des jetzigen Standes sein, wobei gleichzeitig die komplexeren Strukturen der angestrebten Zellarchitekturen zu berücksichtigen ist.

2.1.2.2 Vorlaufforschung

Solarzellen- und Modulkonzepte

Es sollen die wesentlichen Voraussetzungen geschaffen werden, um Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von über 20 % und Module mit über 18 % trotz weiter abnehmender Zelldicke standardmäßig kostengünstig herzustellen. Bislang sind nur die Firmen Sunpower und Sanyo in der Lage, Solarzellen und Module mit solchen Wirkungsgraden industriell zu produzieren.

Rückseitenkontaktsolarzellen weisen eine geringere Verschattung auf, vermeiden Widerstandsverluste bei der Verschaltung und ermöglichen den Transfer der Hochstrom tragenden Leiter in den Bereich der Verschaltung, z. B. durch den kostengünstigen Einsatz von strukturierten Kupfer- oder Aluminiumfolien. Es ist weiterhin zu untersuchen, ob die Trennung der Ladungsträger besser auf der Vorder- oder der Rückseite der Solarzelle erfolgt. Das höchste Wirkungsgradpotenzial wird einer Kombination von Rückkontaktzellen mit Heterostrukturen für die Ladungsträgertrennung zugesprochen. Ergänzend sollten neue Modul- und Zellkonzepte, die beispielsweise Technologien aus dem Wafer- und dem Dünnschichtbereich nutzen, evaluiert werden. Eine wesentliche Aufgabe besteht auch in der Weiterentwicklung von Analysemethoden und Simulationsmodellen.

Das Ziel ist die Erhöhung des Wirkungsgrads von industriellen Solarzellen beziehungsweise Modulen auf 24 % beziehungsweise 22 % im Spitzentechnologiebereich.

Prozess- und Produktionstechnologie

Voraussetzung für die kostengünstige Produktion dünner Hocheffizienzszellen ist die Entwicklung von neuartigen hochdurchsatzfähigen Herstellprozessen vorzugsweise mit Fließfertigungsverfahren. Hierbei kommt der Erforschung von neuartigen Beschichtungsverfahren zur Oberflächenpassivierung, neuen nass- oder plasma-chemischen Reinigungs- und Ätzverfahren sowie Laser- oder druckbasierten Verfahren zur Strukturierung und Metallisierung eine herausragende Bedeutung zu. Die Herstellung kostengünstiger hoch leitender Bereiche erfordert die Entwicklung von neuen Abscheideprozessen für Aluminium und Kupfer oder Aufbringungs- und Verbindungsmethoden mit entsprechenden Folien. Neben den kostengünstigen Fertigungs- und Bearbeitungsprozessen müssen auch sehr schnelle und hochgenaue Justierungsprozesse in Verbindung mit schneller Bilderkennung bereitgestellt werden, die produktionstaugliche Durchsätze ermöglichen. Ein schneller Entwicklungsfortschritt kann unter anderem durch die Evaluation von Prozesstechnologie aus benachbarten Fachgebieten wie z. B. der Mikro- und Optoelektronik für die Silizium-Photovoltaik erreicht werden.

Das Gesamtziel ist die Bereitstellung von hochproduktiven Verfahren im Pilotmaßstab zur kostengünstigen Umsetzung dieser Architekturen mit Siliziumscheiben von deutlich unter 150 μm .

Materialentwicklung

Aufgrund der gut untersuchten Defektstruktur von Bordotierten und nach den vorherrschenden Verfahren hergestellten sauerstoff- oder versetzungsreichen Siliziummaterialien sind nach heutiger Einschätzung Wirkungsgrade deutlich über 20 % nur schwer zu erreichen. Deshalb soll die Vermeidung der Sauerstoffkontamination und die Dotierung von Silizium mit alternativen Dotierstoffen vorrangig erforscht werden.

Für die Vermeidung der hohen Sauerstoffkontamination stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, bei denen aber noch substanzielle Herausforderungen bestehen: das Schmelzzonen-Verfahren mit der Aufgabe der Hochskalierung, das magnetische Halten der Schmelze mit der Reduktion des Energieverbrauchs und das kontrollierte Erstarren aus der Schmelze mit vertikalen Temperaturgradienten, das normalerweise für multikristallines Silizium eingesetzt wird, hier müssen die Verset-

zungsdichten reduziert werden. Als alternative Dotierstoffe kommen insbesondere Phosphor und Gallium in Frage, wobei die Entwicklung insbesondere in die Richtung einer Vermeidung der negativen Auswirkungen der ungünstigeren Segregationseigenschaften gehen muss. Ein eigenständiges Forschungsziel in diesem Bereich ist die Reduktion der Materialkosten durch die Verminderung der Solarzellendicke bis hin zu ultradünnen kristallinen Silizium-Wafern beziehungsweise der schnellen Abscheidung von aktiven Si-Schichten auf Substraten mit Schichtdicken im Bereich 10–80 μm und die Entwicklung geeigneter Prozesstechniken.

Die Zielsetzung bis 2020 ist die Entwicklung von Materialien, die mindestens die Halbierung der Materialkosten bei Erhalt der Modullebensdauer bei mindestens 25 Jahre ermöglichen.

2.1.2.3 Angewandte Forschung

Solarzellen- und Modulkonzepte

Die Herstellung von tendenziell dünneren Hocheffizienz solarzellen und Modulen erfordert die Entwicklung von geeigneten Prozessfolgen für die entsprechenden Strukturen, z. B. für rückseitig kontaktierte Solarzellen mit passivierten Oberflächen und lokal definierten Kontakten im Pilot- und Produktionsmaßstab. Geräte müssen entwickelt werden, die eine Charakterisierung solcher Solarzellentypen mit sehr hoher Genauigkeit ermöglichen. In Verbindung mit einer zu entwickelnden durchgängig verfolgbar wafer-spezifischen Kodierung ist hiermit eine verbesserte Qualitätskontrolle in der Solarzellen- und Modul-Produktion zu erreichen, die zu einer adaptiven Prozessierung weitergeführt werden kann.

Als Ziel sollte die Verteilungsbreite der Wirkungsgrade halbiert und im Pilot- und Produktionsmaßstab mittlere Wirkungsgrade von 20 % auf Solarzellenebene und 18 % auf Modulebene erreicht werden.

Prozess- und Produktionstechnologie

Die kostengünstige Herstellung von Hocheffizienz solarzellen erfordert hochdurchsatzfähige und präzise Fertigungsanlagen. Der Entwicklung von solchen Anlagen für die Prozessierung und Analytik kommt eine besondere Bedeutung zu, was allerdings eine umfangreiche Verifizierung der Pilotproduktionsumgebung erfordert. Zur



Reduktion der Prozesskosten durch Materialverlust sollten weiterhin alternative Trennverfahren für die Herstellung von Siliziumscheiben mit dem Ziel den Sägeverlusts auf 80 µm pro Scheibe und 120 µm pro Wafer bei hohen Ausbeuten entwickelt werden.

Das Gesamtziel ist die Bereitstellung von Produktionstechnologien im Pilotmaßstab, d. h. Verfahren zur kostengünstigen Umsetzung dieser Architek-

turen, die zu Gesamtmodulherstellungskosten von unter 0,7 €/Wp bis zum Jahr 2020 führen.

Materialentwicklung

Neben den Herausforderungen im Bereich der Siliziummaterialien kommt auch der Entwicklung neuer Materialien für die Bearbeitungsprozesse wie beispielsweise Pasten, Ätzmedien, Prozess- und Reinigungsgase eine große Bedeutung bei der Kostenreduktion zu.

2.1.3 Forschungsbedarf Photovoltaik-Dünnschicht

Zielsetzungen

- Kurzfristige Wirkungsgraderhöhung von industriell produzierten CIS-Solarmodulen auf 16 % und siliziumbasierte Dünnschichtmodule auf 12% durch Weiterentwicklung und industrielle Umsetzung von Laborresultaten und Senkung der Produktionskosten auf 0,5 €/Wp
- Realisierung neuer Konzepte für Wirkungsgrade über 20 % und Entwicklung der entsprechenden Halbleiter- und Kontaktmaterialien
- Effiziente und stabile Solarmodule auf flexiblen Substraten durch Rolle-zu-Rolle-Produktion
- Solarzellen Prototypen unter Verwendung neuer nanostrukturierter Absorbermaterialien mit unbegrenzter Verfügbarkeit

Forschungsthemen

- Erforschung und Entwicklung von maßgeschneiderten Halbleiterschichten, Materialien und Prozessen für kostengünstige großflächige Dünnschicht-Solarmodule
- Erforschung und Entwicklung von Produktionstechniken für die hochproduktive Dünnschichtabscheidung
- Erforschung der Halbleiter- und Kontaktmaterialien für neuartige, hocheffiziente Dünnschichtstrukturen
- Entwicklung der Produktionstechnik für neuartige, multifunktionale, starre und flexible Solarmodule

Übersicht Forschungsbedarf

Module der verschiedenen Dünnschichttechnologien (CdTe, aSi, CIS) werden sowohl in Deutschland als auch weltweit kommerziell produziert, wobei Deutschland sowohl als Forschungs- als auch als Produktionsstandort eine bedeutende Position einnimmt. Der Anteil der Dünnschichttechnologien an den Produktionskapazitäten aller Solarmodulen weltweit stieg im Jahr 2009 auf über 20% an und soll bis 2014 auf 25% anwachsen [EPIA 2010]. Durch den hohen Automatisierungsgrad der Dünnschichtfertigung können auch Produktionsstandorte in Deutschland wirtschaftlich sein.

Die Produktionstechnologien befinden sich jedoch im Vergleich zur kristallinen Silizium-Technologie noch in einem frühen Entwicklungs-

stadium. Um die prognostizierten Kostenvorteile aufgrund geringer Schichtdicken und damit geringem Materialverbrauch und kürzerer Energierücklaufzeit vollständig auszuschöpfen, sind dringend Forschung und Entwicklung zum Grundlagenverständnis bis hin zur Optimierung der Fertigungstechnologien notwendig.

Aufgrund des starken Preisverfalls in den letzten Jahren müssen die prognostizierten Kostenvorteile nun sehr viel kurzfristiger realisiert werden. Insbesondere muss das im Labormaßstab nachgewiesene Wirkungsgradpotenzial schnell in industrielle Prozesse umgesetzt werden. Mittelfristig gilt es, Konzepte für Solarzellen und Prototypen zu entwickeln, die die nächste Generation an Solarmodulen ermöglichen. Produktionskosten müssen

dazu in den Bereich von 0,5 €/Wp gesenkt werden. Neben kostengünstigen Technologien mit hoher Effizienz für den Powermarkt muss zunehmend eine Spezialisierung erfolgen, die flexible und/oder semitransparente Module beispielsweise für die gebäudeintegrierte Photovoltaik bereitstellt.

Mit dem Hintergrund des weiter wachsenden Produktionsvolumens müssen Fragestellungen der Umweltbilanz (komplette Life-cycle-Analysen) und die Verfügbarkeit von Materialien untersucht und für kritische Punkte technische Lösungen gefunden werden. Dies impliziert die Erforschung neuer Materialien und neuer Konzepte für gänzlich neue Zelltechnologien als auch für Komponenten bestehender Technologien.

2.1.3.1 Grundlagenforschung

Material- und Prozessverständnis

Notwendig sind die Verbesserung des Materialverständnisses, die Identifikation und Kontrolle von Defekten und Degradationsmechanismen, die Entwicklung von quantitativen Wachstumsmodellen für alle Materialien und Prozesse, die Analyse und Verständnis von Kontakten und Grenzflächen unter Einbeziehung von Forschungsinfrastrukturen wie beispielsweise Synchrotronstrahlungsquellen. Darauf aufbauend sind Methoden zur Prozessoptimierung und Prozesskontrolle zu entwickeln.

Neue Materialien und Konzepte

- Ersatz von Materialien mit begrenzter Verfügbarkeit
- Entwicklung von Materialien mit maßgeschneiderten elektrischen und optischen Eigenschaften wie z. B. Indiumfreie Chalkopyrite mit großem Bandabstand, hoch p-leitende transparente Oxide oder Siliziumbasierte Nanostrukturen
- Entwicklung innovativer Ansätze, die eine verbesserte Effizienz von Zellen und Modulen jenseits von 20 % und eine starke Kostenreduktion durch vereinfachte Herstellungsverfahren wie z. B. Druck- und Sprühprozesse ermöglichen

Zielsetzung ist die Herstellung von Prototypen innerhalb von 5 Jahren.

2.1.3.2 Vorlauftforschung

Langfristige Wirkungsgradverbesserung

- Steigerung des Wirkungsgrades im Labormaßstab z. B. durch neue optische Konzepte, verbesserte Absorbermaterialien oder Kontaktschichten als Grundlage für die weitere Steigerung des Modulwirkungsgrades in der industriellen Produktion

Forschungsfeld Prozesstechnologie

- Beschleunigtes Absorberwachstum durch Verdoppelung des Durchsatzes bei kritischen Prozessschritten
- In-situ-Methoden zur Prozesskontrolle
- Vergrößerung der Modulflächen auf 3 x 6 m² und damit verbundene Prozessanpassungen
- Vereinfachung der Prozesstechnologie
- Reduktion des Material- und Energieaufwands

Flexible Substrate

- Einsatz neuer flexibler Substrate
- Entwicklung neuer Produktionstechnologien wie z. B. Rolle-zu-Rolle-Verfahren und Drucktechniken, zunächst für einzelne Komponenten, dann für den gesamten Schichtstapel

Zielsetzung ist die Realisierung der Rolle-zu-Rolle-Produktion innerhalb von 5 Jahren mit Wirkungsgraden von 15 % (CIS) und 12 % (Si-Dünnschicht).

2.1.3.3 Angewandte Forschung

Wirkungsgradverbesserung

- Kurzfristige Umsetzung der im Labor erreichten Wirkungsgrade in die Massenproduktion (CIS 16 %, CdTe 14 %, a-Si/ c-Si 12 % bis 2014)
- Entwicklung von Solarzellen und Prototypen für die nächste Solarmodulgeneration (Verbindungshalbleiter > 20 %, Si-Dünnschicht > 16 % bis 2020)

Produktionstechnologien

- Entwicklung von Anlagen und Ausrüstung für zuverlässige und kosteneffiziente industrielle Produktion mit hohem Durchsatz und hoher Ausbeute
- Erhöhung des industriellen Wirkungsgrades, der Anlagenverfügbarkeit und des Durchsatzes



- Reduktion der Materialkosten durch Erhöhung der Ausbeute und Reduzierung des Verunreinigungsgehalts, der Filmdicke und des Energieaufwands
- Kostengünstige Gewinnung der Ausgangsstoffe
- Entwicklung von umweltfreundlichen Prozessen zur Anlagenreinigung
- Entwicklung und Umsetzung neuer Produktionstechnologien wie z. B. Rolle-zu-Rolle-Verfahren und Drucktechniken

Modultechnologie

- Erhöhung der Produktlebensdauer durch besseres Verständnis von Degradationsmechanismen und angepasste beschleunigte Alterungstests
- Reduktion der Kosten für die Verkapselung sowohl für steife als auch für flexible Module
- Neue Lasertechnologien und innovative Ansätze zur Serienschaltung von Dünnschichtmodulen

- Entwicklung neuer Produkte
- Verlängerte Lebensdauern unter allen klimatischen Bedingungen

Modulanalytik und Qualitätssicherung

- Beschleunigte Alterungstests
- schnelle Methoden zur Qualitätssicherung und Charakterisierung
- Ertragsvorhersagen für verschiedene Anwendungsbereiche und Klimazonen

2.1.3.4 Sonstige Forschungsaufgaben

Über die direkten Technologiethemata hinaus ist Forschung im Bereich Recycling der photovoltaischen Materialien und Elemente, Life-cycle-Analysen, Umweltaspekte bei Produktion und Entsorgung und intelligente PV-Systemintegration (Gebäudeintegration, Netzeinbindung) erforderlich.

2.1.4 Forschungsbedarf Organische Photovoltaik (OPV)

Zielsetzungen

- Steigerung des Wirkungsgrads von OPV-Solarzellen auf 10 % und von OPV-Modulen auf 6–8 % bis 2015
- Steigerung der Lebensdauer auf 10.000 Stunden
- Entwicklung der Rolle-zu-Rolle-Produktionstechnik für organische Solarmodule sowohl für polymere als auch für molekulare und vakuumprozessierbare Systeme
- Entwicklung von Barrierefolien mit niedrigen Permeabilitäten und hoher Stabilität der Barriermaterialien zur Verkapselung organischer Solarmodule
- Qualitätskontrolle mittels IR-optischen Bildgebungsverfahren
- Entwicklung von gedruckten, transparenten Elektroden mit hoher Leitfähigkeit

Forschungsthemen

- Entwicklung von maßgeschneiderten organischen p- und n-Materialien mit geeigneten optoelektronischen Eigenschaften
- Erhöhung der intrinsischen Lebensdauer von organischen Absorbermaterialien
- Kontrolle über die Morphologie der Absorberschicht im Nanometer- bzw. Subnanometerbereich
- Technologieentwicklung für lösungsmittelprozessierbare organische Tandem-Solarzellen
- Entwicklung von gedruckten Elektroden und Elektrodenzweischichten mit optimierter Leitfähigkeit, Transparenz und Stabilität
- Entwicklung industrieprozessrelevanter Technologien: Rolle-zu-Rolle-Beschichtung, Moduldesign und Verkapselung

Übersicht Forschungsbedarf

Mit der stetig steigenden Nachfrage nach Photovoltaik werden zunehmend produktivere Herstellungsprozesse interessant. Dabei stellt der Einsatz organischer Halbleiter in der Photovoltaik einen viel versprechenden Ansatz dar. Die neuartigen Funktionsmaterialien vereinen wesentliche Eigen-

schaften konventioneller Halbleiter mit attraktiven Eigenschaften wie mechanische Flexibilität und Transparenz. Organische Halbleiter, wie z. B. konjugierte Polymere und Moleküle, lassen sich mit Hilfe einfacher Druck- und Filmziehverfahren oder durch Vakuumsublimation zu großflächigen,

hauchdünnen Schichten von etwa 100 nm auf flexiblen Trägerfolien verarbeiten. Für die Erzeugung von Elektrizität nutzen organische Solarzellen einen Prozess, der ähnlich wie in der Photosynthese die Strahlungsenergie des Sonnenlichts in chemische Energie umwandelt. Dieser Mechanismus kann durch eine geeignete Kombination stark absorbierender Chromophore wie z. B. halbleitende organische Moleküle oder Polymere und starker Elektronenakzeptoren wie z. B. Fullerene zur photovoltaischen Erzeugung von Ladungsträgern genutzt werden.

Neue Technologien wie die organische Photovoltaik bieten neue Möglichkeiten durch die Nutzung von hoch produktiven und leicht skalierbaren Druckprozessen für die Herstellung von Solarmodulen. Durch intensive Forschung haben sich die Effizienz und die Lebensdauer dieser Technologie mittlerweile so weit verbessert, dass auch erste organische Solarmodule auf dem Markt sind [Kon 2008]. Seit 2005 beträgt die absolute Steigerungsrate des Wirkungsgrades etwa 0,8 % pro Jahr, und in den nächsten Jahren wird erwartet, dass Effizienzen von über 10 % erreicht werden. Damit kommt die organische Photovoltaik in Effizienzbereiche der Dünnschichttechnologien der zweiten Generation. Durch die Verwendung von mehreren Absorberschichten in Tandemarchitekturen werden zukünftig auch Effizienzen deutlich über diesem Wert erreicht werden können. Wirkungsgrade von den Laborsolarzellen liegen derzeit bei 8,1% in polymer-basierten [Sol 2010] und bei 7,7% in kleinemolekülbasierten Solarzellen [Hel 2010].

Obwohl beeindruckende Fortschritte auf dem Weg zu stabilen organischen Solarzellen gemacht und eine Lebensdauer von über 5.000 Stunden erreicht wurde, ist die gegenwärtige Situation insgesamt noch unbefriedigend. Denn die erzielten Verbesserungen beruhen eher auf der Verpackung der Zellen und weniger auf der Verlängerung der intrinsischen Lebensdauer der photoaktiven Materialien [Kre 2006]. Der Nachteil der Verkapselung besteht in der Steigerung der Produktionskosten, insbesondere für gedruckte Solarzellen.

Durch die synthetische Herstellung der Halbleiter ist eine gezielte Beeinflussung der Absorptionseigenschaften (Farbe) sowie der Transparenz der

Solarzellen möglich. Organische Solarmodule sind außerdem leicht, flexibel und haben ein sehr gutes Schwachlichtverhalten. Dies eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten für die Photovoltaik, besonders im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik. Derzeitige Nischenanwendungen im Verbraucherelektronikbereich sind jedoch auch sehr wichtig und sind eine gute Chance für die Markteinführung und Technologieoptimierung von organischer Photovoltaik.

2.1.4.1 Forschungsthemen

Maßgeschneiderte organische p- und n-Materialien mit geeigneter Bandlücke

Die Kombination elektronischer Eigenschaften (Absorption, Beweglichkeit), der Prozessierbarkeit des Halbleiters und die Tauglichkeit für Massenproduktion stellt eine große Herausforderung dar. Daraus ergibt sich folgende Forschungsaufgabe.

- Synthese neuartiger Polymere und Oligomere mit breiter, rotverschobener Absorption, mit ausgeglichener Ladungsträgerbeweglichkeit von Elektronen und Löcher sowie mit ausreichender Umweltstabilität

Ziel ist die Massenproduktion von reinen, chemisch und photochemisch stabilen Materialien.

Erhöhung intrinsischer Lebensdauer von organischen Absorbermaterialien

Notwendig ist die detaillierte photochemische und photophysikalische Erklärung der Degradationsprozesse von organischen Halbleitern in organischen Solarzellen. Hierdurch ergeben sich folgende Forschungsaufgaben.

- Identifizierung verschiedener Degradationspfade
- Entwicklung neuer Materialien, Architekturen und Herstellungsprozesse für organische Solarzellen

Ziel ist die Verlängerung der intrinsischen Lebensdauer organischer Solarzellen unter Umweltbedingungen vor allem durch die Verbesserung der chemischen und strukturellen Stabilität der Materialien und Grenzflächen zwischen diesen Materialien.



Kontrolle über die Morphologie der Absorberschicht im Subnanometerbereich

Die Bestimmung der Struktur-Eigenschafts-Beziehung komplexer Donator-Akzeptor Gemische, die Vorhersage der Effizienz des Ladungstransferprozesses und die Modellierung und Simulation der Morphologie-Formierung sollen durch folgende Forschungsaufgaben bearbeitet werden.

- Röntgenbeugungsexperimente zur Feststellung molekularer Strukturen (Packung)
- Mikroskopische und makroskopische Simulation der Exzitonen beziehungsweise des Ladungstransports
- Entwicklung von optimierten Tinten für die organische PV

Zielsetzung ist die Vorhersage der Morphologie einer Bulk-Heterojunction basierend auf der Kenntnis der Struktur der Einzelmaterialien und die Erklärung des Zusammenhangs zwischen chemischer Struktur und Ladungsträgergeneration.

Technologieentwicklung für organische Tandem-Solarzellen

Ziel ist die optimale Abdeckung des Sonnenspektrums, die Wahl geeigneter Halbleiter, Elektroden und vor allem Elektrodenzweischichten, um eine massentaugliche Technologie im Bereich Tandem-Solarzellen zu entwickeln. Folgende Forschungsaufgaben ergeben sich.

- Entwicklung geeigneter Rekombinations-schichten
- Simulation und Modellierung von Bauelementen
- Entwicklung von tandemspezifischer Modulgeometrie und -herstellung (Verschaltung, Strukturierung)

Ziel ist die mittel- bis langfristige Entwicklung von gedruckten organischen Tandem-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 15 %.

Gedruckte Elektroden und Elektrodenzweischichten mit optimierter Leitfähigkeit, Transparenz und Stabilität

Die drucktechnische Herstellung von transparenten und reflektierenden Elektroden mit hoher Leitfähigkeit im Niedrigtemperaturprozess (< 150 °C) stellt eine große Herausforderung dar. Diese soll mittels folgender Forschungsaufgaben bearbeitet werden.

- Entwicklung von Indium-freien transparent leitfähigen Schichten (TCOs), von nanopartikelären TCOs mit geringen Sintertemperaturen und von metallbasierten und organischen Alternativen zu TCOs
- Aufklärung und Kontrolle der physikalischen Vorgänge an den Grenzflächen

Ziel ist die drucktechnische Herstellung von indiumfreien, transparenten Elektroden mit einer Leitfähigkeit von unter 10 Ohm/sq und einer mittleren Transparenz von über 85 % im sichtbaren Spektralbereich.

Industrielle relevante Prozesse: Rolle-zu-Rolle-Beschichtung, Moduldesign und Verkapselung

Die Technologieumsetzung in einen massentauglichen Prozess wie z. B. Rolle-zu-Rolle stellt eine große Herausforderung dar. Hierzu sind auch technologiespezifisch geeignete Modulgeometrien und Verkapselungen zu entwickeln.

Folgende Forschungsaufgaben ergeben sich.

- Transfer von Beschichtungen im Labormaßstab zu industrietauglichen Prozessen
- Entwicklung von optimierter Modulgeometrie und -herstellung (Verschaltung, Strukturierung) sowie geeigneter und günstiger Verkapselungsfolien

Zielsetzung ist die Entwicklung effizienter, langlebiger und kostengünstiger Module mittels industrietauglicher Herstellungsprozesse.

2.1.5 Forschungsbedarf Photovoltaik-Modultechnik

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Steigerung des Wirkungsgrades und des elektrischen Ertrags der Module
- Modultechnologieadaptation an hocheffiziente Zellkonzepte
- Senkung der Modulkosten um 30 % bis 2013
- Langfristige Zuverlässigkeit zur Gebäudeintegration in Dach und Fassade

Forschungsthemen

- Verbindung und Einkapselung von dünnen Solarzellen
- Erhöhung der optischen und elektrischen Effizienz von Modultechnologie
- Steigerung der Zuverlässigkeit und des Ertrags von Modulen

Die Modul-Technologie beeinflusst den Wirkungsgrad von Modulen in der Größenordnung von 10–15 % relativ und entscheidet maßgeblich über die Zuverlässigkeit und damit den Ertrag des Moduls während seiner Lebenszeit. Im Jahr 2009 lag der Anteil Wafer basierter Module auf Basis von kristallinem Silizium (c-Si) bei ca. 80 % des Weltmarktes, den Rest teilten sich verschiedene Dünnschicht-Technologien. Die Produktion von c-Si-Modulen umfasst die elektrische Verbindung von Solarzellen zu Strings, die Einkapselung mit Kontaktierung und Durchführung von elektrischen Anschlüssen sowie die Leistungsmessung. Bei Dünnschicht-Modulen wird die Zellverbindung bereits im Zuge der Zellabscheidung durchgeführt. Bei beiden Technologielinien ist noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Für die Modulproduktion werden schlüsselfertige, vollautomatisierte Linien angeboten, wobei deutsche Anlagenbauer eine hervorragende Position im internationalen Wettbewerbsfeld einnehmen. Es gab in den letzten 10 Jahren relativ wenig Innovationen, die ihren Weg in die Massenproduktion von c-Si-Modulen gefunden haben. Trotzdem erreichen c-Si-Modulhersteller heute auf neuen Produktionslinien Kosten von zwischen ca. 1,30 und 1,60 €/Wp in Europa und bis zu 0,90 €/Wp in Asien. Die Modulkosten werden zu 50–70 % von der Zelle als Materialkostenfaktor dominiert.

Die technologischen Optionen zur Anhebung der Modulwirkungsgrade und zur Modulkostensenkung sind vielfältig. Der Wirkungsgrad kann modulseitig über die optische und über die elektrische Effizienz angehoben werden, dazu zählen die Minderung von Reflexions-, Absorptions und Konversions- aber auch Serienwiderstandsverluste

in Zellmetallisierung und -verbindern. In der Summe sind Gewinne über 10 % relativ erreichbar. Die Modultechnologie muss die heute darstellbaren oder absehbaren Fortschritte der Zelltechnologie bei Effizienz und Kosten aktiv aufnehmen und in den Markt tragen. Dies betrifft erhöhte Zellströme von 9–10 A, Rückkontaktzellen, erhöhte UV-Empfindlichkeit, veränderte Metallisierungen und sehr dünne Wafer bis 100 µm, längerfristig bis 30–50 µm, mit dem Potenzial einer weiteren Konvergenz in Richtung Dünnschicht-Technologie [SEM 2010], [EPIA 2010].

Ein Hindernis für die Einführung neuer Technologien ist die marktübliche Leistungsgarantie von 20 bis 25 Jahren in Verbindung mit der noch begrenzten Aussagekraft von beschleunigten Alterungsprüfungen und Zuverlässigkeitsmodellen. Für die Abschätzung des kumulierten Modul-ertrags fehlen standardisierte Methoden, selbst bei der Ermittlung der Modulleistung bestimmter Dünnschicht-Technologien besteht noch methodischer Entwicklungsbedarf.

Gebäudeintegrierte Module stehen vor besonderen Herausforderungen hinsichtlich Formatierung, Multifunktionalität in der Gebäudehülle und Gewerkekompatibilität. Auf der anderen Seite besteht die Chance einer kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme mittels Hybridmodulen beziehungsweise Hybridkollektoren. Aufgrund begrenzter Freiflächen in Deutschland wird die Gebäudeintegration an Bedeutung gewinnen müssen [EUP 2009].



2.1.5.1 Grundlagenforschung

Modulkonzepte für Folien-Solarzellen

- Forschungsaufgaben bei der Herstellung von elektrischen Kontakten und von Materialverbänden als Grundlage zur Verarbeitung von Solarzellen mit 30–100 µm Dicke
- Evaluierung von langzeitstabilen Materialien für die zuverlässige Verkapselung von flexiblen Dünnschichtmodulen

Numerische Modellierung

- Entwicklung von mechanischen und optischen Modellen sowie Modellen zur Materialalterung

Im Erfolgsfall ist zu erwarten, dass die Entwicklung und Markteinführung neuer Modultechnologien spürbar erleichtert werden.

2.1.5.2 Vorlaufforschung

Integrale Modulfertigung

Notwendig ist Forschung und Entwicklung zur Verringerung der Prozessschritte in der Modulproduktion für waferbasierte als auch für Dünnschichtmodulen, dem Übergang von sequenziellen zu simultanen Prozessen und die Konzeption von automatisierungsfreundlichen Modulaufbauten.

2.1.5.3 Angewandte Forschung

Maximierung des Modulwirkungsgrades

Die Herausforderung ist die Reduzierung der Wirkungsgradverluste auf dem Weg von der Zelle zum Modul, die bei kristallinen PV-Modulen ca. 10 % und bei Hocheffizienz-Zellen noch mehr ausmachen. Zur Reduzierung ist die Charakterisierung und Optimierung der optischen Effizienz sowie der elektrischen Effizienz erforderlich und die Entwicklung von Konzepten zur Integration von Hocheffizienz-Zellen.

Im Erfolgsfall ist zu erwarten, dass bis 2013 die Moduleffizienz um 10–20 % erhöht werden kann. Bei Dünnschichtmodulen ist die Wirkungsgradifferenz zwischen Labor und Modulen in der Produktion sehr groß, beispielsweise weist CIS einen Laborwirkungsgrad von 20 % und nur etwa 12 % in der Produktion auf. Dieser Unterschied ist durch systematische Optimierung zu verringern. Reduktion der Material- und Prozesskosten
Der Materialanteil der Modulkosten liegt heute

bei über 80 % und die Taktzeiten in der Produktion liegen bei 30–60 Minuten pro Modul. Die Reduzierung beider Kennwerte soll durch die Substitution von Materialien, die hohe direkte und indirekte Kosten verursachen wie z. B. Folien und Rahmen sowie die Entwicklung von Konzepten zur Verarbeitung von Zellen bis 130 µm Dicke erreicht werden.

Im Erfolgsfall ist zu erwarten, dass die Modulkosten bis 2013 um 30 % gesenkt werden können.

Fassadenmodule

Bei kristallinen PV-Modulen sind Modulabmessungen durch die Zellengröße definiert und bei Dünnschichtmodulen durch eine begrenzte Auswahl von „Standardgrößen“. Für architektonisch ansprechende Fassadenanwendungen sind jedoch flexible Flächenabmessungen notwendig. Zur Lösung dieses Problems soll die Produktionstechnologie von opaken und teiltransparenten gebäudeintegrierten Photovoltaik (BIPV)-Bauteilen hin zu einer hohen Flexibilität der Formate weiter entwickelt sowie standardisierte elektrische und bauphysikalische Anschlussdetails und Schnittstellen neu entwickelt werden.

Ziel ist die Bereitstellung von BIPV-Modulen zur Erfüllung der Anforderungen für Nullenergiegebäude auf breiter Basis bis 2015.

Umweltsimulation und Gebrauchsdaueranalyse

Eine lange Lebensdauer der Module ist Voraussetzung für die Rentabilität der Photovoltaik. Es besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der Bestimmung von Alterungsparametern in Feld- und Laborversuchen, der Entwicklung und Bewertung neuer Prüfverfahren für Photovoltaikmodule zur Lebensdauervorhersage sowie der Qualifizierung neuer Materialien und Aufbauten. Die Ergebnisse werden genauere Prognosen der Lebensdauer und des langfristigen Energieertrags erlauben und Innovationen beschleunigen.

Photovoltaisch-thermische Module

Angesichts der begrenzten Dachflächen ist die Kombination von photovoltaischer Strom- und solarthermischer Wärmeerzeugung in einem Photovoltaisch-Thermischen Hybridkollektor (PVT) eine vielversprechende Option, die allerdings eine Gewerke übergreifende Entwicklung erfordert. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht in der Entwicklung von PVT-Komponenten sowie bei

deren Integration in die Gebäudehülle. Des Weiteren sind Modelle für PVT-Module zu entwickeln bauseits-Energiesimulationen zu integrieren.

Zielsetzung: Bereitstellung von PVT-Modulen für Nullenergiegebäude auf breiter Basis bis 2015.

2.1.5.4 Sonstige Forschungsaufgaben

PV CYCLE wurde als europäische Organisation für das Recycling von Photovoltaikmodulen im Juli 2007 von der Photovoltaikindustrie gegründet,

um ein freiwilliges Rücknahme- und Recycling-Programm für Altmodule einzurichten. Derzeit gehören 87 Hersteller der Initiative an.

Der Bereich Recycling ist in der Breite zu erforschen, was auch den Ersatz von Materialien mit höherer Umweltbelastung einschließt. So gibt es beispielsweise erst vereinzelte Hersteller, die bei der Produktion von c-Si-Modulen auf bleihaltige Lote verzichten.

2.1.6 Forschungsbedarf Photovoltaik-Konzentrator-technik

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Die Produktionskapazität wird die Gigawatt-Grenze in 2013 überschreiten
- Die Photovoltaik-Konzentrator-technologie erzielt bis 2015 einen zweistelligen Marktanteil bei Megawatt-Photovoltaik-Kraftwerken
- Höchsteffiziente Photovoltaik-Konzentratorsysteme erzielen in sonnenreichen Gegenden wie z. B. in Südeuropa oder Nordafrika Stromgestehungskosten unter 0,1 €/kWh im Jahr 2014
- Neuartige Photovoltaik-Konzentratorsysteme produzieren elektrische und thermische Energie

Forschungsthemen

- Entwicklung und Fertigung von hocheffizienten Konzentratorsolarzellen und Konzentratoroptiken
- Entwicklung von industrietauglichen Fertigungsprozessen
- Entwicklung von Test- und Charakterisierungsverfahren für Komponenten der Photovoltaik-Konzentratorsysteme
- Entwicklung von spezifischen Tests zur Zuverlässigkeit sowie Erstellung von Normen für die konzentrierende Photovoltaik-Technologie

Die konzentrierende Photovoltaik-Technologie (CPV) hat sich in den letzten Jahren mit großen Schritten weiterentwickelt. Dabei werden Funktionen getrennt, die in Standard-Solarzellen vereint sind. Das Einsammeln des Lichtes übernimmt bei CPV eine Optik (z. B. Linse oder Spiegel), welche das Sonnenlicht auf eine kleine Fläche fokussiert. Dort sitzt dann der Energiewandler, eine speziell entwickelte, kleinflächige Solarzelle, welche hohe Leistungsdichten verarbeiten kann. Dadurch wird vergleichsweise teures Halbleitermaterial eingespart, so dass niedrige Stromgestehungskosten erreicht werden. Um das Licht mittels der Optik zu bündeln, müssen Konzentratorsysteme dem Sonnenlauf nachgeführt werden.

CPV-Technik kommt vornehmlich in photovoltaischen Kraftwerken im Megawatt-Bereich in sonnenreichen Gegenden zum Einsatz und hat

deshalb ein ähnliches Einsatzgebiet wie solarthermische Kraftwerke, wobei die CPV-Kraftwerke modular aufgebaut und deshalb bezüglich der installierten Leistung flexibler sind. Um auch bei Durchzug eines Wolkenfeldes kontinuierlich Strom liefern zu können, muss die erzeugte Energie kurzzeitig gespeichert werden können. Von besonderem Forschungsinteresse für die CPV sind daher zukunftsweisende System- oder Netzlösungen wie z. B. die Integration in das DESERTEC-Konzept sowie die Kombination von thermischer und elektrischer Energieproduktion, da die thermische Energie leichter gespeichert werden kann. Von Interesse sind auch Konzepte zur Erzeugung von speicherbarem Wasserstoff mittels konzentrierten Sonnenlichts.

Technologisch gibt es mehrere CPV-Ansätze. Im Bereich der niedrig-konzentrierenden CPV-Systeme mit optischen Konzentrationsfaktoren

ren von 2–80 werden modifizierte Silizium- oder Dünnschichtsolarzellen eingesetzt. Systeme mit niedrigen Konzentrationsfaktoren erfordern lediglich Nachführgenauigkeiten im 1°–2°-Bereich. Häufig werden derartige Systeme sogar nur einachslich nachgeführt. Um die Stromgestehungskosten zu reduzieren, werden intelligente Systemlösungen und Fertigungstechnologien entwickelt. Im Bereich der hochkonzentrierenden CPV-Technik mit optischen Konzentrationsfaktoren von über 300 werden heute die höchsteffizienten Solarzellen eingesetzt, die sich technisch realisieren lassen. Mit Stapelsolarzellen wurden bereits Wirkungsgrade von über 40 % erzielt. Bei dieser Zelltechnologie hat Deutschland sowohl im Bereich der Forschung [ISE 2009], [Gut 2009] als auch bei der industriellen Fertigung [AZUR] eine internationale Spitzenstellung inne, die es zu erhalten gilt. Die Stapelsolarzellen werden z. B. in Konzentratormodulen und -systemen eingesetzt, in denen das Sonnenlicht mittels einer Fresnel-Linse gebündelt wird. Die im Labor erzielten Modulwirkungsgrade liegen bereits heute bei über 30 % und Konzentratoren zeigen im realen Betrieb bereits AC-Systemwirkungsgrade von 25 % [Gom 2009], [Contx]. Solch hohe Wirkungsgrade wurden bisher weltweit von nur wenigen Firmen realisiert, auch hier nimmt Deutschland derzeit eine Spitzenstellung ein [Kur 2010].

Derzeit steht die CPV-Technologie an der Schwelle zum Markteintritt. Bisher wurden weltweit einige Megawatt-Anlagen installiert und die kumulierte Produktionskapazität beträgt im Jahr 2010 ca. 300 MW [Kur 2010]. Somit sind noch wichtige Schritte zur vollen Industrialisierung zu gehen. Eine schnelle Steigerung der Produktionskapazitäten ist möglich, da die Investitionskosten für diese Technologie vergleichsweise gering sind und keine Ressourcenbegrenzung sichtbar ist. Ein schnelles Wachstum verspricht eine schnelle Kostenreduktion [TPV 2007], so dass die Zielkosten von kleiner 0,1 €/kWh in Gegenden mit viel direkter Sonneneinstrahlung schon im Jahr 2014 erreicht werden könnten. Damit ist die CPV-Technologie neben den solarthermischen Kraftwerken eine weitere Option, in südlichen Ländern mit Solarenergie Strom zu produzieren, der langfristig auch über ein europäisches Hochspannungsnetz nach Deutschland transportiert werden könnte.

2.1.6.1 Grundlagenforschung

Neue Materialien für die Konzentratortechnologie Materialforschung ist für die Weiterentwicklung der CPV-Technologie von essentieller Bedeutung. Einerseits werden neue Halbleitermaterialien mit spezifischen Eigenschaften benötigt um das Konzept der Stapelzellen von heute drei auf bis zu sechs Teilzellen zu erweitern. Andererseits spielt die Materialentwicklung auch bei der optischen Konzentration eine große Rolle. Die Anforderung an die UV-Stabilität der eingesetzten Materialien ist bei hohen Konzentrationsfaktoren über 1.000 deutlich erhöht. Grundlegende Fragen zur Langzeitstabilität von Materialien müssen bearbeitet werden.

Forschungsaufgaben sind:

- Erforschung neuer Verbindungshalbleitermaterialien auf II-VI und III-V-Basis, z. B. GaInNAs, GaIn-NAsSb; Einsatz von Nanostrukturen und Quantum-Dot-Schichten
- Materialien für optische Spiegel, Konzentratoren und Sekundär-Konzentratoren („secondaries“) für CPV-Anwendungen; ein Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung neuer UV-stabiler Materialien
- Untersuchungen von Langzeitstabilität der eingesetzten Halbleiter sowie der optischen Materialien; Entwicklung entsprechender Testprozeduren und Analysemethoden, welche die Anforderungen der CPV-Technologie berücksichtigen

2.1.6.2 Vorlaufforschung

Entwicklung höchsteffizienter Konzentratoren-solarzellen

Wichtige Aufgabe ist die Entwicklung von höchsteffizienten Solarzellen für CPV-Anwendungen, die kostengünstig produziert werden können. Mittels Mehrfachsolarzellen auf Basis der Verbindungshalbleiter können Zellwirkungsgrade von 45 % bis zum Jahr 2013 und bis zum Jahr 2020 auch über 50 % erzielt werden. Die Stromgestehungskosten lassen sich so um bis zu 20 % senken. Für niedrigkonzentrierende Systeme werden angepasste Silizium- oder Dünnschichtsolarzellen entwickelt.

Forschungsaufgaben sind:

- Entwicklung von III-V Mehrfachsolarzellen (3–6-fach) mit Wirkungsgraden zwischen 40 und 50 %

- Entwicklung von Konzentratorsolarzellen für Konzentrationsfaktoren über 3.000 sowie für inhomogene Ausleuchtung
- Entwicklung von Silizium- und Dünnschichtkonzentrator-Solarzellen für niedrige Konzentration kleiner 100
- Entwicklung von Charakterisierungstechnologien und Simulationstools für Stapelsolarzellen

Entwicklung von Konzentrationsoptiken

Die Konzentrationsoptiken sammeln und bündeln das Licht. Zentrale Aufgabe der Optikentwicklung ist es, die Verluste durch Reflexion und parasitäre Absorption zu reduzieren.

- Entwicklung von Freiformen, die eine homogenere Ausleuchtung der Konzentratorsolarzelle und größere Akzeptanzwinkel bei gleichzeitig hohen Konzentrationsfaktoren erlauben, durch eine verbesserte Optik kann die jährliche Systemausbeute um bis zu 10% erhöht werden
- Optimierung von Fresnel- und anderen optischen Konzentratoren
- Entwicklung neuer Formen von Sekundärkonzentratoren („secondaries“)

Entwicklung optimierter Konzentrationssysteme

Zentrales Entwicklungsziel für die konzentrierende PV ist die Realisierung hoher Systemwirkungsgrade. Die Komponenten des Systems müssen so optimiert werden, dass im Mittel Systemwirkungsgrade über 27% und Spitzenwirkungsgrade von 30% erzielt werden.

Forschungsaufgaben sind:

- Untersuchung und Modellierung der externen Einflussgrößen auf ein Konzentrationssystem wie Temperatur, Wind, solares Spektrum, Circum-Solarstrahlung, Nachführgenauigkeit
- Modellierung von solaren Erträgen für spezifische Konzentrationssysteme und Optimierung der Systeme
- Anpassung der System-Komponenten wie Nachführung, Wechselrichter, Verkapselung, Schutzanordnung an die speziellen Anforderungen der CPV-Technologie
- Entwicklung von Konzepten und Systemen zur Kombination von elektrischer und thermischer Energieerzeugung
- Entwicklung und Durchführung von Feld- und Zuverlässigkeitstest für neue CPV-Systeme

2.1.6.3 Angewandte Forschung

Produktionstechnologien für die CPV-Technologie

Ein schnelles Wachstum bei der Produktionskapazität führt allgemein zu Kostenreduktion durch Lerneffekte. Im Jahr 2010 beträgt die Produktionskapazität für hochkonzentrierende CPV-Systeme in Deutschland lediglich ca. 30 MWp, weltweit beträgt sie ca. 300 MWp. Eine Vervielfachung der Produktionskapazitäten ist daher die vorrangige Aufgabenstellung, um die Kosten für das installierte System auf 2 €/Wp zu senken.

Forschungsaufgaben sind:

- Anpassung und Optimierung der Produktionsverfahren zur Herstellung von Konzentrationssolarzellen und optischen Elementen für CPV-Systeme, um einen höheren Durchsatz und eine besserer Ausbeute bei geringeren Kosten zu erreichen
- Entwicklung von integrativen Fertigungsverfahren für Konzentrationmodule und Konzentrationssysteme
- Entwicklung kostengünstiger Nachführungssysteme mit ausreichender Nachführgenauigkeit
- Entwicklung von angepasster Prozesskontrolle und entsprechender Anlagentechnik

Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit

Bei einem schnellen Wachstum und bei der Einführung neuer CPV-Systeme muss sichergestellt sein, dass die Qualität und damit die Langlebigkeit der Produkte garantiert werden kann. Dazu müssen für die CPV-Technologie angepasste Verfahren entwickelt werden. Dies macht die Entwicklung von international anerkannten Normen und Standards für die CPV-Technologie sowie die Durchführung von Langzeit-Feldtests und den Aufbau von Demonstrationseinheiten im Megawatt-Bereich erforderlich.



2.2 Solarthermische Wärme- und Kälte-Erzeugung

Zielsetzungen

- Kostensenkung der solarthermisch erzeugten Wärme und Kälte
- Kontinuierliche Erhöhung des Solaranteils an der Wärmebedarfsdeckung von Gebäuden mittelfristig auf über 50 % und langfristig auf 100 % des Gesamtwärmebedarfs
- Optimierung der Integration der solarthermischen Kollektoren in Dächer und Fassaden
- Integration der Solarthermie in die energetische Modernisierungsmaßnahmen von Gebäuden
- Verbesserung der Flächennutzungseffizienz
- Erschließung neuer Anwendungsgebiete wie Prozesswärme, Kühlung und Nahwärme

Forschungsthemen

- Weiterentwicklung von Komponenten und Systemtechniklösungen für hohe solare Deckungsanteile
- Entwicklung von Wochen-, Monats- und saisonalen Wärmespeichern mit reduzierten Wärmeverlusten und höheren Speicherdichten für den Einsatz in einzelnen Gebäuden und in Nahwärmanlagen
- Weiterentwicklung von Solaraktivhäusern, die zu 50 % bis 100 % mit Solarwärme beheizt werden
- Entwicklung von multifunktionellen Fassaden mit solarthermischen Modulen zur kostengünstigen energetischen Sanierung der Gebäudebestands
- Maßnahmen zur Kostenreduzierung durch Effizienzsteigerung, kostengünstigere Materialien und Konstruktionen, systemtechnische Optimierung und effizientere Produktion

Übersicht

Forschungsbedarf

Der Anteil der Solarwärme an der Deckung des Gesamtwärmebedarfs soll nach der Deutschen Solarthermie-Technologieplattform DSTTP von heute 0,4 % auf über 3 % bis 2020 und bis zu 50 % zwischen 2030 und 2050 ansteigen [DSTTP 2009]. Dies erfordert eine starke Ausweitung der Markteinführungsmaßnahmen und eine deutliche Intensivierung von Forschung und Entwicklung in den Niedertemperatur-Solarthermie- und Wärmespeichertechnologien, die einen deutlichen Nachholbedarf verzeichnen.

Trotz des jährlichen Wachstums von im Mittel ca. 20 % über die letzten 20 Jahre ist der deutsche Solarthermiemarkt mit einem Umsatz von ca. 1,2 Mrd. Euro im Jahr 2009 immer noch relativ klein und leidet in den Jahren 2009 und 2010 unter einem Marktrückgang. Er wird dominiert von mittelständisch geprägten Unternehmen, zu denen vielfach auch noch die Unternehmen der Heizungsindustrie zu zählen sind, auf die gegenwärtig etwa die Hälfte des Umsatzes entfällt. Märkte mit nennenswerten Umsätzen konnten sich bislang nur für Ein- und Zweifamilienhäuser mit Anlagen zur Trinkwassererwärmung sowie mit

Kombianlagen zur Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung mit einer solaren Deckungsrate von 20 % bis 30 % entwickeln. Angesichts der Zielsetzung der Bundesregierung, den Anteil der Wärme aus erneuerbaren Energien bis 2020 auf 14 % zu verdoppeln, müssen die bestehenden Marktsegmente deutlich ausgebaut werden und die Anlagen vor allem günstiger und noch nutzerfreundlicher werden. Darüber hinaus müssen Technologien für neue, vielversprechende Marktsegmente und Anwendungen erforscht und entwickelt werden, in denen bislang nur Pilotanlagen gebaut wurden.

Um die Solarthermie in den kommenden Jahren zu einer relevanten Energiequelle im Bereich Wärme- und Kälteerzeugung zu machen, ist eine deutliche Beschleunigung der Technologieentwicklung erforderlich. Dies dient auch zum Erhalt der technologischen Führungsrolle Deutschlands im Bereich der Solarthermie.

2.2.1 Forschungsbedarf

Solarkollektoren

Solarkollektoren sind eine Kernkomponente solarthermischer Anlagen. Da der Materialkostenanteil sehr hoch ist, ist zur Kostensenkung der Einsatz neuer Materialien, insbesondere von Kunststoffen, erforderlich. Regelbare Schichten zur Steuerung des Lichteinfalls, die die Überhitzung der Kollektoren vermeiden, sind ebenso zu entwickeln wie neue Kollektorkonstruktionen für Prozesswärme-, Luft-, Fassaden- und dachintegrierte Kollektoren.

Photovoltaisch-Thermische Hybridkollektoren

Bei hohen Anteilen Solarenergie an der Energiebereitstellung wird der Platz auf den Dächern knapp und Solarthermie- und Photovoltaikanlagen stehen in Platzkonkurrenz. Dies Problem kann mit photovoltaisch-thermischen Hybridkollektoren (PVT) gelöst werden, die auf derselben Fläche Strom und Wärme erzeugen mit einer nur geringfügig geringeren Effizienz gegenüber isolierten Systemen. Die Herausforderung besteht darin, einen PVT-Kollektor für ein optimiertes PVT-Gesamtsystem zu entwickeln und die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern.

Prozesswärmekollektoren und -systeme

Solarthermische Anlagen können Wärme bis zu 250 °C liefern. Für Kollektoren über 100 °C sind Vakuumröhren oder konzentrierende Systeme erforderlich. In den Prozesswärmesystemen müssen neue Komponenten entwickelt werden, die den Temperaturenanforderungen gerecht werden.

Wärmespeicher

In unseren Breitengraden trifft die Solarstrahlung zu etwa einem Drittel im Winterhalbjahr und zwei Drittel im Sommerhalbjahr auf. Im gut gedämmten Niedrigenergiehaus beträgt der Wärmebedarf zur Trinkwassererwärmung etwa 25 % des Gesamtwärmebedarfs und fällt gleichmäßig übers Jahr an. Der Raumwärmebedarf fällt dagegen nur in der Heizperiode an und beträgt etwa 75 % am Gesamtwärmebedarf. Folglich ist eine verlustarme saisonale Speicherung vom Sommer- in das Winterhalbjahr erforderlich, um hohe Solaranteile am Gesamtwärmebedarf von über 50 % bis zu 100 % mit Solarwärme zu erreichen.

Heute werden sowohl in Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern als auch in Nahwärmeeinrichtungen

Wärmespeicher eingesetzt, die in Bezug auf die Be- und Entladetechnik und die Wärmeverluste gutes Entwicklungspotenzial aufweisen. Parallel dazu ist Grundlagenforschung erforderlich, um neue Materialien und Konzepte für Speicher mit hohen Speicherdichten und geringen Verlusten zu entwickeln.

Die Forschungsthemen im Bereich thermische Speicher werden in Kapitel 3.5 vorgestellt.

Systemtechnik und sonstige Komponenten

Effizienz und Kosten einer solarthermischen Anlage hängen sehr stark von einer optimierten Anlagenkonzeption, einer intelligenten Regelstrategie und dem Einsatz von optimierten Komponenten wie z. B. gut gedämmten Solarleitungen oder Hocheffizienzpumpen ab. Zu systemtechnischen Fragestellungen gehört auch die Systemintegration der Solarthermie in Anlagen mit Wärmepumpen, Biomassekesseln, fossilen Brennkesseln und Nahwärmesystemen mit BHKWs. Standardisierte Lösungen für Mehrfamilienhäuser sind dabei ein wichtiger Aspekt.

Solaraktivhäuser mit hohen solaren Deckungsanteilen über 50 %

Die Erhöhung des solaren Deckungsanteils pro Gebäude ist Voraussetzung für die deutliche Erhöhung des Solarwärmeanteils an der Wärmeversorgung. In über 400 Gebäuden wurde in Deutschland in Ein- und Zweifamilienhäusern eine solare Deckung über 50 % bis zu 100 % bereits demonstriert. Neben der Optimierung der Speichertechnik und der Integration großer Kollektorflächen besteht die Herausforderung vor allem in der Optimierung der System- und Regeltechnik und der Integration der Solarwärmanlage in die Heiztechnik und das Gesamtgebäude.

Solaraktive Modernisierung

Die systematische energetische Gebäudesanierung mit wesentlich höherer Modernisierungsrate, die heute bei unter 1 % liegt und auf 2,5 % gesteigert werden muss, wenn innerhalb von 40 Jahren alle Gebäude saniert werden sollen, sollte weitmöglichst mit der Solarwärmenutzung kombiniert werden, um auch im Gebäudebestand hohe Anteile an Solarthermie in der Wärme- und Kälteversorgung bereitstellen zu können. Erwartet wird die Entwicklung von multifunktionellen, vorgefertigten Fassadenelementen, die Wärmedämmung und aktive Solarenergiegewinnung



(Wärme, Strom, Licht) enthalten und ohne große Eingriffe in die Gebäude angebracht werden können.

Große solarthermische Anlagen und solare Nahwärmanlagen

In Stadtquartieren mit hoher Gebäudedichte reichen die Dachflächen nicht aus, um ausreichend Solarwärme bereitstellen zu können. Mit einem Nahwärmesystem können diese Stadtteile mit Solarwärme und Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung versorgt werden. Mit einem zentralen, großen saisonalen Wärmespeicher lassen sich sehr hohe solare Deckungsanteile erzielen. Die Nutzung der Solarwärme über Nahwärmenetze ermöglicht es, etwas moderatere Sanierungsanforderungen an die Gebäudesubstanz zu stellen und trotzdem die CO₂-Reduktionsziele zu erreichen. Hierfür sind Optimierungsstrategien zu entwickeln.

Solare Kühlung

Absorptions- und Adsorptionsanlagen mit solarthermischen Kollektoren als Wärmequellen sind eine vielversprechende Option, um den zunehmenden Klimatisierungsbedarf nachhaltig zu decken. Das Ziel ist, kompakte und kostengünstige Solarthermiesysteme zu entwickeln, die mit Hilfe von solarthermischen Kollektoren im Sommer kühlen und im Winter heizen.

2.2.2 Forschungsfelder

2.2.2.1 Grundlagenforschung

Kollektor

- Identifizierung von Metallen, Kunststoffen und anderen Materialien zur Reduzierung der Kosten des Solarkollektors unter Berücksichtigung der besonderen Einsatzbedingungen
- Entwicklung von an die Spezifika der Alternativmaterialien angepasste Kollektorkonstruktionen
- Entwicklung von schaltbaren Schichten zur Limitierung der Maximaltemperaturen im Kollektor

Wärmespeicher

- Entwicklung von Speichern mit Phasenwechselmaterialien
- Entwicklung von chemischen Wärmespeichern

Systemtechnik

- Entwicklung von vernetzten Reglern mit meteorologisch und verbrauchsseitig vorausschauenden Regelstrategien

Solare Kühlung

- Neue Sorptionsmaterialien, Erhöhung der COP-Werte und damit der Effizienz, effizientere Rückkühlwerke, Reduzierung der Anlagengröße und der Kosten

2.2.2.2 Vorlaufforschung

Kollektoren

- Weiterentwicklung von multifunktionalen, fassadenintegrierten Kollektoren
- Entwicklung von auf die jeweilige Anwendung optimierte und stillstandssichere Kollektoren auf Basis der Identifikation von anwendungsspezifisch optimalen Systemkonfigurationen

Photovoltaisch-Thermische Hybridkollektoren und -Kollektorsysteme

- Entwicklung von PVT-Kollektoren mit erhöhten Wärme- und Stromerträgen und hoher Betriebssicherheit (optimierter Schichtaufbau Modul-Absorberverbund, Reduzierung der Wärmeverluste des Kollektors, Reduzierung der Temperaturabhängigkeit der Photovoltaikzelle, Stagnationssicherheit)
- Identifikation von marktnahen PVT-Systemkonzepten und Entwicklung angepasster Kollektoren und Systeme

Prozesswärme

- Weiterentwicklung von Prozesswärmekollektoren und Systemkomponenten für höhere Temperaturen zwischen 100 °C und 250 °C
- Weiterentwicklung von Systemtechnik und mitteltemperaturfesten Komponenten

Solaraktive Gebäudemodernisierung

- Multidisziplinäre Entwicklung von Fassadenmodulen mit solarthermischen Kollektoren
- Entwicklung von Modernisierungskonzepten und -systemen mit solarthermischen Kollektoren
- Entwicklung von leicht ins Dach integrierbaren solarthermischen Kollektoren

Solarhäuser mit hohen Deckungsanteilen

- Entwicklung von Modellen von Solaraktivhäusern zur simulationstechnischen Systemoptimierung mit dem Ziel der Steigerung der Deckungsanteile und Kostenreduzierung
- Optimierung großer Kollektorfelder, Speicherbe- und -entladung sowie weiterer Komponenten
- Entwicklung von Maßnahmen zur standardisierten Planung von Solarhäusern

Große solarthermische Anlagen mit solaren Nahwärmeanlagen

- Entwicklung von optimierten Nahwärmekonzepten mit geringen Wärmeverlusten für den Betrieb mit solarthermischen Anlagen
- Weiterentwicklung von kostengünstigen und schnell installierbaren Großkollektoren zur Integration in Nahwärmeanlagen

2.2.2.3 Angewandte Forschung**Kollektoren**

- Optimierung von Standardkollektorkonstruktionen zur Effizienzerhöhung, Bauhöhenreduzierung, besseren Dachintegrierbarkeit und Kostenreduzierung
- Weiterentwicklung der Produktionstechnologie zur Kostensenkung

Luftkollektoren und Luftkollektorsysteme

- Entwicklung von optimierten Luftkollektoren und Luftkollektorsystemen
- Identifizierung von marktnahen Anwendungsfeldern und Weiterentwicklung von Luftkollektorsystemen für diese Anwendungsfelder

Wasser-Wärmespeicher

Entwicklung kostengünstiger saisonaler Wasserspeicher für hohe solare Deckungsanteile mit verbesserter Wärmedämmung und verbesserter Be- und Entladetechnik

- Weiterentwicklung großer saisonaler Wasserspeicher für solare Nahwärmesysteme im Erdreich zur weiteren Kosten- und Wärmeverlustreduzierung

Systemtechnische Fragestellungen

- Entwicklung von Simulationstools für das optimierte Anlagendesign
- Optimierung der Regelstrategien und Entwicklung von intelligenten, vorausschauenden Reglern mit Ertrags- und Funktionsanalyse und Einbindung in die Steuerung der gesamten Haustechnik
- Erhöhung der Betriebssicherheit von solarthermischen Anlagen, insbesondere in Bezug auf die Stagnation
- Energetisch optimierte Lösungen für die Kombination von Solarthermieanlagen mit weiteren Wärmeerzeugern, insbesondere Wärmepumpen



2.3 Solarthermische Stromerzeugung

Zielsetzungen

- Kostensenkung solarthermischer Stromerzeugung in Turm-, Parabolrinnen- und Fresnelkraftwerken
- Effizienzsteigerung und Kostensenkung optischer Komponenten
- Erhöhung der Lebensdauer von Komponenten
- Optimierung und Automatisierung von Betrieb und Wartung

Forschungsthemen

- Ausnutzung des Hochtemperaturpotenzials für Rinnen- und Turmkraftwerke einschließlich der Wärmespeicher
- Standardisierung von Prüf- und Auslegungsverfahren sowie der Ressourcenbewertung
- Erschließung des Synergiepotenzials von Solarthermie-Wärmenutzung und Wärmekraftkopplung
- Solarthermische Großkraftwerke mit kombinierter Meerwasserentsalzung
- Kleinere und mittlere solarthermische Stromerzeugung mit KWK und KWKK zur solaren Kühlung, Klimatisierung und Prozesswärmenutzung

Übersicht Forschungsbedarf

Solarthermische Stromerzeugung hat das Potenzial, kostengünstig einen wesentlichen Anteil zur weltweiten Energieversorgung beizutragen. Trotz der Fluktuation der Sonnenstrahlung liegt ihre Stärke in der Fähigkeit, zur Lastabsicherung der Stromnetze beizutragen und so hohe Anteile anderer volatiler Stromerzeugungstechnologien im Netz nutzbar zu machen durch die Einbindung von Energiespeichern oder durch die fossile Hybridisierung. Aufgrund der meteorologischen Gegebenheiten werden solarthermische Kraftwerke zur Stromversorgung nicht in Deutschland realisiert. Mittelfristig erscheint jedoch der Import von Strom aus solarthermischen Kraftwerken in Nordafrika nach Europa vorteilhaft. Aufgrund langjähriger Forschungsarbeiten sind deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen derzeit im Bereich solarthermische Stromerzeugung weltweit technologisch führend. Die ausgezeichnete technologische Position Deutschlands führt zu großen Lieferanteilen in Solarkraftwerken und sollte weiter ausgebaut werden.

Aktuell sind weltweit Parabolrinnen-Kraftwerke mit etwa 1.000 MW in Betrieb und noch einige GW im Bau oder im fortgeschrittenen Planungsstadium. Die Stromgestehungskosten liegen an vielen Standorten noch deutlich über 0,2 €/kWh, so dass intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig sind, um die Kosten auf eine wettbewerbsfähige Größenordnung zu reduzieren.

Deutlich höhere Betriebstemperaturen und damit höhere Effizienzen können zur Absenkung der Stromgestehungskosten beitragen. Hier haben insbesondere Turmkraftwerke, von denen es erst sehr wenige kommerziell betriebene Systeme gibt, ein großes Potenzial. Weitere Beiträge zur Kostensenkung können durch die Verbesserung der optischen Komponenten, durch Optimierung von Betrieb und Wartung, durch die Erhöhung der Lebensdauer von Komponenten und durch die Standardisierung von Auslegungs- und Prüfverfahren erreicht werden.

Darüber kann die Möglichkeit der gekoppelten Entsalzung von Meerwasser zur Bereitstellung von Trinkwasser mit solarthermischer Stromerzeugung zur Lösung der Trinkwasserproblematik in ariden Regionen beitragen, was bislang aber nicht ausreichend erprobt wurde. Die Technik könnte außerdem durch Kraft-Wärmekopplung auch wesentliche Beiträge zur Wärme- und Kältebereitstellung leisten, sie muss dafür jedoch auf kleinere Leistungsgrößen angepasst werden.

Die Arbeiten zur solarthermischen Stromerzeugung sind eng verknüpft mit Arbeiten zu thermischen Speichern und haben Bezüge zu chemischen Speichern (solarthermische Erzeugung von Wasserstoff). Die Zwischenspeicherung von Wärme mit hohen Temperaturen ermöglicht eine bedarfsgerechte Stromerzeugung unabhängig von der Sonneneinstrahlung und bietet damit

einen entscheidenden Vorteil gegenüber Windkraft und Photovoltaikkraftwerken. Wärmespeicher sind daher ein zentrales Element solarthermischer Kraftwerke, das noch weiterentwickelt und insbesondere auf den Temperaturbereich und das im Solarkraftwerk verwendete Wärmeträgerfluid angepasst werden muss.

Die solarthermische Erzeugung von Wasserstoff ist noch im Forschungsstadium, bietet jedoch interessante Perspektiven, um Brenn- und Kraftstoffe für den mobilen Einsatz bereitzustellen.

2.3.1 Forschungsfelder

Ausnutzung des Hochtemperaturpotenzials für solarthermische Kraftwerke

Die Herausforderung liegt darin, höhere Konzentrationen mit nahezu gleicher Effizienz wie in heutigen Systemen bereitzustellen, Wärmeträger und Werkstoffe für die Receiver für den Hochtemperatureinsatz unter starker zyklischer Belastung zu entwickeln und effiziente Betriebsvarianten, insbesondere beim An- und Abfahren, zu identifizieren. Hierzu kommen neue Wärmeträgermedien wie Dampf, Salz, Luft und längerfristig möglicherweise auch Partikel zum Einsatz.

Bei ihrem Einsatz in Linearkonzentratoren lassen sich bis 2015 Kostensenkungen von etwa 10–15 % erzielen, in Turmsystemen sind Kostensenkungen bis 2020 von bis zu 25 % möglich.

Effizienzsteigerung und Kostensenkung bei optischen Komponenten

Die optische Effizienz von Absorber und Receiver sowie die Verbesserung der Steifigkeit von Tragestrukturen und der entsprechenden Nachführgenauigkeit müssen vor allem durch innovative Beschichtungen und durch ein besseres Verständnis der Windlasten auf diesen Systemen erzielt werden. Bis 2015 sind Effizienzgewinne von bis zu 10 % vorstellbar bei gleichzeitiger Senkung der Herstellkosten von mehr als 20 %.

Erhöhung der Lebensdauer

Die Lebensdauer von Solarkomponenten sollte für einen wirtschaftlichen Betrieb möglichst lang sein und mindestens 20 Jahre betragen. Neue Komponenten, die heute auf den Markt drängen, können dies jedoch in der Regel nicht belastbar nachweisen. Hier besteht die Herausforderung darin, verlässliche Verfahren zur Vorhersage der

Lebensdauer zu entwickeln, um einen kommerziellen Einsatz von innovativen Produkten zu beschleunigen. Ziel ist die Entwicklung von beschleunigten Alterungsverfahren zur Prüfung der Haltbarkeit von Spiegelbeschichtungen bis zum Jahr 2015.

Optimierung und Automatisierung von Betrieb und Wartung

Betrieb und Wartung der Anlagen erfolgt heutzutage fast ausschließlich Operatorgeführt beziehungsweise durch Wartungspersonal. Moderne Rechenverfahren und innovative Sensorik können den Anlagenbetrieb optimieren und die Erlöse um bis zu 10 % erhöhen. Wartungskosten und Wasserverbrauch müssen durch den Einsatz von Robotern und innovativen Reinigungsverfahren um über 30 % gesenkt werden.

Standardisierung von Prüf- und Auslegungsverfahren sowie Ressourcenbewertung

Zur Prüfung von Solarkomponenten und für die Auslegung von Solarfeldern müssen dringend Richtlinien und Normen entwickelt werden, um die Qualität der gebauten Anlagen abzusichern und eine Vergleichbarkeit von Produkten verschiedener Hersteller zu ermöglichen. Ziel ist es, bis 2013 solche Richtlinien für Linearkonzentratoren vorzulegen, bis 2017 sollen diese dann für Turmsysteme bereitstehen.

Solarthermische Großkraftwerke mit kombinierter Meerwasserentsalzung

Bisher gibt es keine Erfahrung in der großtechnischen Kombination solcher Systeme. Hier sind zunächst entsprechende Werkzeuge für die Auslegung zu entwickeln und ihre Einsatzfähigkeit an kommerziellen Pilotprojekten zu demonstrieren. Auf dieser Basis lassen sich dann einzelne Komponenten für diesen Betrieb verbessern. Eine kommerzielle Demonstration ist bis 2015 angestrebt.

Kleinere und mittlere solarthermische Stromerzeugung mit KWK und KWKK

Bisher gibt es kaum Erfahrungen bei solaren KWK und KWKK-Anlagen unter 2 MW_{el}. Ziel ist es, bis 2015 kostenoptimierte Komponenten (Kollektoren sowie Wärmekraftmaschinen mit Dampf und ORC) und eine optimierte Betriebsführung für diese Leistungsklasse zu entwickeln, zu zertifizieren und Systemkonzepte zu demonstrieren.



2.3.1.1 Grundlagenforschung

Ausnutzung des Hochtemperaturpotenzials

Erforscht werden soll die Einbindung von Hochtemperatur-Solarthermie in überkritische Dampfprozesse und geschlossene Gasturbinenprozesse mit dem Ziel der Erprobung von Konzepten mit Jahreseffizienzen über 22 % bis zum Jahr 2020.

Kostensenkung bei Konzentratoren

Entwicklungsbedarf besteht für kostengünstige alternative Konzentratoren wie z. B. Mikrokonzentratoren und Verbundmaterialien mit der Zielsetzung, erste Prototypen im relevanten Maßstab bis zum Jahr 2015 aufzuweisen.

Reflektoren

Bei frontverspiegelten Reflektoren muss die Lebensdauer erhöht und der Reinigungsaufwand reduziert werden. Hierzu ist die Entwicklung von innovativen Beschichtungen und Reinigungsverfahren erforderlich. Zielsetzung ist eine Lebensdauer der Spiegel bis 20 Jahre bei gleichzeitiger Reduzierung des Reinigungsaufwandes um 90 % bis zum Jahr 2020.

2.3.1.2 Vorlaufforschung

Effizienzsteigerung bei Turmreceivern

Die Entwicklung von Werkstoffen, Bauteilen und Systemtechnik für direktabsorbierende Hochtemperatursystemen ist erforderlich, um Temperaturen von mehr als 700 °C bei Effizienzen über 90 % zu erreichen.

Kostengünstige Kollektorstrukturen mit hoher Formgenauigkeit und Steifigkeit

Effiziente Methoden zur Analyse realistischer Windlasten in Solarfeldern sind zu entwickeln, um Modelle für realistische Windlasten im Feld bis zum Jahr 2015 vorliegen zu haben.

Erhöhung der Lebensdauer von frontverspiegelten Reflektoren

Durch die Entwicklung von beschleunigten Alterungsverfahren zur Analyse der Degradation innovativer Schichten sollen bis zum Jahr 2015 zuverlässige Verfahren zur Erhöhung der Lebensdauer der Reflektoren vorliegen.

Effiziente Betriebsführung

Es ist eine innovative Sensorik zu entwickeln für eine optimierte und autonome Nachführung der Systeme, die bis zum Jahr 2014 erprobt sein soll.

2.3.1.3 Angewandte Forschung

Markteinführung innovativer und kostengünstiger Hochtemperatursysteme

Durch die Entwicklung von Prototypensystemen für solare Direktverdampfung (überhitzt) und Salzschnmelzen in Parabolrinnen- und Fresnel-systemen sowie durch Demonstration von ersten kommerziellen Turmsystemen mit Salz, Dampf und Luft sollen erste Demonstrationsanlagen bis 2013 erstellt werden.

Effizienzsteigerung bei Glasspiegeln und Absorberrohren

Die Entwicklung von verbesserten Beschichtungen und Maßnahmen zur Erreichung einer höheren Formgenauigkeit der Spiegel wird eine Erhöhung des optischen Systemwirkungsgrades um 5 % erwartet.

Erhöhung der Lebensdauer

Ein Messverfahren zur Bestimmung der Degradation von Reflektoren in großflächigen Systemen ist zu entwickeln, das bis zum Jahr 2012 verfügbar sein kann.

Maximierung des Erlöses durch optimierten Betrieb

Konzepte für den erlösoptimierten Betrieb von Solarkraftwerken durch den optimierten Einsatz von Energiespeichern sowie durch Zufeuerung unter Ausnutzung von Forecast-Information für Wetter und Tarifstruktur sind zu entwickeln. Es werden Erlösgewinne von bis zu 10 % bis zum Jahr 2013 erwartet.

Kostensenkung durch Standardisierung

Richtlinien und Prüfnormen für Komponententests und Abnahmeverfahren sind zu entwickeln, die bis zum Jahr 2013 für Linearkonzentratoren und bis zum Jahr 2015 für Turmsysteme vorliegen sollten.

Solarthermische Kraftwerke zur Meerwasserentsalzung

Durch Entwicklung von Auslegungswerkzeugen zur Konzeptoptimierung und Demonstration im großtechnischen Maßstab sowie die Weiterentwicklung von relevanten Komponenten für den Solarbetrieb wird die Nutzung solarthermischer Kraftwerke zur Meerwasserentsalzung ermöglicht und erprobt. Eine erste Demonstration ist bis zum Jahr 2014 möglich.

Wärme-Kraft-Kälte-Kopplung für Kühlung, Klimatisierung und Prozesswärmenutzung

Um solarthermische Kraftwerke in Wärmekraftkältekopplung nutzen zu können, sind Auslegungswerkzeuge zum Design effizienter Kleinsysteme zu entwickeln, die Komponenten anzupassen und die Funktionsfähigkeit in ersten Systemen zu demonstrieren. Bis zum Jahr 2014 sollen verschiedene Systemvarianten demonstriert werden.

2.3.1.4 Sonstige Forschungsaufgaben

Weitere wichtige Forschungsaufgaben beziehen sich auf die Weiterentwicklung von Methoden zur Ressourcenanalyse der Direktnormalstrahlung aus Satellitendaten und Entwicklung geeigneter Forecast-Methoden. Darüber hinaus sind Methoden zur Integration von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Leitungen (HGÜ) in das normale Hochspannungsnetz Gegenstand weiterer Forschung, auch im Rahmen der DESERTEC-Initiative (siehe auch Kapitel 2.1.1).

Ebenso müssen die Auswirkungen innovativer Systeme auf ihre ökologische und soziale Verträglichkeit fortlaufend bewertet werden.



2.4 Bioenergie

Zielsetzungen

- Identifikation nachhaltiger Biomasse-Einsatzfelder und Gewährleistung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung dieser Einsatzfelder
- Nutzung von ausschließlich nachhaltig produzierter und zertifizierter Biomasse
- Vorkonfektionierte Biomasse-Energieträger in normierter Herstellung
- Erhöhte Flächen- und Nutzungspfad-Effizienz der energetischen Biomassenutzung
- Nutzbarmachung der Biomasse als leicht regelbare erneuerbare Energiequelle

Forschungsthemen

- Erhöhung der Effizienz bestehender Biomasse-Nutzungspfade
- Entwicklung von Konzepten zur verstärkten Mobilisierung von Biomasse-Reststoffen unter besonderer Berücksichtigung von Kaskadennutzungen
- Konzepte zur Lenkung der Stoffströme von nicht nachhaltiger hin zur nachhaltigen Biomassenutzung

- Technologien zur nachhaltigen Erschließung und Nutzung von Biomassepotenzialen mit dem Fokus auf der größtmöglichen Nutzbarmachung von biogenen Abfall- und Reststoffen
- Entwicklung nachhaltiger Zertifizierungssysteme für importierte Biomasse
- Bewertung der Rolle des Biomasse-Imports im Stoffstrommanagement sowie Bewertung und Entwicklung von Zertifizierungssystemen
- Entwicklung von standardisierten Bewertungsmodellen zur vergleichenden Untersuchung von Biomasse-Prozessketten
- Konzepte zum optimierten Stoffstrommanagement
- Optimierung der Bioenergie-Komponenten und intelligente Integration in das Gesamtenergiesystem
- Entwicklung von Technologien zur Nutzung der Biotechnologien zur Bereitstellung von Regel- und Ausgleichsenergie

Übersicht Forschungsbedarf

Die Bioenergie spielt eine besondere Rolle im Konzert der erneuerbaren Energien. Aufgrund ihrer guten Speicherbarkeit und der Möglichkeit, sie in alle Endenergieformen (Strom, Wärme, Kraftstoff) umwandeln zu können, spielt sie in allen Energieszenarien eine wichtige Rolle. Allerdings kann Bioenergie nur einen begrenzten Beitrag zur Energieversorgung leisten, weil sie trotz der hohen Diversität ihrer Herkunft nur begrenzt verfügbar ist. Ihre Verfügbarkeit ist insbesondere eingeschränkt durch die Forderung nach einer nachhaltigen Bereitstellung sowie durch die Konkurrenz der energetischen mit der stofflichen Nutzung und der Nutzung als Nahrungsmittel. Biomasse zur energetischen Nutzung wird deshalb langfristig vor allem aus biogenen Rest- und Abfallstoffen gewonnen werden.

Die Nutzung von Bioenergie ist in vielen Anwendungsfällen heute Stand der Technik und hat derzeit mit ca. 70 % den größten Anteil der erneuerbaren Energien an der Endenergiebereitstellung. Um die begrenzten Biomasseressourcen effizient, konfliktfrei und nachhaltig einzusetzen,

ist ihr Einsatz gezielt auf solche Anwendungen zu fokussieren, die langfristig auch bei großer Effizienzsteigerung nur durch Bioenergie gedeckt werden können und die nachhaltig sind. Dazu ist auch die Nutzbarmachung eines möglichst umfassenden Spektrums von biogenen Rest- und Abfallstoffen erforderlich.

2.4.1 Forschungsfelder

2.4.1.1 Grundlagenforschung

Bedarfsgerechte Bereitstellung von Bioenergie

Zentrale Aufgabe ist die Identifikation von Wandlungspfaden, die Energie bedarfsgerecht bereitstellen können und passende Kopplungseigenschaften im Gesamtsystem der erneuerbaren Energien aufweisen.

- Abgleich der Schnittstellen zwischen Anforderungen des Energiesystems und Eigenschaften der verschiedenen Bioenergie-technologien
- Definition der erforderlichen Eigenschaften der Bioenergie-technologien und der notwendigen Anpassungen an das Energiesystem

- Entwicklung von Bewertungsmodellen zur vergleichenden Untersuchung konkurrierender Nutzungspfade

2.4.1.2 Vorlaufforschung

Entwicklung von Methanisierungsverfahren

- Neu- und Weiterentwicklung von Verfahren zur thermochemischen Konversion von Biomasse in methanreiche Gase

Dynamisierung von Biogasanlagen

- Entwicklung von dynamischen Modellen zur Prozessvorhersage und -beobachtung
- Entwicklung von Komponenten, die die Dynamisierung ermöglichen wie z. B. Hochleistungsfermenter, MSR-Technik, Substratvorbehandlung und Fütterungsregime

Entwicklung von Verfahren zur Biomassevergasung und Kraftstoffgewinnung

- Erhöhung der Brennstoff-Flexibilität der Vergasungsverfahren (insbesondere für biogene Reststoffe)
- Erzeugung von Synthesegasen, die an nachfolgende Konversionsprozesse adaptiert sind
- Entwicklung von Verfahren zur Bereitstellung von gasförmigen Kraftstoffen für die stationäre und mobile Nutzung (Wasserstoff, Methan, Brenngase für die Verstromung, etc.)
- Entwicklung von Verfahren zur Bereitstellung von flüssigen Kraftstoffen für den Luft- und Schwerlastverkehr wie z. B. Kerosin und Dimethylether (DME)
- Erzeugung von Produktgasen mittels thermochemischer Vergasung, die sich durch einen hohen Methangehalt auszeichnen
- Untersuchung der Stoffbilanzen von Vergasungsverfahren bzgl. Austrag von Nähr- und Schadstoffen (Aschenutzung)

2.4.1.3 Angewandte Forschung

Integration von Bioenergieanlagen in dynamische Energieversorgungsstrukturen

- Entwicklung von Konzepten zur Erbringung von Netzdienstleistungen (Gas- und Stromnetze) und bedarfsgerechte Energiebereitstellung (Gas, Strom, Wärme)
- Gesamteffizienzsteigerung der Bioenergieproduktion und von Biomasse-Nutzungsketten
- Entwicklung von Konzepten zur Verknüpfung der Biomasse aus unterschiedlichen Herkunftsbereichen durch strukturelle und organisatorische Maßnahmen im Sinne eines regionalen Stoffstrommanagements
- Entwicklung von Geschäftsmodellen im Kontext regionaler Stoffstrommanagementsysteme und Ermittlung der erzielbaren Effekte im Bereich der regionalen Wertschöpfung
- Weiterentwicklung von Konzepten für Bioenergiedörfer und deren wissenschaftliche Begleitung
- Hemmnisanalyse mit Ableitung von Akzeptanzsteigernden Maßnahmen
- Entwicklung von Geschäftsmodellen für eine optimierte Bioenergieerzeugung
- Netzeinspeisung von Biogas in kleinskaligen Bereichen
- Ökoeffektivitätsforschung, z. B. beim Wasserschutz durch gezielte Nutzung von organischen Reststoffen aus der Landwirtschaft als Co-Substrat in Biogasanlagen und Aschenutzung im Wald zur Erarbeitung von Konzepten und Entwicklung von verbindlichen Vorgaben



2.5 Geothermie

Zielsetzungen

- Wirtschaftlichkeit erdgekoppelter Wärmepumpen für die Gebäude-Klimatisierung
- Ausbau der saisonalen Speicherung von Wärme und Kälte in Erd- und Aquiferspeichern auf mehrere hundert TWh pro Jahr
- Senkung der Kosten und des Erfolgsrisikos der Erschließung tiefliegender Heißwasser-Aquifere für die Wärme- und Stromnutzung
- Erhöhung der Leistung und der Nutzungsdauer von Enhanced Geothermal Systems (EGS)

Forschungsthemen

- Optimierung der untertägigen Installationen und der Verteilersysteme für Wärme und Kälte zur Erhöhung der Jahresarbeitszahlen erdgekoppelter Systeme
- Entwicklung und Erprobung von Wärme- und Kälte-Speichersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen und ihre Integration in Energieversorgungssysteme
- Erprobung von Konzepten zur Steigerung der Thermalwasserproduktion aus Heißwasser-Aquiferen sowie Verbesserung der Prognosemöglichkeiten
- Demonstration der Wirtschaftlichkeit des EGS-Konzeptes

Übersicht Forschungsbedarf

Geothermie ist eine erneuerbare Energiequelle, die kontinuierlich Wärme, Kälte und Strom bereitstellen kann. Zur Energiegewinnung stehen grundsätzlich drei Technologien bereit:

Erdgekoppelte Wärmepumpen dienen zur Wärmeversorgung von kleineren und mittleren Wärmeabnehmern, z. B. von Ein-/Mehrfamilienhäusern und Bürogebäuden (siehe Kapitel 3.1). Die Nachfrage nach diesen Systemen hat bis 2007 dynamisch zugenommen, inzwischen sind Systeme mit einer Gesamtkapazität von rund 2 GW in Deutschland installiert. Die jährlichen Zuwachsraten lagen Anfang des Jahrzehnts bei über 20 %, stagnieren jedoch weitgehend seit 2007. Es fehlt noch an einer Durchdringung des Wärmemarktes im Gebäudebestand.

Nutzung vom Heißwasservorkommen mittels Bohrungen in ca. 2–3 km Tiefe zur Wärmeversorgung größerer Verbraucher, z. B. zur Einspeisung in größere Wärmenetze bis zu 40 MW. Weltweit sind bislang ca. 17 GW und in Deutschland 150 MW dieser Systeme installiert, die unmittelbar vor einer breiteren Markteinführung stehen. Hemmnisse sind dabei die oft noch unzureichende Planungssicherheit bei der Erschließung der Heißwasservorkommen und ein unzureichender Ausbau der Wärmenetze. Im Vergleich zu den kleineren Anlagen eignen sich diese Systeme meist besser für eine enge Bebauung.

Stromerzeugung mittels Heißwasserförderung aus Tiefbohrungen in ca. 4–5 km Tiefe.

Weltweit sind bislang 11 GW elektrische Leistung installiert. Die drei ersten in Deutschland ans Netz gegangenen Anlagen dieser Art mit etwa 7 MW installierter elektrischer Leistung zeigen die technische Machbarkeit dieser Form der Stromerzeugung. Es sind jedoch weitere Pilotanlagen erforderlich.

2.5.1 Forschungsbedarf

Ein Schwerpunkt der bisherigen und auch zukünftigen Technologieentwicklung in der oberflächennahe Geothermie ist die Steigerung der Jahresarbeitszahl, d. h. des Verhältnisses von bereitgestellter Wärmeenergie zum eingesetzten Energieaufwand (üblicherweise Strom). Abhängig von der eingesetzten Wärmequelle haben Kompressions-Wärmepumpen derzeit Jahresarbeitszahlen von 3 (Umgebungsluft) bis über 4 (Erdsonden/Wasser).

Ansatzpunkte zur Steigerung der Jahresarbeitszahl bieten Anlagenbau, Verfahren und Materialien aller Komponenten erdgekoppelter Wärmepumpensysteme. Von großer Bedeutung ist die gute Abstimmung des gesamten Heizsystems und des Gebäudewärmebedarfs an die Charakteristik der Wärmebereitstellung durch die Wärmepumpe, denn nur mit einem Niedrigtemperatur-Heizsystem kann eine hohe Arbeitszahl sprich Effizienz erreicht werden.

Die Kombination mit anderen Energienquellen trägt ein Potenzial für weitere Effizienzsteigerung. Qualitätssicherung ist unverzichtbar, das schließt Standorterkundung, -erschließung und Überwachung ein. Einzelne Komponenten (z. B. Verpressmaterial für Erdwärmesonden oder ökologisch wie technisch optimierte Wärmeträgermedien) und Verfahren (Bestimmung der thermischen Untergrundeigenschaften, Messungen zur Qualitätskontrolle in fertigen Anlagen) bedürfen weiterer Entwicklungsarbeit. Für die Erschließung des Marktes im Altbausektor müssen geeignete Bohr- und Installationsverfahren sowie mit älteren Heizsystemen kompatible Wärmepumpen entwickelt werden. Mögliche Umwelteinflüsse wie z. B. der Einfluss des Wärmeentzugs auf die Umgebung oder des Wärmeträgermedium sind zu untersuchen. Eine wesentliche F&E-Aufgabe liegt in der Einbindung neuer Speichermöglichkeiten in Versorgungssysteme, z. B. durch die saisonale Wärmespeicherung im Untergrund. Begleitend sollten rechtliche Rahmenbedingungen einzelner Bundesländer für Genehmigungen, Bau und Betrieb vereinfacht und vereinheitlicht werden.

Zwei Technologien der Nutzung tiefer Lagerstätten sind grundsätzlich unterscheidbar.

Konventionelle geothermische Systeme

basieren auf leicht zugänglichen Heißwasserreservoirien, dieses hydrothermale Potenzial wird in Deutschland erschlossen. Dampfreservoirie sind dagegen beschränkt auf durch vulkanische oder tektonische Aktivitäten geprägte Regionen wie z. B. Island.

Unkonventionelle geothermische Systeme

(Enhanced Geothermal Systems, EGS) basieren überwiegend auf Heißwasserlagerstätten und trockenen Gesteinsformationen, die außerhalb der aktiven Zonen mit Heißwasserreservoirien liegen und damit, bezogen auf die gewinnbare Energie, mit größerem erschließungs- und förder-technischem Aufwand verbunden sind. Bei EGS-Systemen werden Bohrungen in natürlich unproduktive Lagerstätte zu einer wirtschaftlichen Nutzbarkeit geführt durch Schaffung künstlicher Wegsamkeiten für flüssige Wärmeträger. Diese Reservoirie stellen den größten Teil des weltweiten tiefegeothermischen Potenzials dar. Die Nutzung von EGS wird an den meisten Standorten gegenwärtig noch durch technische und wirtschaftliche Barrieren erschwert.

Geothermische Technologie zur Nutzung der tiefen Geothermie wird durch die Zugänglichkeit zu geothermischen Lagerstätten in geologischen Strukturen im Untergrund bestimmt. Die Lernkurve der tiefen Geothermie für unkonventionelle Systeme steht noch am Anfang, geothermischer Strom ist trotz Vergütung im Rahmen des EEGs noch nicht planungssicher wirtschaftlich und auch geothermische Wärmebereitstellung erweist sich nur dann als wettbewerbsfähig, wenn das Fündigkeitsrisiko auf mehrere Projekte verteilt wird. Forschung und Entwicklung sind daher unverzichtbar.

Um eine verstärkte Geothermienutzung zu erreichen, ist in vielen Teilgebieten noch geowissenschaftliche Grundlagenforschung erforderlich. Das Verständnis der Fluid-Gestein-Wechselwirkung in Verbindung mit der Hydromechanik der Reservoirie bildet die Basis für das Ingenieurwesen zur Nutzung geothermischer Systeme, also dem Reservoirmanagement im weiten Sinne. Die Reservoircharakterisierung benötigt grundlegend neu erforschte hydraulische Methoden, beispielsweise mit dem Einsatz von Tracerverfahren. Sie erfasst geomechanische Parameter und Aussagen u. a. zum in situ Spannungsfeld zur Ermittlung der Reservoirgröße. Erkenntnisorientierte Forschung wird in Zukunft verstärkt interdisziplinär zum Beispiel in der Zusammenarbeit von Geologen und Ingenieuren stattfinden müssen.

Anwendungsorientierte Forschung muss auf sichere und effiziente Systemlösungen ausgerichtet sein. Ein ausreichend dimensioniertes „Wissenschaftlich-Technisches Geothermie-Bohrprogramm“ unter Einbeziehung aller Aspekte geothermischer Technologien wird wesentlich zum Abbau vorhandener Hemmnisse der Entwicklung bis zur Markteinführung beitragen. Die Verlässlichkeit und Effizienz dieser Technologien sollte in den nächsten Jahren mit mehreren Demonstrationsanlagen weiter vergrößert werden, um Erdwärme aus Tiefen zwischen 3.000 und 5.000 m stärker zu nutzen. Dazu gehören auch die Sicherstellung eines nachhaltigen Thermalwasserkreislaufes sowie die Optimierung der übertägigen Umwandlungstechnologien zur Bereitstellung von Strom und Kälte. Schwerpunktmäßig sollten Technologien gefördert und weiterentwickelt werden, die sich auf die Nutzung der Erdwärme in Gebieten mit normalen Untergrundtemperaturen konzentrieren, da diese weltweit



auf viele andere Standorte übertragbar und exportfähig sind.

Die Erfahrungen aus der Kohlenwasserstoff-Exploration müssen für die Exploration von EGS modifiziert werden. EGS erfordern mehr Kenntnis über Kluft- und Störungssysteme, z. B. durch geophysikalische Detailerkundung, und deren Verhalten unter besonderer Berücksichtigung der Wasserführung und des in situ Spannungsfeldes. Entwicklung von Methoden zur Erkundung des Spannungsregimes im engeren und weiteren Umfeld eines geplanten EGS-Projekts sollten mit dem Ziel durchgeführt werden, notwendige Stimulationsmaßnahmen mit Untersuchung der hydrogeomechanischen Prozesse zu optimieren und das Risiko induzierter Seismizität zu senken.

Mit innovativen Bohrtechnologien und -strategien muss eine Reduktion der Bohrkosten erreicht werden. Im Mittelpunkt stehen dabei die Erhöhung der Lebensdauer von Bohrwerkzeugen, die Reduktion von Energie- und Materialverbrauch und für EGS spezielle Komplettierungssysteme mit langer Lebensdauer und speicherschonende Aufschlussverfahren. Die Weiterentwicklung der Exploration und damit die bessere Charakterisierung der lokalen geologischen Gegebenheiten werden ebenfalls zur Minderung des Bohrrisikos und damit zur Kostensenkung beitragen. Nachhaltiges Reservoirmanagement erfordert Langzeituntersuchungen der betriebsbedingten Reservoiränderungen (hydraulische Parameter, Skinbildung, Abkühlung im Reservoirmaßstab sowie induzierte Seismizität im Langzeitbetrieb). Die wirtschaftliche Realisierbarkeit von EGS oder petrothermaler Systeme muss in den nächsten Jahren an repräsentativen Standorten (mittlere Tiefe, hohe Temperatur, geringe natürliche Reservoirproduktivität) von der Exploration bis zur Energiebereitstellung mit einer Pilotanlage ganzheitlich demonstriert werden. Das Ziel bei der Weiterentwicklung von Maßnahmen zur Reservoirstimulation ist eine nachhaltige und weitgehend planungssichere Produktivität der Lagerstätte sicherzustellen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten auf andere Standorte übertragen und dort mit Demonstrationsanlagen umgesetzt werden. Der gerade begonnene Aufbau einer Forschungsstruktur in internationalen Netzwerken muss fortgesetzt werden, und Deutschland muss seine führende Rolle in der EGS-Technologie festigen. Die Entwicklung in

dieser Forschung muss durch nachhaltig finanzierte Projekte verstetigt werden.

Die weitere Erschließung von Geo-Ressourcen bedarf aktiver Maßnahmen zur Gewährleistung der gesellschaftlichen Akzeptanz, die auch wissenschaftlich begleitet werden (siehe auch Kapitel 5.2). Durch eine frühzeitige Information und Integration aller betroffenen Akteure sollte Konflikten vorgebeugt und für den Bedarfsfall Konzepte zur konstruktiven Konfliktbewältigung entwickelt werden. Es müssen gleichermaßen Nutzungskonflikte, Risikobewertung und -management sowie Kriterien und Verfahren zum Interessenausgleich im Fall spezifisch belasteter Regionen behandelt werden.

Durch die breite Etablierung der Nutzung geothermischer Energie sowohl im Wärme-/Kälte- als auch im Strommarkt wird verstärkt krisensichere heimische Energie nachhaltig und umweltfreundlich verfügbar und ersetzt teure und unsichere Importe fossiler Energieträger. Der Ausbau der Geothermie führt zu positiven Effekten in der Bohr-Serviceindustrie mit neuen Arbeitsplätzen und nutzt den Anlagenbetreibern mit planungssicheren Energieangeboten. Die Qualifizierung geothermischer Systemkomponenten macht forschungsnahe Industrie attraktiv für den Export, wie es weltweite Anfragen derzeit schon anzeigen.

2.5.2 Forschungsfelder

2.5.2.1 Grundlagenforschung

- Verständnis der Fluid-Gestein-Wechselwirkung in geothermischen Systemen
- Hydromechanik geothermischer Reservoirs

2.5.2.2 Angewandte Forschung

Erdgekoppelte Wärmepumpensysteme zur Nutzung oberflächennaher Geothermie

Siehe auch Kapitel 3.1.

- Steigerung der Jahresarbeitszahl der erdgekoppelten Wärmepumpensysteme
- Entwicklung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei Standorterkundung, erschließung und Überwachung
- Entwicklung von angepassten Systemen zur Erschließung von Bestandsbauten und Gebäudesanierung

Wärme- und Kältespeicherung

Siehe auch Kapitel 2.5.

- Entwicklung von Systemen für verschiedene geologische Umgebungen
- Entwicklung von Konzepten zur optimierten Integration in Energieversorgungssysteme

Tiefe Geothermie

- Entwicklung einer integrierten geologisch/geophysikalisch basierten Erkundungsstrategie
- Entwicklung von Reservoirtechnologien für Enhanced Geothermal Systems EGS
- Konkurrierende Nutzung tiefer Lagerstätten
- Adaptierte Bohrtechnologien für Geothermialagerstätten

- Vermeidungskonzepte für induzierte seismische Ereignisse beim Aufbau und Betrieb geothermischer Anlagen
- Effiziente Systemkomponenten für einen verlässlichen Langzeitbetrieb
- Optimierung der obertägigen Umwandlungstechnologien

2.5.3 Sonstige F&E-Aufgabenstellungen

In wissenschaftlicher Begleitforschung sind Konzepte für die Risikokommunikation, Risikowahrnehmung sowie zur Akzeptanzgewinnung beim Aufbau und Betrieb von geothermischen Anlagen zu entwickeln (siehe auch Kapitel 6.2).

2.6 Windenergie

Die Windenergienutzung hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten sehr dynamisch entwickelt. Heute hat die Windenergie den größten Anteil an der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien in Deutschland. In den Energiekonzepten für die Zukunft kommt ihr eine führende Rolle in der Stromerzeugung zu.

Mit der positiven Marktentwicklung wurden auch die Technologien zur Windenergienutzung stark weiterentwickelt. Diese Entwicklungsdynamik muss fortgesetzt und intensiviert werden, um die großen Windpotenziale nutzbar machen zu können. Dabei ist neben der Technik der Windenergieanlagen (WEA) auch die Standortanalyse und Energiemeteorologie von großer Bedeutung. Bei Onshore-Standorten geht es dabei um Repoweringkonzepte in komplexen Umgebungen, bei denen sich die Standortanalyse und Energiemeteorologie auf die Bestimmung von Windverhältnissen konzentriert. Bei Offshore-Standorten in tiefem Wasser kommen zusätzlich die See-, Wellen- und Baugrundverhältnissen als wichtiges Arbeitsfeld hinzu. Dabei sind innovative und an die Anforderungen der Windindustrie angepasste Mess- und Analysemethoden für Windprofile und Strömungsverhältnisse von großer Bedeutung.

Europa hat bei der Windenergienutzung lange Zeit eine Vorreiterrolle eingenommen. Die dabei gesammelten Erfahrungen müssen jetzt genutzt werden, um sich im weltweit zunehmend schärferen Wettbewerb behaupten zu können. Hierzu sind vor allem neue Technologien zur Effizienzsteigerung, Kostenreduzierung und Erhöhung der Zuverlässigkeit zu entwickeln. Die Stärke der internationalen Konkurrenz wird an der wichtigen Kennzahl der Turmkopfmasse der Windenergieanlagen bezogen auf ihren Rotordurchmesser oder ihre Nennleistung deutlich. Die traditionellen europäischen Getriebeanlagen lagen 2002 bei den Anlagenkosten bezogen auf die Turmkopfmasse vorwiegend im Bereich zwischen 15 bis 20 €/kg, eine moderne chinesische getriebe lose Anlage mit einer permanentmagnetischen Erregung liegt heute dagegen schon bei 8 €/kg.

Ein anderes aktuelles Thema ist die systematische Reduzierung der mechanischen Beanspruchungen der WEA, die weitere Gewichtseinsparungen und eine Erhöhung der Lebensdauer und Verfügbarkeit ermöglicht. Technische Ansätze hierzu finden sich in der Entwicklung neuer Rotorblätter und Regelkonzepte. Für Offshore-WEA ergeben sich Einsparungen durch leichtere Tragstrukturen und Gründungen aufgrund verbesserter Antriebe, Rotoren und Anlagenregelungen. Innovationen



sind bei neuen Regelungs- und Betriebsführungskonzepten, gekoppelten aerodynamisch-aeroelastischen Optimierungen, Lärminderungs-technologien, neuen Generatoren und einer verbesserten Leistungselektronik zu erwarten.

Es gibt vielfältige Ansätze, mit neuen Methoden und Technologien die Wirtschaftlichkeit und Qualität der WEA weiter zu erhöhen. In den technologischen Entwicklungen ist im Sinne einer integrierten Produktentwicklung immer auch der gesamte Lebensdauerzyklus zu betrachten, um unter ganzheitlicher Betrachtung die optimalen

Resultate zu erzielen. Dabei sind die Material-Verfügbarkeit z. B. für die seltenen Erden für Dauermagnete genauso zu berücksichtigen wie Transport und Logistik in der Lieferung und bei der (Offshore-)Anlagenerrichtung, die Automatisierung und Qualität in der Fertigung, das Testen von Materialien, Komponenten und Anlagen sowie der Rückbau und das Recycling der Anlagen. All diese Aspekte sind wichtige Erfolgsfaktoren und bedürfen weitergehender Forschungsanstrengungen, nicht zuletzt um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Hersteller zu erhalten.

2.6.1 Forschungsbedarf Windenergie allgemein

Zielsetzungen

- Reduzierung des Gewichts und der leistungsspezifischen Herstellungskosten der Windenergieanlagen (WEA)
- Erhöhte Effizienz, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der WEA
- Innovative Logistik für Transport und Errichtung in schwierigen, wetterabhängigen Umgebungen
- Leistungserhöhung der WEA durch sehr große Nabenhöhen
- Verfügbarkeit ausgereifter kleiner WEA

Forschungsthemen

- Untersuchung und Einsatz neuer Materialien in WEA
- Entwicklung neuer Konzepte für robuste Antriebsstränge und Generatoren, innovatives Rotordesign
- Verbesserung der Eigenschaften bzgl. der Aerodynamik und Aeroakustik von WEA
- Entwicklung und Einführung innovativer Konzepte für kleine, mittlere und sehr große WEA
- Entwicklung neuer Test- und Untersuchungsverfahren für WEA unter Berücksichtigung der realen Lasten und Umweltbedingungen

- Zuverlässigkeitsorientierte Wartungs- und Instandhaltungsstrategien
- Optimierte Fertigungsprozesse in der Rotorblattfertigung
- Entwicklung von Werkzeugen für eine gesteigerte Verfügbarkeit von WEA
- Entwicklung neuer Regelungs-, Betriebsführungs- und Überwachungskonzepte, insbesondere für den lastreduzierenden beziehungsweise lastbegrenzenden sowie ertragssteigernden Betrieb von WEA
- Entwicklung und Validierung eines nationalen Simulationscodes für Aerodynamik, Aeroelastik und Aeroakustik von WEA für eine „Digitale WEA“
- Entwicklung eines vereinfachten Zertifizierungsverfahrens zur Qualitätssicherung kleiner WEA
- Verbesserte Erkundung, Erfassung und Bewertung standortspezifischer Windbedingungen
- Entwicklung von Rückbau- und Recycling-Konzepten

Übersicht Forschungsbedarf

Der kontinuierliche Ausbau der Windenergienutzung in den letzten 20 Jahren ermöglichte den Herstellern erhebliche Weiterentwicklungen der Anlagentechnik. Bei der Anlagengröße wurden regelmäßig neue Dimensionen erreicht. In den letzten Jahren entwickelt sich das elektromechanische Triebstrang- und Regelungskonzept deutlich in Richtung Drehzahlvariabilität und Rotorblattverstellung. Bei der Wahl der Generatorbauart überwiegt in den letzten Jahren der Einsatz von Synchrongeneratoren. Der doppelt gespeiste Asynchronmotor wurde in der jüngeren Vergangenheit zwar verstärkt angeboten, scheint sich jedoch nicht durchzusetzen.

Seit einigen Jahren setzen Anlagenhersteller auf die Entwicklung getriebeloser Antriebsstränge mit Permanentmagnet-Synchrongeneratoren. In diesen Anlagen wird das Magnetfeld durch Hochleistungspermanentmagnete erzeugt. Es lassen sich dabei deutliche Gewichtsvorteile erzielen, da einerseits die Komponenten zur elektrischen Felderregung und andererseits die Getriebe entfallen. Eine äußerst interessante Entwicklung ist der Einsatz von supraleitenden getriebelosen Generatoren, in denen das Magnetfeld mit Hilfe supraleitender Spulen im Rotor erzeugt wird. Solche Generatoren sollen mechanisch so einfach wie Permanentmagnet-Generatoren sein und gleichzeitig sehr starke magnetische Felder erzeugen können. Abschätzungen zeigen insgesamt Gewichts- und Größenvorteile für Multimegawatt-WEA, wobei die Technologie sich heute im Versuchs- und Prototypenstadium befindet und eine hohe technische Zuverlässigkeit noch bewiesen werden muss.

Zur Reduktion der mechanischen Beanspruchungen von WEA sind neue Rotoren und Anlagenregelungen zu entwickeln. Die in den letzten Jahren weitgehend eingeführte Einzelblattverstellung erlaubt eine aktive Lastenreduktion z. B. der zyklischen Nick- und Giermomente. Entstehende Eigenschwingungen können durch eine kontrollierte Erzeugung aerodynamischer Kräfte gedämpft werden. Bei weiter wachsenden Blattlängen ist es wünschenswert, auf Rotorblätter einwirkende Windkräfte auch entlang der Blattlänge individuell einstellen zu können. Hierzu sind zum Beispiel neue Sensor- und Regelungsverfahren in Kombination mit piezoelektrisch verstellbaren Hinterkanten zu entwickeln. Konzepte zur Einstel-

lung der Aerodynamik der Rotorblätter entlang der Längsachse mit Hilfe einer passiven, aeroelastischen Verwindung des Blattes, die durch die Windlasten direkt induziert wird sind im Betrieb einfacher und mit deutlich weniger Wartungsaufwand verbunden.

Bei der Forschung und Entwicklung der Windenergienutzung wurden auf den Gebieten Anlagentechnik, Standortanalyse, Energiemeteorologie, Regelung, Betriebsführung und Netzeinbindung Fortschritte erzielt. Bei der Anlagentechnik stehen die Kostenreduktion durch verbesserte Konzepte und dem Einsatz neuer Materialien und Verbundwerkstoffe sowie die Erhöhung des aerodynamischen Wirkungsgrads von Anlagen und Windparks bei minimaler Schallemission im Mittelpunkt. Die Standortanalyse und Energiemeteorologie konzentriert sich auf die Bestimmung von Potenzialen und Windverhältnissen in komplexen Umgebungen (Wald, Offshore) und die kurz- bis mittelfristige Vorhersage der Einspeisung. Neue Regelungs- und Betriebsführungskonzepte haben das Ziel, die Effizienz zu steigern und gleichzeitig die Lebensdauer der Anlagen und Komponenten zu erhöhen. Die Arbeiten zur Netzeinbindung konzentrieren sich auf die Bereitstellung von Systemdienstleistungen und die Erlangung von Kraftwerkseigenschaften.

Die Windenergie wird langfristig in Deutschland und weltweit ein Hauptpfeiler der Stromversorgung sein. Sie ist technologisch und bezüglich der Stromgestehungskosten bereits weit entwickelt und weitere Fortschritte sind abzusehen. Durch die zu erwartenden Technologieentwicklungen und die Erschließung neuer Standorte erhöhen sich die attraktiven Windpotenziale für Deutschland und führen zu einer weiteren Reduktion der Stromgestehungskosten. Damit der Ausbau der Windenergienutzung an Land und auf See nicht ins Stocken gerät ist ein nachhaltiger Netzausbau unabdingbar. Weiter ist für die Nutzung im Binnenland die Bewertung und Erschließung neuer Standorte dringend erforderlich.



2.6.2 Forschungsfelder Windenergie allgemein

Produktion, Logistik, Infrastruktur

Für die Fertigung, die Errichtung und für den Betrieb der Windenergieanlagen sind weitere Innovationsschritte zur Senkung der Stromgestehungskosten erforderlich. Bis 2020 soll die automatisierte und qualitätsgesicherte Faserverbundfertigung für eine Kostenreduktion in der Rotorblattfertigung sorgen.

Weiterentwicklung der Anlagentechnik

Bis 2020 sollen neue Konzepte für ein funktionsintegrierendes Design einer neuen Generation von Rotorblättern entwickelt werden. Dazu gehören eine hochgenaue Vorhersage der Leistung und Geräuschemission von WEA und Windparks und deren kompletter Entwurf und Optimierung am Rechner sowie die quelseitige Lärmminde- rung um 3–5 dB(A) bezogen auf die aktuelle Technologie.

Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Die Betriebskosten und die Erträge werden immer wieder durch Schäden und Ausfälle von Bauteilen und Komponenten negativ beeinflusst. Hier ist eine systematische Verbesserung der Zuverlässigkeit durch Überwachung, intelligente Wartung und Instandhaltung erforderlich.

Untersuchungen zur Wind-Klimatologie und Umgebungsbedingungen

Zur Erschließung neuer Potenziale für die Windenergienutzung an Land ist es erforderlich, die Windverhältnisse in komplexem Gelände, Waldgebieten und für große Höhen zu analysieren und zu bewerten.

Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung

Für die Senkung der Kosten und die Steigerung von Effizienz, Ertrag und Lebensdauer ist die Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung von besonderer Bedeutung.

2.6.2.1 Grundlagenforschung

Produktion, Logistik, Infrastruktur

- Entwicklung robotischer Fertigungstechniken in der Faserverbundtechnologie zur Qualitätssteigerung und Automatisierung
- Entwicklung von Konzepten zu Rückbau und Recycling

Weiterentwicklung der Anlagentechnik, neue Materialien

- Entwicklung neuer Konzepte für ein funktionsintegrierendes Design einer neuen Generation von WEA-Rotorblättern inklusive Entwicklung von Simulationsmodellen zur Vorhersage von Leistung und Ertrag von entsprechenden WEA und Windparks
- Mehrdimensionale Optimierung aerodynamischer Profile für hohe mechanische Tragfähigkeit, hohe aerodynamische Effizienz, geringe Empfindlichkeit gegenüber Störungen (Erosion, Verschmutzung, etc.) und Geräuschreduktion
- Entwicklung einer Entwurfsmethodik für aerodynamisch robuste WEA
- Entwicklung neuer Antriebsstränge und Generatoren mit geringerer technischer Anfälligkeit und geringerer Turmkopfmass mit neuen Lagerkonzepten und Generatoren, die die von Rotor, Turm und elektrischem Anschluss einwirkenden Lasten und Wechselwirkungen intelligent aufnehmen
- Untersuchung und Einsatz neuer Materialien und Verbundwerkstoffe, funktionsintegrierender Leichtbau mit polymeren Verbundwerkstoffen (Lastminderung durch Formvariabilität durch strukturintegrierte Aktorik und Sensorik, Vereisungsschutz, Lastüberwachung, Auslegungsverfahren)
- Entwicklung von Simulationsmodellen für statische, aeroelastische Verformungen und Flutterinstabilitäten inklusive des sogenannten Whirflatterns, Ermittlung der Antwort auf zwangserregte Schwingungen
- Kostenreduktion durch Standardisierung und Automatisierung in der WEA-Fertigung
- Neue, standardisierte Prüfmetho- den für Rotorblätter und Antriebsstrang zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und schnelleren Produktfreigabe
- Entwicklung von CMS (Condition Monitoring Systems)- und NDT (Non-Destructive Testing)-Verfahren für Windenergieanlagen und ihre Komponenten wie z. B. Rotorblätter

- Entwicklung neuer, auf höhere Zuverlässigkeit ausgelegter Komponenten und Anlagenkonzepte
- Anlagenkonzepte für komplexes Gelände und extreme Witterungsverhältnisse

Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Die Betriebskosten und die Erträge werden immer wieder durch Schäden an und Ausfälle durch Bauteile und Komponenten negativ beeinflusst. Hier ist eine systematische Verbesserung der Zuverlässigkeit durch Überwachung sowie intelligente Wartung und Instandhaltung erforderlich.

- Entwicklung neuer Verfahren zur Bewertung der WEA und ihrer Komponenten
- Entwicklung von geeigneten Methoden zur Zustandserfassung für alle kritischen Komponenten
- Ermittlung von Stressfaktoren und Lebensdauermerkmalen
- Entwicklung von Konzepten und Lösungen für eine systematische und elektronisch unterstützte Datenerfassung und -aufbereitung aller relevanten Betriebsdaten als Grundlage für die Implementierung von standardisierten und weitgehend automatisierten Prozessabläufen
- Reduktion der Lasten mit Hilfe von neuen Werkstoffen und Konstruktionen, z. B. Leichtbauweise
- Einsatz neuer Methoden gegen Verschmutzung und Vereisung, z. B. Nanotechnologie
- Analyse der besonderen Bedingungen hinsichtlich der Logistik (Personal, Werkzeuge und Hilfsmittel, Ersatzteile) bei der Instandhaltung im normalen Betrieb und Entwicklung von Konzepten zur Optimierung
- Entwicklung von Maßnahmen zur Verringerung der Ausfallzeiten aufgrund Nicht-Erreichbarkeit von Offshore-Standorten durch hohen Seegang und andere Umgebungsbedingungen, z. B. durch verbesserte Anlandungssysteme und bessere Vorhersage von Wellenhöhen

Untersuchungen zur Wind-Klimatologie und Umgebungsbedingungen

- Entwicklung von Methoden zur Standortplanung unter Berücksichtigung des raumzeitlichen Verhaltens der Windenergie zur verbesserten Integration in die Energieversorgung und zur Erschließung neuer Potenziale für die Windenergienutzung an Land.

Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung

Für die Effizienzsteigerung (Kostensenkung und Ertragssteigerung) und die Erhöhung der Lebensdauer ist die Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung von besonderer Bedeutung.

- Strömungstechnische Analyse in und um große Windparks zur verbesserten Windparkregelung
- Optimierung der aerodynamischen Leistungsausbeute von Windparks, Entwicklung eines effizienten Ersatzmodells, welches nach Eingabe der Windrichtung und Windstärke dem Betreiber die Einstellungen der Windenergieanlage für einen optimalen Gesamtertrag angibt

2.6.2.2 Vorlaufforschung

Weiterentwicklung der Anlagentechnik

- Kombination von experimentellen Komponentenprüfständen und numerischer Echtzeitsimulation der Anlagendynamik sowie Übertragung von „Hardware in the Loop“- und „Iron bird“-Verfahren aus dem Flugzeugbau auf die WEA-Technologie
- Entwicklung eines funktionsintegrierenden Leichtbaus mit polymeren Verbundwerkstoffen (Vereisungsschutz, Lastüberwachung, Auslegungsverfahren, Ermüdung bei hohen Lastspielzahlen)
- „Digitale WEA“: Entwicklung eines nationalen Simulationscodes für Aerodynamik, Aeroelastik und Aeroakustik von WEA und Kopplung mit anderen Simulationsumgebungen wie CFD, CSM und CAA, Berechnung einzelner WEA und kompletter Windparks
- Entwicklung einer Entwurfsmethodik für Rotorblätter mit hohem Anteil an Laminarströmung und Gesamttrotoren inklusive des Rotorabennahbereichs zur Leistungssteigerung



- Entwicklung von Simulationsmodellen für die statische, aeroelastische Verformung und Flatterinstabilitäten inklusive des Whirlflatterns, Ermittlung der Antwort auf zwangs-erregte Schwingungen
- Entwicklung aeroakustischer Lärmminde- rungstechnologien für WEA inklusive der Untersuchung ihrer Einflüsse auf die aero dynamische Leistung
- Weiterentwicklung der Technologie kleiner WEA und Schaffung vereinfachter Zertifizie- rungsverfahren zur Qualitätssicherung
- Methoden zur Vorhersage verschiedener Vereisungsformen und Erarbeitung wirksamer Konzepte gegen Eisbildung am Rotor
- Erarbeitung eines Profilkatalogs für Rotorblät- ter (Kennfeld für aerodynamische Leistung und Geräusche) zur systematischen Charakterisierung
- Entwicklung und Einsatz neuer Generator- konzepte, z. B. Hochspannungs-, permanent und supraleitend erregte Generatoren
- Weiterentwicklung und Einsatz moderner Leistungselektronik

Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

- Ermittlung und Bewertung von Betriebsbedin- gungen und -lasten
- Aufbau einer umfassenden, treuhänderisch verwalteten Schadensdatenbank als Basis für die Entwicklung von Werkzeugen zur Erhöhung der Verfügbarkeit von WEA und Komponenten
- Messungen und Tests zur Betriebsfestigkeit von Komponenten und Sensoren
- Untersuchung der mechanischen, elektrischen und sonstiger durch Umwelteinflüsse wie Wärme, Kälte, Eis, salzhaltiges Wasser und Luft auftretende Lasten hinsichtlich ihrer Auswir- kungen auf das Festigkeitsverhalten von Werk- stoffen, Bauteilen und deren Verbindungen
- Verbesserung von Methoden zur Fehlerfrüher- kennung und Restnutzungsdauerprognose
- Entwicklung angepasster und intelligenter Sensorsysteme zur Anlagenüberwachung
- Einsatz von Diagnosesystemen und statisti- schen Analyseverfahren als Frühwarnsysteme
- Entwicklung von intelligenten Logistik- und Wartungskonzepten durch eine nachhaltige Verknüpfung von maritimem Know-how mit Windenergie-Technik

Untersuchungen zur Wind-Klimatologie und Umgebungsbedingungen

- Entwicklung von Methoden zur verlässlichen Ressourcenbestimmung und Potenzialab- schätzung zur Windenergienutzung an neuen Standorten wie z. B. im Wald und komplexem Gelände, auf großen Höhen und Offshore
- Analyse von Windverhältnissen in komplexem Gelände für sehr große Nabenhöhen z. B. in Bezug auf Turbulenzen, Böen und Schwan- kungen

Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung

- Untersuchung neuer aerodynamischer Stell- glieder zur lastbegrenzenden Regelung von Windenergieanlagen
- Entwicklung innovativer multidimensionaler Verfahren zur Windparkregelung
- Weiterentwicklung von lastreduzierenden, lastbegrenzenden und ertragssteigernden Regelungs- und Betriebsführungsverfahren für WEA und Windparks
- Entwicklung von Fehlerfrüherkennung, zustands- und zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung
- Einsatz moderner, standardisierter Informations- und Kommunikationssysteme zur Einbindung und Betriebsführung
- Entwicklung von Konzepten zur Reaktion auf Netzwechselwirkungen und Bereitstellung von Systemdienstleistungen
- Entwicklung von Instrumenten zur präzisen Windleistungsprognose für kurz-, mittel- und langfristige Zeithorizonte, zur Energieertrags- prognose und zur Bestimmung von Auslegungswindverhältnissen

2.6.2.3 Angewandte Forschung

Produktion von Rotorblättern

- Erprobung automatisierter Fertigungstechni- ken durch robotische Faserablage für neue Bauweisen und Fertigungsmethoden
- Entwicklung einer integrierten Qualitätsüber- wachung und „lernende Faserverbundprozes- sierung“ zur Fehlervermeidung

Weiterentwicklung der Anlagentechnik

- Erprobung von Lärminderungstechnologien an konkreten WEA und deren Bewertung
- Aerodynamischer Entwurf und Optimierung von Rotorblättern unter Verwendung der

numerischen Simulationsverfahren inklusive Berücksichtigung der Struktur und der Schallabstrahlung

Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

- Optimierung von Instandhaltungsstrategien mit RAMS/LCC-Methoden
- Kopplung einer zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung mit zustandsorientierten Methoden für eine durchgehende Prozessoptimierung
- Untersuchung besonderer Schäden unter Offshore-Bedingungen wie z. B. durch hohe Windgeschwindigkeiten, hohe Feuchtigkeit, korrosive Medien, Strömung und Seegang und Blitzschlag
- Optimierung des Zuverlässigkeitsverhaltens von WEA und deren Komponenten sowie Auswirkung auf Verfügbarkeit durch den Einsatz innovativer Konzepte und Materialien sowie durch angepasste Schutzmechanismen wie z. B. hermetische Kapselung

2.6.2.4 Sonstige Forschungsaufgaben

Monitoring der technischen Entwicklung

Untersuchungen zu technischen, ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Aspekten beziehungsweise Perspektiven der nationalen und internationalen Windenergienutzung.

Netzintegration

Insbesondere die Netzintegration der Windenergie, der Netzausbau in Deutschland und Europa und die koordinierte Standortplanung sind intensiver zu erforschen und entsprechende Konzepte zu entwickeln, da sie die Voraussetzung für einen weiteren Ausbau der Windenergie darstellen (siehe auch Kapitel 3.1).

2.6.3 Forschungsbedarf Offshore-Windenergie

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Global wettbewerbsfähige WEA mit Leistungen von 10–20 MW für den Offshore-Einsatz
- Prototypennachweis von innovativen Anlagenkonzepten jenseits der klassischen Horizontalanlage
- Erhöhte Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Offshore-WEA
- Standardisierte Tragstrukturen für Offshore-WEA wie Tripods, Quadpods, Jackets und Gravitationsfundamente
- Verfügbarkeit schwimmender Strukturen mit geschlossenen Plattformen oder aufgelösten Schwimmkörpern

Forschungsthemen

- Entwicklung und Tests neuer Offshore-Tragstrukturen für unterschiedliche Wassertiefen
- Verfahren zur Untersuchung und Verifizierung von Offshore-WEA einschließlich flexibler, schnell erschließbarer Offshore-Teststandorte und einer Laborinfrastruktur für Offshore-Tests
- Weiterentwicklung und Optimierung der in den ersten kommerziellen Offshore-Windparks eingesetzten Technologie und Logistik
- Netzanbindung von Offshore-Windparks und Integration ins Stromversorgungssystem

Die Erschließung und Etablierung der Offshore-Windenergie stellt derzeit die größte Herausforderung bei der Windenergienutzung dar. Die Nutzung der Windenergie unter diesen Bedingungen ist eine enorme Belastung für Technik und Betriebsführung, da in Deutschland neue Dimensionen bei der Meerestiefe und der Entfernung zur Küste eröffnet werden. Die zugehörigen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten umfassen dabei fast alle Bereiche der Windenergienutzung.

Für Planung, Wirtschaftlichkeit und Risikobewertung von Windparks sind die Umweltbedingungen am geplanten Standort von hoher Bedeutung. Für Offshore-Windparks ist hierzu bislang wenig Erfahrung vorhanden. Es sind neue Methoden zu entwickeln, um schneller die relevanten Umweltbedingungen zu ermitteln und zu bewerten. Die Vermessung von Windgeschwindigkeiten in den Höhen der WEA ist an Offshore-Standorten bisher extrem aufwändig, da die Errichtung von Mess-



masten oder Plattformen eine Voraussetzung für den Einsatz von lasergestützten Systemen ist. Zukünftig sollen die Messungen erheblich einfacher und kostengünstiger vom Schiff aus durchgeführt werden. Für die Umströmung von Tragstrukturen sind Messsysteme zu entwickeln, die die Strömung hoch aufgelöst und zweidimensional erfassen und so eine deutlich verbesserte Bestimmung der auf die Anlagen einwirkenden Kräfte liefern können.

Genauere Kenntnisse über die Beschaffenheit des Meeresgrundes sind notwendig, um die optimale Tragstruktur zu ermitteln und die Wechselwirkung der Anlage mit dem Baugrund bezüglich Tragfähigkeit und Dauerfestigkeit abschätzen zu können. In-situ Beprobungen des Meeresbodens und dreidimensionale Bodenmodelle sind hierzu notwendig. Mit dem weiteren Ausbau der Offshore-Windenergie wird die Erschließung von Standorten immer wichtiger, die mit auf dem Meeresgrund fest verankerten Tragstrukturen nicht realisierbar sind. Hierzu werden zunehmend schwimmende WEA in Betracht gezogen, wovon es bis heute nur wenige Prototypen gibt.

Für alle Entwicklungen ist die genaue Kenntnis der durch Wind und Meer auf die Offshore-WEA einwirkenden Lasten eine wichtige Voraussetzung, ebenso wie ihre Wechselwirkungen mit dem Baugrund und dem elektrischen Netz. Sie ermöglicht eine Modellierung und Bewertung der gesamten WEA-Dynamik, die für eine integrierte Betrachtung und Zusammenführung aller Entwicklungen unerlässlich ist.

Die Bewertung des Verhaltens von Offshore-WEA muss aufgrund dynamischer Wechselwirkungen und signifikanter Nichtlinearitäten der verschiedenen Teilsysteme einer WEA wie Rotorblätter, Antriebsstrang, Tragstruktur und Regelung in einem numerischen Modell erfolgen. Dabei handelt es sich um aero-servo-hydro-elastische oder auch voll gekoppelte Simulationen. Für Offshore-WEA besonders wichtig ist eine detaillierte Abbildung der Tragstrukturen und eine Berücksichtigung der Meereswellen und -strömungen sowie gegebenenfalls von Eisgang. Zu den progressiven Ansätzen der voll gekoppelten Simulation gehört eine durchgängig objektorientierte Implementierung des physikalischen WEA-Systems und eine in großem Maßstab erstmals eingesetzte Technik der Modellstrukturdynamik. Darunter ist die Möglichkeit zu

verstehen, den Detaillierungsgrad der Abbildung von Modellkomponenten während der Laufzeit der Simulation zu ändern.

2.6.4 Forschungsfelder Offshore-Windenergie

2.6.4.1 Grundlagenforschung

Spezielle Herausforderungen für die Offshore-Nutzung

- Entwicklung integrierter Methoden der Gesamtanlagenbewertung mit numerischer Simulation und experimenteller Verifikation
- Entwicklung von Methoden zur Bewertung von Umwelteinflüssen auf die aerodynamische Leistungsfähigkeit von Offshore-WEA, z. B. Erosionsverhalten
- Entwicklung und Einsatz von standardisierten und wettbewerbsfähigen Tragstrukturen und Gründungskonzepten für Offshore-WEA wie Tripods, Quadpods, Jackets und Gravitationsfundamente in unterschiedlichen Wassertiefen sowie von schwimmenden Strukturen mit geschlossenen Plattformen oder aufgelösten Schwimmkörpern unter Berücksichtigung der gesamten Fertigungskette und der Offshore-Installation
- Entwurfsmethodik für den aerodynamisch robusten Offshore-WEA-Entwurf zur Vermeidung von Leistungsverlusten bei Oberflächen-degradation und Vereisung
- Entwicklung von Modellen zur Abschätzung der Verluste durch Wechselwirkung mit der atmosphärischen Grenzschicht und zu Auswirkungen auf das lokale und regionale Klima beim großflächigen Einsatz von Offshore-Windparks

2.6.4.2 Vorlaufforschung

- Konzeption und Prototypennachweis von innovativen Anlagenkonzepten über die klassische Horizontalanlage hinaus
- Entwicklung von innovativen Messmethoden speziell für den Offshore-Einsatz zur Standortbewertung und Bestimmung von Designparametern
- Entwicklung von Lebensdauermodellen, modernen Monitoringsystemen, zerstörungsfreien Prüfmethode, zuverlässigkeitsorientierter Wartungs- und Instandhaltungsstrategien und innovativen Wartungs- und Zugangskonzepten zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und

Verfügbarkeit von Offshore-WEA und deren Komponenten

- Neue Transport- und Montagekonzepte für Tragstrukturen und Rotorblätter

2.6.4.3 Angewandte Forschung

- Weiterentwicklung und Optimierung der in den ersten kommerziellen Offshore-Windparks eingesetzten Technologie und Logistik durch technologiespezifische und übergreifende vergleichende Forschungsprojekte mit dem Ziel der Kostenreduktion von Offshore-Windstrom
- Entwicklung von Verfahren zur Untersuchung und Verifizierung von Offshore-WEA ein-

schließlich flexibler, schnell erschließbarer Offshore-Teststandorte und einer Laborinfrastruktur für Offshore-Tests

- Aufbau einer detaillierten Fehlerdatenbank für Offshore-WEA
- Methoden zur Standortbewertung bezüglich Wind, Meer und Meeresgrund, Evaluierung der Wind- und Wellencharakteristik für Offshore-Anwendungen
- Entwicklung von Modellen zur Berechnung der Ertragsverluste durch Abschattungen in großen Offshore-Windparks und der Windparks untereinander

2.7 Meeresenergie

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Hohe Verfügbarkeit
- Reduzierte Investitionskosten
- Geringer Wartungsbedarf

Forschungsthemen

- Untersuchung und Einsatz neuer Materialien und Werkstoffe, angepasste Generatoren und Leistungselektronik, innovative Regelungsverfahren und effizientere Anlagenkonzepte
- Entwicklung kostengünstiger Installations- und Gründungstechniken

- Neue Messmethoden, Energieertragsprognosen und Methoden zur Technologieevaluierung zur Identifizierung und Charakterisierung von geeigneten Standorten
- Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung
- Untersuchungen zu technischen, ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Aspekten und Perspektiven der Meeresenergienutzung auch in Kombination mit der Offshore-Windenergienutzung
- Anlagenkonzepte und geeignete Komponenten für die Nutzung der Osmose zur Stromerzeugung an Flussmündungen

Die Meeresenergie in Form von Tidenhub, Wellen und Gezeitenströmungen aber auch aus Gradienten von Temperatur (OTEC) oder Salzgehalt (Osmosekraftwerk) hat nach Einschätzung der European Ocean Energy Association (EUOEA) das Potenzial, bis zu 15 % des europäischen Strombedarfs zu decken. Hierzu muss die Anlagentechnik der Wellen- und Gezeitenenergiewandler jedoch noch wesentlich weiter entwickelt und insbesondere noch erhebliche Verbesserungen bei der technischen Verfügbarkeit erzielt sowie die Kostenreduktionspotenziale ausgeschöpft werden.

Die Meeresenergie-Technologie stellt ein großes Exportpotenzial für Komponenten aus dem Bereich der Antriebstechnik und dem Anlagenbau dar und bietet für die maritime Technik und Logistik sowie im Wasserbau neue Märkte. Führende deutsche Industrieunternehmen haben damit begonnen, Komponenten und Anlagen für Projekte in Europa und weltweit zu entwickeln. Derzeit fehlt allerdings die strategisch ausgerichtete Förderung von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, um die Position Deutschlands im Bereich Meeresenergietechnologien nachhaltig zu



stärken und damit den Exportmarkt für die Meeresenergietechnik zu erschließen.

Mit deutlich über 100 Anlagenkonzepten in der Entwicklung weltweit tragen die Hersteller von Komponenten und Anlagen bei den zur Zeit noch sehr geringen Stückzahlen und zugleich hohen technischen Anforderungen erhebliche Entwicklungskosten und -risiken, insbesondere weil die Gewinnertechnologien noch nicht sicher zu identifizieren sind. Um das Entwicklungsrisiko der neuen Technologie zu reduzieren, sollten neben der nationalen Forschung auch die internationale Zusammenarbeit gefördert werden, z. B. durch EU-Instrumente mit nationaler Finanzierung und strategische Partnerschaften mit Staaten oder Regionen.

Im Hinblick auf eine effektive Erschließung von Exportmärkten sollten Pilotprojekte in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone gefördert und potenzielle Synergien mit Offshore-Windparks gesucht werden. Der Zugang zu nationalen und internationalen Forschungs- und Testinfrastrukturen ist dazu erforderlich. Industrie und Wissenschaft sind zu allen Themenfeldern entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu vernetzen. Hierfür bietet sich neben den Netzwerken der industriellen Gemeinschaftsforschung auch eine Clusterbildung an. Besonderer Wert sollte auf die Vernetzung mit der Werft- und Offshore-Industrie, vor allem aber auch mit der Industrie aus den Bereichen Antriebstechnik und Windenergie gelegt werden.

Um die Rolle Deutschlands im Bereich Meeresenergie nachhaltig zu stärken, bedarf es auch spezieller Ausbildungs- und Qualifizierungsprogramme mit neuen, beziehungsweise angepassten Berufsbildern und Studiengängen.

2.7.1 Forschungsfelder

Um Meeresenergietechnologien in den kommenden Jahren marktgerecht zu entwickeln, besteht vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Dabei stellt die Anpassung der Anlagen und Konzepte an die besonderen Umweltbedingungen auf See sowie an die sehr stark schwankenden mechanischen Lasten der Wellenenergie eine große Herausforderung dar.

2.7.1.1 Grundlagenforschung

- Untersuchung, Optimierung und Einsatz neuer Materialien unter besonderer Berücksichtigung von Korrosionsschutz, Last- und Dimensionierungsfragen, Berechnungswerkzeugen, Komponentenentwicklung sowie Tests
- Entwicklung von Anlagenkonzepten und geeigneten Komponenten wie z. B. Membranen mit hohen Durchlassgraden und Wasserturbinen für die Nutzung der Osmose zur Stromerzeugung an Flussmündungen

2.7.1.2 Vorlaufforschung

- Entwicklung von Instrumenten zur Standortwahl und Anlagendimensionierung im Hinblick auf Wind und Wellenklima und deren zukünftiger Entwicklung, geologische Beschaffenheit des Untergrundes sowie Umweltverträglichkeit von Anlagen
- Entwicklung von Sensorik und Datenübertragung für den maritimen Langzeiteinsatz
- Optimierung der Installationslogistik und Demontage, z. B. durch Nutzung von Robotik und intelligenten Systemen

2.7.1.3 Angewandte Forschung

- Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung: Design, Regelung und Betriebsführung von Anlagenparks, Fehlerfrüherkennung und zustandsorientierte Instandhaltung, Informations- und Kommunikationssysteme, Netzeinbindung, Netzwechselwirkungen und Leistungsprognose
- Studien zu technischen, ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Aspekten und Perspektiven der nationalen und internationalen Meeresenergienutzung, insbesondere auch in Kombination mit der Offshore-Windenergie
- Optimierung von Betriebs- und Instandhaltungsservice
- Erarbeitung internationaler Richtlinien und Normen

2.8 Wasserkraft

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Reduktion der Stromerzeugungskosten von Wasserkraftanlagen
- Reduktion der Umweltauswirkungen von Wasserkraftanlagen
- Verringerung des Wartungsbedarfs von Kleinwasserkraftanlagen
- Nutzung bisher nicht erschlossener Potenziale im Niederdruckbereich sowie von Fließgewässern
- Erhöhung der Regeldynamik von Pumpspeicherkraftwerken

Forschungsthemen

- Neue Baukonzepte, Materialien und Werkstoffe in der Anlagentechnik
- Ersatz von Getrieben durch direkt gekoppelte permanent erregte (PME) Generatoren
- Innovative Regelungsverfahren und Fernüberwachungskonzepte für Kleinwasserkraftanlagen
- Kostengünstige und naturnahe Anlagenkonzepte auf der Basis von Tauchturbinen
- Neue Anlagenkonzepte zur Nutzung von Flusströmungen
- Maßnahmen zur Erhöhung der Regeldynamik von Pumpspeicherkraftwerken
- Untersuchung des Einflusses des Klimawandels
- Entwicklung modularer Konzepte für die Integration von Kleinanlagen in die ländliche Elektrifizierung in Entwicklungs- und Schwellenländern

Die Wasserkraft ist die älteste Technologie zur nachhaltigen Stromerzeugung. Mit einem Anteil von 18 % steht sie auf dem dritten Platz nach Erdöl und Kohle an der weltweiten Stromerzeugung. Wasserkraftturbinen mit einer Leistung von mehr als 750 GW erzeugen pro Jahr etwa 2.800 TWh Strom. Weitere 120 GW befinden sich im Bau, 300 bis 400 GW sind noch geplant. Das technische Potenzial der Wasserkraft entspricht etwa 90 % des weltweiten Strombedarfs, jedoch wird nur ca. 30 % des Potenzials als nachhaltig eingestuft. Insbesondere große Wasserkraftanlagen mit großen Stauseen verursachen lokal erhebliche soziale und ökologische Probleme.

Kleine Wasserkraftanlagen können so ausgeführt werden, dass Umweltauswirkungen gering ausfallen und auch strengeren Auflagen genügen wie sie beispielsweise aus der europäischen Wasserrahmenrichtlinie resultieren. Allein in China versorgen über 45.000 Kleinwasserkraftanlagen mehr als 300 Millionen Menschen mit Strom. Weltweit ist die Kleinwasserkraft mit der Versorgung von über 50 Millionen Haushalten und 60.000 Kleinbetrieben die wichtigste Technologie zur ländlichen Elektrifizierung in Gebieten ohne

überregionale Stromnetze. In Regionen mit entsprechendem Wasserkraftpotenzial verursacht sie mit Anschlusskosten von typischerweise 50 bis 75 US-\$ pro Haushalt geringe Kosten und bietet durch eine weitgehend angepasste Technologie regional eine hohe Wertschöpfung.

Neben der Stromerzeugung spielt die Wasserkraft in Form von Pumpspeicherkraftwerken eine wichtige Rolle als heute einziger bedeutender Pufferspeicher für elektrische Energie. Die größten Anlagen können über Stunden mehrere Gigawatt an Leistung aufnehmen oder abgeben und sind innerhalb von Sekunden einsatzbereit. Der Energieinhalt der norwegischen Speicherkraftwerke genügt, um Europa über Wochen mit elektrischer Energie zu versorgen. Aufgrund des bereits relativ hohen Ausbaustandes weist die Wasserkraft nur ein moderates Wachstum von 3 % pro Jahr bei tendenziell steigenden Kosten für neue Anlagen auf, was vorwiegend von steigenden Rohstoffpreisen wie beispielsweise von Stahl herrührt.

Soweit es noch nationale und internationale Forschungsprogramme gibt, konzentrieren diese sich auf die Reduktion der Kosten und der



Umweltauswirkungen der Anlagen. Allerdings ist eine Fortsetzung der Forschungsaktivitäten weiterhin sehr sinnvoll, da trotz der bereits erreichten hohen technischen Reife moderner Wasserkraftanlagen immer noch neue Lösungen entwickelt wie z. B. hocheffiziente Turbinen mit direktgetriebenen Synchrongeneratoren mit Permanenterregung, die ein Getriebe überflüssig machen.

2.8.1 Forschungsfelder

2.8.1.1 Grundlagenforschung

- Untersuchung des Einsatzes neuer Materialien und Werkstoffe sowie Entwicklung neuer Baukonzepte und Fertigungsmethoden Anlagentechnik
- Untersuchung der Umweltauswirkungen zur Verbesserung der Wassergüte, der Gewässerdurchgängigkeit sowie Verbesserungen im Hochwasserschutz
- Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf die Wasserkraftnutzung

2.8.1.2 Vorlaufforschung

- Weiterentwicklungen im Bereich neuer Materialien und Fertigungsmethoden
- Neue Anlagenkonzepte mit verbesserter Integration in Umwelt und Landschaft beziehungsweise zur Erschließung bisher ungenutzter Wasserkraftpotenziale im Niederdruckbereich sowie von kinetischer Energie in Fließgewässern
- Kostengünstige und naturnahe Anlagenkonzepte auf der Basis von Tauchturbinen
- Neue Anlagenkonzepte zur Nutzung von Flusströmungen

2.8.1.3 Angewandte Forschung

- Maßnahmen zur Reduktion der Stromerzeugungskosten bei bestehenden, zu modernisierenden sowie neu zu errichtenden Wasserkraftanlagen
- Maßnahmen zur Verringerung des Wartungsbedarfs von Kleinwasserkraftanlagen
- Entwicklung von Konzepten zur Erhöhung der Regeldynamik von Pumpspeicherkraftwerken
- Entwicklung von Wasserkraftanlagen mit direkt gekoppelten, permanent erregten (PME) Generatoren und der entsprechenden Leistungselektronik für den drehzahlvariablen Betrieb
- Innovative Regelungsverfahren und Fernüberwachungskonzepte für Kleinwasserkraftanlagen
- Optimierung der Betriebsführung in Anlagen mit mehreren Turbinen beziehungsweise Stauketten unter Umweltschutzaspekten, z. B. der Restwasserproblematik
- Integration von Leistungsprognosekonzepten von Wasserkraftanlagen in die Hochwasservorsorge
- Entwicklung modularer Konzepte für die Integration von Kleinstanlagen in die ländliche Elektrifizierung in Entwicklungs- und Schwellenländern

3 Energietransport, -verteilung, -speicherung

3.1 Elektrische Systemtechnik

Die europäische Stromversorgung befindet sich in einem grundsätzlichen Umbauprozess. Das schnelle Wachstum des Anteils an verteilter Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien ist ein gemeinsames europäisches Ziel. Zugleich wurde durch Aufhebung der Gebietsmonopole und die unternehmerische Trennung (Unbundling) entsprechend den Versorgungsaufgaben mit der Umstrukturierung unseres Energieversorgungssystems begonnen. Die heutige noch meist zentral ausgerichtete Energieversorgungsstruktur befindet sich in der Phase der generellen Umgestaltung. Der Liberalisierungsprozess und das Wachstum der erneuerbaren Energien erfordern eine auf Dezentralität und Vernetzung ausgerichtete Struktur und betrifft alle Bereiche, also Bereitstellung, Transport, Verteilung, Speicherung, Handel und Nutzung von Energie. Gleichzeitig erfordern die Fluktuationen einiger erneuerbarer Energien eine weiträumige Vernetzung mit hohen Transportkapazitäten zum Ausgleich von Erzeugungsschwankungen.

Die Aufgaben im Bereich der elektrischen Energieversorgung sind heute durch den Wandel geprägt. Die gewohnten Strukturen, Arbeitsabläufe und Informationsflüsse befinden sich in einem Prozess laufender Modifikationen und Erweiterungen. Dieser Trend wird sich in den nächsten Jahren durch die Veränderung der jetzigen Versorgungsstruktur hin zu einer Energieversorgung mit zunehmend kleinen, dezentralen Erzeugungseinheiten einerseits und durch großräumige Versorgungsstrukturen und Stromaustausch über große Entfernungen andererseits noch erheblich verstärken.

Die verstärkte Nutzung der erneuerbaren Energien erfordert eine koordinierte Flexibilisierung des Gesamtsystems und eine darauf zugeschnittene Infrastruktur. Mit der weiteren Durchdringung von dezentralen Erzeugern in der elektrischen Energieversorgung wird auch die Systemführung komplexer. Die dazu erforderliche Überwachung und Betriebsführung erfordert eine moderne

Leistungselektronik und eine sichere, leistungsfähige und kostengünstige Datenübertragung für die Erfassung von aktuellen Zuständen und die Übertragung von Steuerbefehlen von möglichst allen Stromerzeugern und -verbrauchern. Zugleich drängen durch die Liberalisierung neue Teilnehmer (Erzeuger und Verbraucher) auf den Strommarkt, für die bislang keine beziehungsweise nur beschränkte Möglichkeiten für eine ökonomisch vertretbare Teilnahme am Wettbewerb bestehen. Diese stellen zusätzliche Anforderungen an die Infrastruktur der Energieversorgung. Die Zielerreichung eines überschaubaren, umwelt- und ressourcenschonenden sowie wirtschaftlich ausgerichteten Strommarktes stellt deshalb eine große Herausforderung dar.

Aufgrund der genannten Änderungen kommt dem Einsatz von Stromspeichern in der zukünftigen Energieversorgung mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien eine zunehmend wichtige Rolle zu, damit auch zu Zeiten mit einem geringen Angebot an erneuerbaren Energien z. B. in Zeiten von Windflauten im Winter die Stromnachfrage gedeckt werden kann. Dabei werden unterschiedliche Speichertechnologien für den kurz-, mittel und langfristigen Speicherbedarf sowie für kleine, mittlere und große Speicherkapazitäten eingesetzt werden. Vor dem Aufbau großer Speicherkapazitäten werden jedoch zuerst die Optimierungspotenziale beim Ausgleich von kurz- bis mittelfristigen Schwankungen bis zu mehreren Stunden durch einen regionalen bis zu europäischen Stromtransport sowie durch intelligentes Lastmanagement mit Anpassung der Last an die Erzeugung den potenzielle Speicherbedarf genutzt werden.

Zum Ausgleich längerfristiger Schwankungen werden neben dem gezielten Einsatz von speicherbaren erneuerbaren Energien wie Biomasse auch Speicher mit großen Kapazitäten (Pumpspeicher, Druckluftspeicher) eingesetzt werden. Pumpspeicherkraftwerke in Skandinavien und den Alpen, die über das europäische



Verbundnetz einzubinden sind, können ein wesentliches Element für eine zuverlässige Stromversorgung bilden. Die Entwicklung von Druck-

luftspeichern kann auch lokal in Deutschland weitere Kapazitäten erschließen.

3.1.1 Forschungsbedarf elektrische Systemtechnik, Netze und Netzintegration

Zielsetzungen

- Hoher Anteil erneuerbarer Energien bei gleich bleibender Versorgungssicherheit
- Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch erneuerbare und dezentrale Stromerzeuger
- Umbau der Energieversorgungsstruktur zu einer intelligenten, vernetzten Struktur mit hohem Anteil dezentraler Erzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien gekoppelt mit einem Offshore- und Overlay-Netz zum Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage auf europäischer Ebene
- Transport, Speicherung und Umwandlung von Strom aus erneuerbaren Energien in Gas, Wärme und Kraftstoffe erfolgt systemoptimiert und koordiniert

Forschungsthemen

- Entwicklung von Werkzeugen zum Energie- und Leistungsmanagement dezentraler Erzeugungseinheiten, Netze, Speicher und Verbraucher zum Wandel der Stromnetze zum „Smart Grid“
- Verfahren und Werkzeugen für Planung und Betrieb von regionalen und europaweiten Versorgungsnetzen sowie Netzbetriebsmitteln zur Integration hoher Anteile erneuerbarer Stromerzeugung
- Leistungsfähige bidirektionale Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) zur Vernetzung der Komponenten
- Untersuchung der Systemstabilität des Verbundnetzes unter dem Einfluss der zunehmenden Einspeisung erneuerbarer Energien in die Verteilnetze
- Kopplung neuer Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetze (HGÜ) an vorhandene Wechselspannungsnetze mit moderner Leistungselektronik
- „Verschiebepotenzial“ zwischen Strom, Wärme/Kälte und Gas

Übersicht Forschungsbedarf

Die Netzintegration, Überwachung und Betriebsführung dezentraler Energieversorgungseinheiten erfordert die Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) zur Entwicklung und zum Aufbau eines strukturierten Kommunikationsnetzes mit standardisierten Schnittstellen und einer sicheren, leistungsfähigen und kostengünstigen Datenübertragung. Im Rahmen einzelner Pilotprojekte wurde die Funktionsfähigkeit solcher IKT-Technologien bereits gezeigt. Unter anderem wurde durch Zusammenschluss verteilter regenerativer Erzeuger zu virtuellen Kraftwerken (VK) gezeigt, dass mit erneuerbaren Energien auch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen wie Frequenz- und Spannungshaltung möglich ist.

Erst der Einsatz leistungsfähiger Prognosemodelle hat die Integration von mehr als 25.000 MW

Windleistung in Deutschland ermöglicht. Zur Einbindung von Wind- und Solarenergie in die elektrische Energieerzeugung setzen die Übertragungsnetzbetreiber diese Prognosemodelle ein, mit deren Hilfe der Bilanzkreis EEG mit Hilfe von Ausgleichsenergie glatt gestellt wird. Für die Integration von Windparks in das Energiemanagement von VK sind diese Kurzfristprognosen für einen Prognosehorizont von einer Stunde bis zu vier Tagen eine wesentliche Voraussetzung und entsprechend weiterzuentwickeln.

Die Netzintegration wird zunehmend als wichtiges eigenständiges Aufgabengebiet für Forschung und Entwicklung wahrgenommen. Die Forschung konzentriert sich dabei auf Konzepte für Energiemanagementsysteme dezentraler Erzeugungseinheiten sowie die verbesserte Steuerung und Überwachung von Versorgungsnetzen. Ziel ist,

die sich ändernden Versorgungsstrukturen so zu gestalten, dass die Netzstabilität und die Versorgungssicherheit bei wachsender Anzahl fluktuierender Erzeuger auch ohne große Leistungsreserven gewährleistet bleiben.

Voraussetzung für den beschriebenen Umbau sind der Einsatz moderner Leistungselektronik und die informationstechnische Vernetzung und Koordination von Erzeugern, Netzen, Speichern und Verbrauchern. Neben dem optimierten Energiemix sind dabei leistungsfähige Kommunikationsstrukturen, Online- und Prognoseverfahren für die Netzeinsatzplanung sowie bidirektionales Energiemanagement und neue Energiehandelsysteme und -plattformen für den Dialog zwischen Energieerzeugern, Verteilern und Verbrauchern erforderlich. Interaktive „Smart Grids“ und die Integration intelligenter Stromzähler („Smart Metering“) ermöglichen in Zukunft über zeitvariable Stromtarife eine flexible Anpassung zwischen Erzeugung und Verbrauch. Ein durchgängiges Energiemanagementsystem erfordert die Einbeziehung der Verbraucher in das Netzmanagement.

Für die kostenoptimierte nationale Versorgung mit erneuerbaren Energien ist der Aufbau eines europäischen Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsnetzes (HGÜ) erforderlich, das den großräumigen Ausgleich von Energieangebot und Energiebedarf ermöglicht und deutlich kostengünstiger sein wird als der alternative Aufbau von entsprechenden Speicherkapazitäten. Das HGÜ-Netz erhöht auch die Energieversorgungssicherheit indem es den Import von Strom aus solarthermischen Kraftwerken z. B. des Desertec-Projektes, von Photovoltaikkraftwerken in Südeuropa und Nordafrika, On- und Offshore-Windparks in windstarken Küstenregionen Europas sowie aus Pump- und Schwallwasserkraftwerken beispielsweise in Skandinavien ermöglicht. Die großräumige Verteilung der Erzeugung führt zu einer Vergleichmäßigung der Energieproduktion und reduziert die Abhängigkeit von lokalen Wettersituationen. Die obligatorische Verlegung von Erdkabeln bei HGÜ-Leitungen erhöht auch die Akzeptanz in der Bevölkerung.

Für die Planung und Optimierung eines solchen Netzausbaus ist die detaillierte Simulation und Analyse der möglichen Entwicklung der erneuerbaren Energien und des gesamten europäischen Kraftwerksparks Voraussetzung und für den

Betrieb ist ein leistungsfähiges, europaweites Monitoring notwendig. Gelingt der Ausbau dieses transeuropäischen Supernetzes nicht rechtzeitig oder nicht vollständig, müssten stattdessen im nationalen Rahmen teure Speicherkapazitäten aufgebaut und deutlich höhere Leistungsreserven mittels Restlast- oder Residuallast-Kraftwerke vorgehalten werden.

Design des künftigen Stromversorgungssystems

Für den Umbau der Energieversorgungssysteme müssen nachhaltige Konzepte zukünftiger Energieversorgungsstrukturen entwickelt und mit Simulationsrechnungen untermauert werden. Erforderlich ist eine Abschätzung, wie zukünftige Netze aufgebaut sein müssen. Bezüglich der Speicher sind geeignete Standorte zu identifizieren, um eine optimale Anpassung der fluktuierenden regenerativen Energieerzeuger an den Bedarf zu erhalten und die Netze möglichst optimal auszunutzen und dabei mögliche technologische Entwicklungen zu berücksichtigen.

Konzepte, Analysen und Werkzeuge für Einsatzplanung und Betriebsführung

Die schrittweise Umgestaltung des Energieversorgungssystems erfordert eine Vielzahl von Konzepten, Analysen und Werkzeugen für die Einsatzplanung und Betriebsführung dezentraler Energieversorgungsstrukturen, um einen sehr hohen Anteil an regenerativer Energiebereitstellung bei gleich bleibender Versorgungssicherheit zu ermöglichen.

Entwicklung, Erprobung und Einsatz von innovativen Übertragungstechnologien

Der Transport großer Energiemengen über weite Entfernungen erfordert die Weiterentwicklung der Übertragungstechnologien und der zugehörigen Komponenten sowie eine optimale Ausnutzung der Betriebsmittel durch flächendeckende Überwachung und intelligenten Betrieb.

3.1.2 Forschungsfelder elektrische Systemtechnik, Netze und Netzintegration

3.1.2.1 Grundlagenforschung

Design des künftigen Stromversorgungssystems

- Konzepte zur koordinierten Flexibilisierung von Energieerzeugung und Energienachfrage
- Konzepte zur Integration von Stromspeichern für große Energiemengen wie Druckluftspei-

cherkraftwerke sowie Wasserstoff- und Methanerzeugung aus überschüssigem regenerativen Strom

- Entwicklung und Simulation von Netzwerk-Architekturen mit innovativen Technologien zum Design eines effektiven Übertragungsbeziehungsweise Overlay-Netzes in Deutschland und Europa
- Machbarkeitsstudien und Kostenabschätzungen für lange HGÜ-Gleichspannungstrassen
- Studien zur optimalen räumlichen Verteilung von Energiespeichern, z. B. direkt bei der Erzeugung, direkt bei den Verbrauchern oder an geologisch geeigneten Standorten.
- Entwicklung von Modellen zum effizienten Betrieb künftiger Energieversorgungssysteme unter Einbeziehung der verschiedenen Energiearten (Strom, Wärme, Kälte und Gas) und zur Erschließung des Verschiebepotenzials von elektrisch-thermisch gekoppelten Erzeugungsanlagen (KWK) im zukünftigen Energieversorgungssystem

Konzepte, Analysen und Werkzeuge für Einsatzplanung und Betriebsführung

- Charakterisierung und Modellierung der raum-zeitlichen Korrelationen wetterabhängiger erneuerbarer Energieerzeugung und deren Prognose

Entwicklung, Erprobung und Einsatz von Übertragungstechnologien

- Konzepte für den weiteren mittel- bis langfristigen Netzausbau in Deutschland und Europa unter Entwicklung und Nutzung von HGÜ-Stromleitungen und deren Integration in das Wechselstromnetz
- Studien zu den Wechselwirkungen verkoppelter Gleich- und Wechselspannungsnetze
- Studien zur Regelung von HGÜ-Leitungen bei verteilter Einspeisung und verteilten Auskoppelungen, sogenannter Multiport-HGÜ

3.1.2.2 Vorlaufforschung

Konzepte, Analysen und Werkzeuge für Einsatzplanung und Betriebsführung

- Entwicklung von Konzepten und Werkzeugen zur Systemeinbindung von erneuerbaren Kombikraftwerken und zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen (Frequenz- und Spannungshaltung, Versorgungswiederaufbau und

Frequenzstabilisierung (Inertia)) durch solche Verbundkraftwerke

- Entwicklung von Netzmanagementsystemen und Netzregelungsverfahren sowie Gesamtmodellen für die technische, ökonomische und ökologische Optimierung (für alle Technologien und Netzebenen einschließlich der Niederspannungsebene)
- Entwicklung und Einsatz einer integrierten Kommunikationsinfrastruktur zur verstärkten Interoperabilität der Netzbetreiber zur Netzüberwachung und Wiederherstellung der Netzstabilität bei Störungen
- Konzepte zur Harmonisierung der Anschlussbedingungen dezentraler Erzeuger in Europa
- Entwicklung von Systemen zur Überwachung des Stromversorgungssystems z. B. von Tools zur Online-Diagnose des Systemzustandes, Online-Simulation, Entwicklung eines „Defense Plan“ für große Systemstörungen unter Berücksichtigung großer Anteile erneuerbarer Energien und dezentraler Generatoren
- Optimierung der elektrischen Systemtechnik für gebäudeintegrierte Stromerzeugung, d. h. Berücksichtigung von Teilverschattung, niedrigeren mittleren Einstrahlungswerten und höheren Betriebstemperaturen als bei Freiflächenanlagen

3.1.2.3 Angewandte Forschung

Design des zukünftigen Stromversorgungssystems

- Entwicklungswerkzeuge und Entwurfstechniken für Energieversorgungssysteme (Modellbildung und Simulation)
- Entwicklung von Konzepten, Instrumenten und Schnittstellen zur Steuerung des Stromverbrauchs bei privaten und industriellen Nutzern als Grundlage für ein umfassendes Lastmanagement
- Entwicklung und Einsatz von verteilten Energiemanagementsystemen, virtuellen Kraftwerken und Mikro-Netzen
- Entwicklung von Managementsystemen für verteilte Speicher unter Einbeziehung der Akkumulatoren von Elektromobilen
- Verbesserung der Prognosesysteme zur optimierten Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energien in den Strommarkt und eine optimierte Netzbetriebsführung und Entwicklung von Warnsystemen zur Unterstützung der Netzbetreiber bei der Aufrechterhaltung der Systemsicherheit

- Entwicklung und Erprobung von Energie- und Kommunikationsschnittstellen zwischen dezentraler Stromerzeugung und Verbundnetzen
- Entwicklung von Werkzeugen und Schnittstellen für ein interaktives Spannungs- und Blindleistungsmanagement zwischen Netzbetreibern und dezentralen Erzeugern
- Entwicklung von Soft- und Hardwarelösungen zur Verbesserung der Aufnahmefähigkeit der Verteilnetze insbesondere bezüglich Spannungsqualität und Schutztechnik
- Entwicklung und Einsatz leistungsfähiger bi-direktionaler Informations- und Kommunikationstechnologien zur Vernetzung der Komponenten

3.1.3 Forschungsbedarf Wechselrichter und Leistungselektronik

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Effizientere, kompaktere, leichtere und kostengünstigere Wechselrichter zur Kopplung von erneuerbaren Energien-Stromerzeuger und Stromspeicher an das Wechselspannungsnetz
- Wechselrichter übernehmen Aufgaben der Netzregelung und werden über Leitwarten ferngesteuert
- Wechselrichter sind zentrales Bindeglied zwischen Energieerzeugern, Verbrauchern und Speichern
- Leistungselektronik koppelt neue Hochspannungs-Gleichstromnetze (HGÜ) an vorhandene Wechselspannungsnetze

Forschungsthemen

- Neue Schaltungstopologien und Halbleiterbauelemente zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Effizienz der Wechselrichter
- Hoch dynamische Wechselrichter mit der Fähigkeit zur Übernahme von Systemdienstleistungen wie Blindleistungsbereitstellung, Fault Ride Through (FRT) und Netzregelung
- Neue Methoden zur Regelung des zunehmend durch Wechselrichter geführte Netz mit intelligenter Steuerung der Leistungsflüsse zwischen Erzeugern, Netz und Energiespeichern
- Leistungsfähige Mittel- und Hochspannungsumrichter zur Kopplung von Gleich- und Wechselstromnetzen

Die Leistungselektronik spielt zukünftig eine zentrale Rolle bei der Netzregelung, da die rotierenden Generatoren aus Kohle- und Kernkraftwerken kontinuierlich abnehmen und die Wechselrichter in Windkraft- und PV-Anlagen die Netzbildung zunehmend 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.

Auf dem Gebiet der Wechselrichtertechnik für die Windenergie und die Photovoltaik ist Deutschland weltweit führend. 60 % der weltweiten PV-Wechselrichterproduktion stammten 2009 aus Deutschland, 85 % aus Europa. Asiatische Hersteller fällt es sehr schwer, diesen Markt zu erobern, da Wechselrichter inzwischen äußerst komplex

sind, insbesondere im Bereich der Regelungstechnik. Durch die zunehmende Integration von Funktionen zur Netzbildung und -stabilisierung wird sich diese Komplexität weiter erhöhen, so dass zu erwarten ist, dass Deutschland seine führende Stellung halten oder sogar ausbauen kann.

Die Preise für Photovoltaikwechselrichter sind in den letzten 20 Jahren um den Faktor 10 gesunken und werden als Massenprodukt hergestellt. Durch neue Halbleitermaterialien wie z. B. Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) können bereits sehr hohen Wirkungsgrade noch weiter erhöht werden. Gleichzeitig sinken die Kosten durch höhere Integrationsdichte und kompaktere Bauweise. Wechselrichter übernehmen zunehmend die Netzregelung und Stabilisierung, sie kommunizieren mit Netzleitstellen und erhalten von diesen Vorgaben für ihre Betriebsweise.



3.1.4 Forschungsfelder Wechselrichter und Leistungselektronik

3.1.4.1 Grundlagenforschung

Wechselrichtergeführte Netze

- Entwicklung von Regelkonzepten für wechselrichtergeführte Netze
- Entwicklung von Wechselrichter-Simulationsmodellen, die kompatibel mit Netzsimulationsprogrammen sind
- Studien zum Verhalten wechselrichtergeführter Netze im Fehlerfall
- Studien zur optimierten Einbindung von elektrischen Speichern in Netze
- Entwurf und Normung von Kommunikationsschnittstellen zur Steuerung verteilter Erzeuger durch Leitwarten und zum Austausch von Messwerten und Netzdaten zwischen Erzeuger und Leitwarte

Hochspannungs-Gleichstromübertragungsnetze (HGÜ)

- Entwicklung von Konzepten zu verkoppelten Gleich- und Wechselspannungsnetzen
- Machbarkeitsstudien und Kostenabschätzungen für lange Gleichspannungstrassen z. B. von zentralen Kraftwerken in Afrika nach Europa und zu zentralen Pumpspeicherkraftwerken in der Alpenregion und in Norwegen
- Studien zur optimalen räumlichen Verteilung von Energiespeichern, z. B. direkt bei der Erzeugung, direkt bei den Verbrauchern und an geologisch geeigneten Standorten
- Studien zur Regelung von HGÜ-Leitungen bei verteilten Einspeisungen und verteilten Auskopplungen (Multiport HGÜ) als Grundlage zur Planung und optimierter Auslegung und Regelung von Netzen

3.1.4.2 Vorlaufforschung

Leistungselektronik für Photovoltaik und Wind

Im Rahmen der Vorlaufforschung sollen Demonstratoren entwickelt werden, die neue Wege in der Leistungselektronik aufzeigen. Wichtige Themen sind die Regelung und Stabilisierung des Wechselspannungsnetzes sowie der Aufbau und Feldtest neuer leistungselektronischer Komponenten für HGÜ-Netze.

- Integration von Netzstabilisierungsfunktionen in Wechselrichter

- Entwicklung von Wechselrichtern mit integrierten Energiespeichern wie z. B. Doppelschichtkondensatoren oder Batterien
- Entwicklung von DC/DC-Wandlern im Megawattbereich zur direkten Kopplung von Photovoltaikanlagen und AC/DC-Wandlern im Megawattbereich zur direkten Kopplung von Windenergieanlagen an HGÜ-Netze
- Entwicklung von bidirektionalen DC/DC-Wandlern zur Einbindung elektrischer Energiespeicher in HGÜ-Netze

3.1.4.3 Angewandte Forschung

Durch die Forschungen auf dem Gebiet der Wechselrichter und Leistungselektronik sollen die Kosten für die Geräte um mindestens 10 % pro Jahr gesenkt werden. Gleichzeitig soll die Lebensdauer erhöht und die Effizienz gesteigert werden.

Photovoltaik-Wechselrichter

- Entwicklung modulintegrierter Elektronik, insbesondere DC/DC-Wandler und Modulwechselrichter, Anschluss an die technologisch führenden amerikanischen Hersteller
- Weiterentwicklung von Stringwechselrichtern mit dem Ziel der Gewichtsreduzierung, Lebensdauererhöhung und Kostensenkung durch den Einsatz neuer Bauelemente wie z. B. Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN)
- Weiterentwicklung von Zentralwechselrichtern zur Reduktion von Kosten und Gewicht durch Übertragung der Erkenntnisse von Stringwechselrichtern, insbesondere durch den Einsatz von Dreipunktschaltungen und optimierten Drosselspulen

Wechselrichter für Windkraft

- Entwicklung neuer Schaltungstopologien zur Erhöhung des Wirkungsgrades und Kostensenkung
- Entwicklung neuer Regelungskonzepte zur Verringerung der mechanischen Beanspruchung von Rotorblättern, Getriebe, Turm und Fundament

3.1.4.4 Sonstige Forschungsaufgaben

- Umweltverträgliche Produktion leistungselektronischer Schaltungen
- Recycling von Wechselrichtern und anderen leistungselektronischen Komponenten

3.2 Netze für Gas-, Wärme- und Kälteverteilung

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Identifikation der erforderlichen Wärme und Kältenetze (WKN) und Gasnetze im optimierten Energiesystem
- Ausbau von WKN, die zur Aufnahme von Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energien und KWK geeignet sind
- Kostenreduzierung und Effizienzsteigerung von WKN

Forschungsthemen

- Simulationsmodelle für den Wärmemarkt zur Berechnung der ökonomischen und ökologischen Erfolgswahrscheinlichkeit bei Investitionen in WKN und Gasnetzen
- Entwicklung von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung im Betrieb von WKN

- Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung der Baukosten von WKN
- Geschäftsmodelle für Investition und Betrieb von WKN
- Konzepte zu Integration von Kurzzeit- und saisonalen Speichern in WKN
- Konzepte für Sanierung und Umbau bestehender WKN
- Untersuchungen von sozioökonomischen, ökologischen und psychologischen Kriterien bei den Entscheidungsprozessen für die Installation von WKN und Gasnetzen
- Strategien und Regulierungsfragen beim Netzzugang und der Einspeisung von Biogas und erneuerbar erzeugtem Methan in Gasnetze

Wärme- und Kältenetze (WKN) sowie Gasnetze sind einerseits erforderlich, um künftig einen hohen Anteil erneuerbarer Energien in der Wärme- und Gasversorgung zu ermöglichen, insbesondere zur Versorgung von verdichteten Baugebieten und von Großverbrauchern. Der flächendeckende Einsatz von Solarthermieanlagen zur Wärmeerzeugung, der starke Ausbau von Geothermieanlagen sowie die Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung ist nur mit einem deutlichen Ausbau der Wärmenetze möglich. Andererseits sind WKN und Gasnetze langfristige Infrastrukturmaßnahmen, die konträr zur zunehmenden Verbrauchsreduzierung der angeschlossenen Verbraucher und der zunehmenden Flexibilisierung von Energiebereitstellung und -nutzung vor Ort stehen.

Zweifellos werden Stromanwendungen künftig an Bedeutung gewinnen, nicht zuletzt wegen der Elektromobilität. Und es wäre auch denkbar, Wärme mit Solarstrom und Wärmepumpen statt mit solarthermischen Anlagen bereitzustellen. Doch die langfristige, saisonale Energiespeicherung vom Sommer- in das Winterhalbjahr, die bei solarbeheizten Gebäuden erforderlich ist, ist nur in Wärmespeichern relativ einfach und kostengünstig realisierbar, der Aufbau entsprechender Stromspeicherkapazitäten ist dagegen nicht dar-

stellbar. Auch die Nutzung von Wärme aus Geothermie- und KWK-Anlagen ist nur mit Nah- und Fernwärmenetzen sinnvoll möglich. Mit erneuerbarem Strom erzeugtes Methan und Biogas sind vielversprechende Elemente eines nachhaltigen Energieversorgungskonzeptes, die Gasnetze erfordern. Ihre Einspeisung in das heutige Erdgasnetz macht unmittelbar auch die großen, heute schon vorhandenen Gasspeicherkapazitäten problemlos für das künftige Energiesystem verfügbar.

Der Forschungsbedarf im Bereich WKN und Gasnetze bezieht sich deshalb einerseits auf die Fragen der Netzausbauplanung und andererseits auf die Netztechnologie im Sinne der Kostensenkung beim Bau und der Effizienzsteigerung im Betrieb von WKN.

3.2.1 Forschungsfelder

Planungsgrundlagen

Grundsätzlich stehen mögliche Investoren in WKN und Gasnetze vor der Frage, ob es zur Wärme- und Kälteversorgung eines Gebietes aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist, erstens ein WKN aufzubauen beziehungsweise bestehende Netze zu sanieren, oder zweitens ein Gasnetz mit dezentraler Wärme- und Kälteerzeugung aufzubauen beziehungsweise zu betreiben, oder drittens keine Netze aufzubauen und zu betreiben und damit



eine rein dezentrale Wärme- und Kälteerzeugung, eventuell mit Strom und Wärmepumpe zu unterstützen.

Grundsätzlich fehlt es an verlässlichen Planungsgrundlagen und -instrumenten, um diese Fragestellung in einer sich stark ändernder Energieversorgungs- und Verbraucherstruktur ausreichend zuverlässig beantworten zu können. Dazu sind nicht nur die jeweiligen Abnehmerstrukturen (lockere Bebauung im ländlichen Raum, dichte Bebauung in Innenstädten, Altstadtquartieren mit alter Bausubstanz, öffentliche Gebäude, Gewerbe und Industrie) von Relevanz, sondern auch Annahmen über die Änderung von Rahmenbedingungen wie z. B. der Energiepreisentwicklung oder möglicher Entwicklungen in den Wärme- und Kältetechnologien.

Bei der Erarbeitung von Planungsinstrumenten ist es wichtig, das WKN als Gesamtsystem zu betrachten, d. h. mit der Charakteristik des Wärme- beziehungsweise Kälteerzeugers, z. B. KWK-Abwärme, Geothermie oder Solarthermie, der möglichen Betriebs- und Verteilkonzepte, der Einbindung von Wärme- beziehungsweise Kältespeichern in das Netz inklusive Be- und Entladestrategien sowie der Charakteristik der Wärme- beziehungsweise Kälteverbraucher.

Kostenreduktion beim Bau und Effizienzsteigerung im Betrieb

Entscheidend für den ökonomischen und ökologischen Erfolg eines WKN ist die Effizienz des Netzes, d. h. der Verlust von Wärme oder Kälte im Betrieb. Angesichts des immer geringer werdenden Wärmebedarfs von Gebäuden und der Notwendigkeit von niedrigen Rücklauftemperaturen für einen effizienten Betrieb von solarthermischen Anlagen in Wärmenetzen, muss die Wärmedämmung des Netzes verbessert, die Arbeitstemperatur gesenkt, aber auch die Betriebsweise optimiert werden. Beispielsweise könnte das Netz nur einmal am Tag auf Betriebstemperatur gebracht und Wärme an die angeschlossenen Verbraucher zur Beladung ihrer Tagesspeicher verteilt werden, was die Verluste deutlich reduzieren würde.

Der Bau von Wärmenetzen ist in Deutschland pro Meter Leitungslänge signifikant teurer als beispielsweise in Dänemark, wo heute schon über 60 % der Haushalte an ein Nahwärmesystem

angeschlossen sind. Deshalb müssen systematisch die Kostenreduktionsmöglichkeiten beim Bau von WKN erforscht und die vielversprechenden Ansätze entwickelt und umgesetzt werden.

Entscheidungsprozesse und Rahmenbedingungen
Der Anschluss eines Verbrauchers an ein Netz unterliegt üblicherweise den Regeln des freien Marktes. Eine hohe Anschlussquote ist aber für den Investor meist Voraussetzung für seine Investitionsentscheidung für den Bau eines WKN oder Gasnetzes. Es besteht deshalb dringender Bedarf an einer Begleitforschung, die den Prozess der Planung und Investitionsentscheidung für den Bau eines WKN oder Gasnetzes untersucht und alle harten, das heißt ökonomischen und rechtlichen, sowie alle weichen, das heißt beispielsweise die Erwartungshaltungen bezüglich der Wärmepreisentwicklung, das Image der WKN-Versorgung und das Unabhängigkeitsstreben, psychologischen Faktoren für den potenziellen Anschlussnehmer erforscht, um Anregungen für die optimale Gestaltung von Planungs- und Entscheidungsprozessen zu erhalten.

Rechtliche Bedingungen Gasnetze

Biogas und in Zukunft auch mit erneuerbaren Energien erzeugtes Methan könnten problemlos in vorhandene Gasnetze eingespeist werden. Hierfür sind aber die möglichen Konsequenzen zu analysieren und die rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen zu schaffen.

3.2.1.1 Grundlagenforschung

Planungsgrundlagen: Prognosemodelle für die Wärme- und Kältenetze (WKN)

Grundlage für die Entscheidung des Baus eines WKN ist eine Prognose der künftigen Bedarfsentwicklung in der erschlossenen Region, der Anschlussdichte, der Energiepreisentwicklung, der möglichen technischen Alternativen der Verbraucher sowie der regulativen Rahmenbedingungen. Da alle diese Faktoren sich gegenseitig beeinflussen und sich zwangsläufig in den kommenden Jahren ändern werden, wobei auch drastische Änderungen nicht ausgeschlossen sind, ist eine Prognose nur auf Basis einer detaillierten Simulation des Gesamtsystems und eine Risikobewertung auf Basis verschiedener Szenarien möglich.

- Entwicklung von Simulationsinstrumenten zur quantitativen Bewertung der Risiken und Chancen für den Rückbau, Umbau oder Neubau von WKN und Gasnetzen unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussfaktoren auf den zu betrachtenden Wärmebeziehungswise Kältemarkt sowie Prognosen für die Erreichung ökonomischer, ökologischer und sonstiger Ziele einer möglichen Investition in Abhängigkeit der Annahmen für die einzelnen Parameter berechnen.
- Erarbeitung von Richtlinien für Planung, Bewertung und Betrieb der verschiedenen Lösungen für WKN

Technische Anforderungen Biogas- und Methaneinspeisung in Gasnetze

Die Biogaseinspeisung in die bisherigen Erdgasnetze nimmt kontinuierlich zu und künftig ist zusätzlich mit der Einspeisung von Methan, das mit überschüssigem Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wurde, zu rechnen.

3.2.1.2 Angewandte Forschung

Kostenreduzierung im Bau und Effizienzsteigerung im Betrieb

- Alle Möglichkeiten der Kostensenkung beim Bau von WKN sind zu prüfen und Kostensenkungen beispielsweise durch den Einsatz von neuen Materialien und Werkstoffen, optimierter Verlegetechniken für die Leitungen und Vereinfachung der eingesetzten Komponenten zu erschließen unter Berücksichtigung der Erfahrungen von Ländern mit günstigeren Baukosten für WKN
- Zur Steigerung der Effizienz von WKN ist beispielsweise die Dimensionierung der Netze, die Wärmedämmung der Leitungen und Komponenten, die Betriebstemperaturen, die Einbindung und Betriebsweise von Wärmebeziehungswise Kältespeichern und die Effizienz der Wärmeübergabestationen sowie die möglichen Betriebsweisen der Gesamtsysteme durch Simulationsstudien systematisch zu erforschen und die zu erarbeitenden Optimierungsvorschläge durch Pilotanlagen zu prüfen

- Untersuchung der technischen Anforderungen an die Einspeisung von Biogas und mit erneuerbaren Energien hergestelltes Methan in heutige Erdgasnetze für unterschiedliche Biogas- und Methananteile im „Bio-Erdgas“
- Ausarbeitung von Empfehlungen zum Netzzugang und zu Einspeiseregelungen von Biogas und erneuerbar erzeugtem Methan in Erdgasnetze

Sozioökonomische Begleitforschung

- Sozioökonomische Untersuchung des gesamten Planungs- und Entscheidungsprozesses für den Bau eines WKN oder Gasnetzes sowie der Entscheidungsprozesse der potenziellen Nutzer in Bezug auf den Anschluss an das Netz
- Ausarbeitung von Empfehlungen für die Planung und Realisierung von WKN und Gasnetzen aus sozioökonomischer Sicht

Optimierte Einbindung von Wärme- und Kälteerzeugern in WKN

Die optimale Konzeption von WKN hängt auch von den eingesetzten Wärme- und Kälteerzeugern ab, für die angepasste Lösungen erarbeitet werden sollten.

- Entwicklung von optimierten Konzepten für alle mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien versorgten WKN wie z. B. solare Nahwärmesysteme mit Kurzzeit- und Saisonalem Wärmespeicher, WKN mit KWK-Anlagen, Biomasse-Heizwerken und mit Geothermieanlagen und gegebenenfalls thermisch angetriebenen Kühlmaschinen (siehe auch Kapitel 3.2)



3.3 Chemische Speicher

Für eine sichere Energieversorgung auf Basis hoher Anteile erneuerbarer Energien ist eine deutliche Erhöhung der verfügbaren Energiespeicherkapazitäten mittel- bis langfristig unabdingbar. Denn in den Wintermonaten November bis Februar kann es zu mehreren Wochen mit sehr geringem Angebot an erneuerbaren Energien kommen, wenn der Himmel kontinuierlich bedeckt ist und gleichzeitig Windflaute herrscht. In diesen Phasen muss entweder Energie in Form von Strom oder Gas importiert oder aus Speichern entnommen werden. Kurzfristig werden durch Fluktuationen erneuerbarer Energien ausgelöste lokale Unterversorgungs- und Überangebotssituationen jedoch durch überregionalen Ausgleich der Energiemengen sowie durch Anpassung der Erzeugung an die Last und die Last an das Energieangebot und damit ohne zusätzliche Speicherkapazität ausgeglichen werden können.

Energiespeicher sind in Kurzzeitspeicher wie z. B. Pumpspeicherkraftwerke, Druckluft- und Batteriespeicher und Langzeitspeicher wie z. B. in Form chemischer Energieträger zu unterscheiden. In einem zukünftigen erneuerbaren Energiesystem werden beide Speicherarten benötigt. Für die saisonale Stromspeicherung eignen sich vor allem chemische Energieträger, insbesondere Wasserstoff und Methan, die auch als Kraftstoff für die Mobilität eingesetzt werden können. Chemische

Speicher können Energie nahezu verlustfrei speichern bei relativ hoher Energiedichte. Allerdings ist bei der Speicherung die Gesamtbilanz inklusive der Umwandlungsverluste zu berücksichtigen, so dass für die verschiedenen Bedarfsfälle unterschiedliche Lösungen resultieren. Methan hat den Vorteil, dass es die bestehende Erdgasinfrastruktur inklusive vorhandener Speicherkapazitäten problemlos nutzen kann.

Wasserstoff als chemischer Energieträger kann mit erneuerbar erzeugtem Strom mittels Elektrolyse aus Wasser unter Abspaltung von Sauerstoff gewonnen oder auch direkt mit photovoltaischer Ladungstrennung erzeugt werden (siehe Kapitel 2.3.3). Wasserstoff kann als sauberer Brennstoff in Brennstoffzellen, Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Aus dem Wasserstoff kann aber auch durch eine chemische Reaktion mit Kohlendioxid Methan erzeugt werden, also ein synthetisches Erdgas. Dieses Erdgassubstitut lässt sich problemlos in das bereits bestehende Erdgasnetz einspeisen und ermöglicht so auch die Nutzung der heute schon vorhandenen großen Speicherkapazitäten des Erdgasnetzes für die Speicherung von erneuerbarer Energie. Das schon vorhandene Erdgasnetz hat heute in Form von Untertage-Gasspeichern eine thermische Kapazität von 217 TWh.

3.3.1 Forschungsbedarf Wasserstoff und Methan

Zielsetzungen

- Erhöhung der Umwandlungseffizienzen von chemischen Energieträgern
- Bereitstellung von chemischen Speichern, die eine ausreichende Versorgungssicherheit ermöglichen
- Nutzung der Vernetzung von Stromnetz, Gasnetz und Mobilität durch die ineinander umwandelbare Energieträger Strom, erneuerbar erzeugtes Methan und Wasserstoff

Forschungsthemen

- Potenzialanalyse aller mono- und bidirektionalen Umwandlungsketten
- Optimierung der Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff
- Entwicklung und Optimierung der Methan-Erzeugung aus erneuerbaren Energien und verschiedenen Kohlenstoff- und CO₂-Quellen
- Entwicklung von Konzepten für die Integration von erneuerbarem Methan und Wasserstoff in die Strom-, Gas- und Kraftstoffinfrastruktur
- Erhöhung der Effizienz der Umwandlungsschritte aller Speicherformen

Übersicht Forschungsbedarf

Die Wasserstofftechnologie bietet einige Vorteile und sollte intensiv weiter entwickelt werden. Ein wichtiges Forschungsfeld ist die Wasserstoffspeicherung. Die direkte Speicherung in Drucktanks wird derzeit am Hybrid-Kraftwerk der Firma Enertrag in der Uckermark erforscht und demonstriert. Der aus Windstrom mittels Druckelektrolyse hergestellte Wasserstoff wird in drei Druckbehältern zwischengespeichert. Bei Windflaute wird der Wasserstoff mit Biogas gemischt und in Blockheizkraftwerken wieder zur Stromerzeugung verwendet.

Neben Wasserstoff ist erneuerbar erzeugtes Methan als Erdgassubstitut (Substitute Natural Gas, SNG) eine interessante Option der chemischen Speicherung von erneuerbaren Energien. Dieses neue Speicherkonzept bietet den Vorteil, dass die vorhandene Erdgasinfrastruktur genutzt werden kann. Durch Forschung und Entwicklung sollte seine Praktikabilität nachgewiesen werden. Die Prozesskette zur Erzeugung von Methan aus elektrischer Energie, Wasser und CO₂ besteht aus dem ersten Schritt der Wasserspaltung über thermische oder elektrochemische Prozesse und dem zweiten Schritt der Methanisierung.

Bio-Methan aus Biogasanlagen wird derzeit bei der Einspeisung mit 8 bis 12 €/ct/kWh vergütet. Hier sind analog zur Stromeinspeisung im Rahmen des EEG gesetzliche Regelungen notwendig. Bei Verwendung von Wind- oder Photovoltaikstrom ist die Wasserstoff- und Methan-Produktion nicht durch die Agrarfläche begrenzt und es gibt keine Nutzungskonkurrenz zur Lebensmittelproduktion. Der Elektrolyse kommt bei der Umwandlung von Strom zu chemischen Energieträgern besondere Bedeutung zu und wird gesondert betrachtet (siehe Kapitel 3.5).

3.3.2 Forschungsfelder Wasserstoff und Methan

3.3.2.1 Grundlagenforschung

Allgemein

- Evaluierung der Potenziale von chemischen Speichern in einem künftigen Energieversorgungssystem und Ermittlung des optimierten Einsatzes der chemischen Energieträger z. B. als Kraftstoffe oder in KWK-Anlagen
- Erarbeitung einer Roadmap zur Erschließung der Potenziale von chemischen Speichern

- Ermittlung der Gesamteffizienz aller möglichen Umwandlungsketten mit Beteiligung der chemischen Speicher und deren Optimierungsmöglichkeiten:
erneuerbarer Strom => Wasserstoff/Methan
=> Kraftstoff/Strom/Wärme

Herstellung von Methan mittels erneuerbarer Energien

Wichtigste Aufgabe ist die Erhöhung der Effizienz der einzelnen Umwandlungsschritte bei der Herstellung von Methan mit erneuerbaren Energien und die Kopplung des Konzeptes mit dem bestehenden Strom- und Gasnetz.

- Untersuchung der Eignung verschiedener Reaktorkonzepte wie z. B. Festbett-, Wirbelschicht- und Slurry-Reaktor
- Untersuchung schwefelresistenter Katalysatoren
- Gasaufbereitung mittels erneuerbarer Energien unter Nutzung verschiedener Kohlenstoff- beziehungsweise CO₂-Quellen wie z. B. Biogas, thermochemische Vergasung, elektrolitisch und solarthermisch gewonnenem Wasserstoff und CO₂
- Entwicklung und Bewertung von Konzepten zur Erzeugung von Methan mit erneuerbar erzeugtem Strom und Biomasse inklusive der Prüfung, ob damit der Biomasse-Kohlenstoff nahezu vollständig in Kraftstoff-Kohlenstoff überführt und somit die Reichweite biomassestämmiger Energieträger verdoppelt werden kann
- Entwicklung von Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz aller Umwandlungsschritte
- Einkopplung von konzentrierter Solarwärme
- Prozesssimulation und Modellierung zur Optimierung des Gesamtsystems

Wasserstoff

Eine wichtige Aufgabe ist die Entwicklung von effizienten Produktionsverfahren, großvolumigen Speichern und der Aufbau der benötigten Infrastruktur zur Wasserstoffnutzung sowie die Integration in bestehende Energieverteilstrukturen.

- Entwicklung von großvolumigen Wasserstoff-Speicher- und -Transporttechnologien
- Maßnahmen zur Minimierung der Energieverluste bei der Wasserstoff-Speicherung
- Untersuchung des Einflusses von Verunreinigungen und Spurenelementen in Wasserstoff

- Konzepte zur verlustarmen Kopplung der Elektrolyse an Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen
- Weiterentwicklung von Thermischen Wasserspaltungsprozessen und Kopplung mit der Solarthermie durch Verbesserung der Stabilität von Redoxsystemen, grundlegende Beschreibung von Reaktionsmechanismen und Materialeigenschaften sowie Weiterentwicklung von chemisch aktiven Schichten hinsichtlich Effizienz und Lebensdauer

3.3.2.2 Vorlaufforschung

Allgemein

- Entwicklung von gesetzlichen Regelungen für die Gaseinspeisung ins Erdgasnetz
- Erarbeitung von Richtlinien für den Bereich Wasserstoffherzeugung, -speicherung und -verteilung
- Sozioökonomische Betrachtungen der Nutzung chemischer Energieträger z. B. in Bezug auf die Diversifizierung der Energieversorgung, Erhöhung der Versorgungssicherheit, Schaffung von Arbeitsplätzen und Technologieexport

Methanisierung

Die Methanisierung konventioneller Synthesegase mit den Hauptkomponenten Wasserstoff und Kohlenmonoxid ist bekannt und großtechnisch realisiert. Die Methanisierung von Kohlendioxid wird aber bislang nicht angewendet, da hierzu keine Notwendigkeit bestand. Die Reaktion ist exotherm, was besondere Anforderungen an das Reaktordesign stellt. Für die Methanisierung kommen verschiedene Reaktorkonzepte in Betracht, z. B. Festbett-, Wirbelschicht- und Slurry-Reaktoren.

- Entwicklung von effizienten Methanisierungsverfahren mit Kohlendioxid

Wasserstoff

- Entwicklung von Konzepten zur Reinigung von Wasserstoff von Verunreinigungen und Spurenelemente
- Definition von leicht analysierbaren Leitsubstanzen zur Definition der Wasserstoff-Qualität
- Erprobung der solaren Reformierung für den Einsatz weiterer kohlenstoffhaltiger Rohstoffe

3.3.2.3 Angewandte Forschung

Erneuerbar erzeugtes Methan

Zentrale Aufgabe ist die Verbesserung der Wirkungsgrade der Umwandschritte von Strom zu Gas auf über 60 % und die Reduktion der spezifischen Investitionskosten auf kleiner 1.000 €/kWh

- Reduzierung des Energiebedarfs der Gesamtprozesskette „Power to Gas“
- Prozesssimulation und Modellierung zur Optimierung des Gesamtsystems
- Notwendige Gasaufbereitung bei Nutzung verschiedener Kohlendioxid-Quellen, z. B. Biogas- oder CCS-Anlagen
- Optimierung der Anlagenfahrweise je nach Stromangebot und Strategie, z. B. Elektrolyse intermittierend, Methanisierung Teil-, Volllast- oder Langzeitbetrieb sowie Gas-Zwischenspeicherung
- Grundlegendes und detailliertes Engineering unter Berücksichtigung standortgebundener Randbedingungen

Wasserstoff

- Entwicklung von verbesserten, integrierten Prototypensystemen für die solare Reformierung kohlenstoffhaltiger Rohstoffe
- Langzeittestbetrieb von Prototypreaktoren zur solaren Erdgasreformierung
- Prototypendemonstration zur solaren Wasserspaltung durch Scale-up der Technologie und Anpassung eines geeigneten Solarturms
- Optimierung verschiedener Konzepte zur Stromerzeugung aus Wasserstoff
- Entwicklung von Konzepten zum Aufbau von Nutzungs- und Verteilstrukturen sowie der Netzintegration von Wasserstoff
- Prozesskostenanalyse für verschiedene Verfahren zur Herstellung und Reinigung von Wasserstoff

Netzintegration

- Standortanalyse für die Methan-Herstellung mittels erneuerbarer Energien, z. B. in Abhängigkeit der Integration in das Strom- und Gasnetz oder des Potenzials verfügbarer Kohlendioxid-Quellen
- Entwicklung von Einbindungskonzepten und Zugangsbedingungen zum Strom- und Gasnetz
- Untersuchung der Aufnahmekapazitäten von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz,

- regional aufgelöst und in Zusammenhang mit Stromnetzengpässen, und Entwicklung von Techniken zur Erhöhung der Aufnahmekapazitäten
- Entwicklung von Betriebs- und Regelkonzepten für chemische Speichersysteme
- Untersuchung der Rolle von chemischen Speichern in optimierten Energiekonzepten
- mit erneuerbarer Vollversorgung von Deutschland, Europa und der Mittelmeerregion
- Wirtschaftlichkeitsanalyse und Optimierung von chemischen Speichersystemen unter Berücksichtigung der Jahreslaststunden sowie positiver und negativer Regelernergie
- Untersuchung der Chancen und Risiken der Methannutzung im Mobilitätssektor

3.3.3 Forschungsbedarf Photoelektrochemische Energiewandlung

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Bereitstellung der lichtinduzierten Wasserspaltung aus Wasser
- Bereitstellung stabiler Katalysatoren und Elektroden für die Elektrolyse von Süßwasser und Meerwasser
- Nutzung biomimetischer Konzepte wie z. B. organische, anorganisch oder Hybrid-Systeme zur Entwicklung wasserspaltender Membranen
- Bereitstellung neuartiger, edelmetallfreier Katalysatoren für die Wasserelektrolyse

Forschungsthemen

- Entwicklung und Untersuchung energie-wandelnder Oberflächen, Strukturen und Architekturen zur lichtinduzierten Wasser-

spaltung an Modellsystemen, Entschlüsselung der elementaren Reaktionsschritte bei der Wasseroxidation und -eduktion

- Erarbeitung allgemein gültiger Kriterien zur maßgeschneiderten Katalysatorentwicklung
- Entwicklung effizienter und langzeitstabiler Systeme für die lichtinduzierte Wasserspaltung
- Identifizierung von preisgünstigen Solarzellenstrukturen mit in der Oberfläche des Halbleiters integrierten Nanoteilchen, die chemisch gebunden an der Grenzfläche katalytisch aktiv sind
- Entwicklung photoelektrochemisch und photoelektrokatalytisch aktiver Elektroden für die Erzeugung von Wasserstoff aus Süßwasser und Meerwasser

Bei der photoelektrochemischen Energieumwandlung wird Sonnenlicht als chemische Energie gespeichert. Dies geschieht durch eine direkte Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff, die einen hohen Energieeinsatz erfordert. Um ein Kilogramm Wasserstoff zu erzeugen, werden bei 25 °C 141,8 MJ benötigt, was einer Strommenge von 39,4 kWh pro kg Wasserstoff entspricht. Unter Einsatz eines Elektrolyseurs mit einem Wirkungsgrad von 80 % müssen etwa 50 kWh pro kg Wasserstoff aufgewendet werden. Legt man einen niedrigen Strompreis von 5 €ct/kWh zugrunde, ergibt sich ein Preis von 2,50 € pro kg Wasserstoff. Um den notwendigen Energieeinsatz und damit die Kosten der Wasserspaltung signifikant zu senken, wird die Realisierung der direkten Wasserspaltung mit Hilfe von katalytischen Verbindungen erforscht, die eine langfristig vielversprechende Möglichkeit der Wasserstoffherzeugung darstellt.

Bei der Umwandlung von Kohlendioxid und Wasser in Sauerstoff und Kohlenwasserstoffe im Prozess der natürlichen Photosynthese spielen häufig vorkommende Metalle in Ca-Mn-, Fe-Fe- bzw. Fe-Ni-Clustern, die sich innerhalb organischer Verbindungen befinden, eine entscheidende Rolle. Diese metallorganischen Strukturen haben die Funktion einer Membran, wodurch sie in der Lage sind, mehrere Elektronen gleichzeitig zu übertragen, Protonen und Elektronen zu trennen und dadurch Sauerstoff und Wasserstoff zu erzeugen.

Künstliche Systeme verwenden zur Wasserspaltung photovoltaische Strukturen, um über Photonenanregung Elektronen zu erzeugen, die mit Hilfe von Katalysatoren Wasser direkt in Wasserstoff und Sauerstoff aufspalten. Dafür muss ein System realisiert werden, das monolithisch aufgebaut ist und aus einer Licht absorbierenden und



Ladungsträger erzeugenden photovoltaischen Struktur besteht, die an den Oberflächen eine ausreichend hohe Spannung liefert, um Wasser am Front- und Rückkontakt in Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen. Als Katalysatoren werden bislang Platin, Ruthenium- oder Iridiumoxid eingesetzt, die allerdings selten und teuer sind.

Ein wichtiges Forschungsziel ist deshalb die Imitation der sogenannten Thylakoidmembran der Pflanzen, das heißt die Entwicklung einer künstlichen, Wasser spaltenden Membran, die die direkte Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff durch Sonnenlicht bewerkstelligt. Diese biologisch inspirierten Forschungsansätze erfordern eine langfristige Grundlagenforschung.

Die Arbeiten zur Entwicklung von Systemen zur Licht-induzierten Wasserspaltung unter Kombination und elektrischer Kopplung photovoltaischer Systeme mit Polymer-Elektrolyt-Membran(PEM)-Elektrolyseuren sind auf einem erfolgreichen Weg. Ziel ist die Entwicklung eines photokatalytischen Systems zur Wasserspaltung unter Verwendung von Solarzellenstrukturen, deren Wirkungsgrad bei der Katalyse nahe dem Wirkungsgrad der photovoltaischen Zelle liegt.

Alternative anorganische Katalysatoren, die Platin und Ruthenium nicht nur im PEM-Elektrolyseur, sondern auch in der PEM-Brennstoffzelle bei vergleichbarer katalytischer Effizienz ersetzen könnten, sind Übergangsmetalle wie Zirkonium, Eisen und Cobalt. Große Forschungsanstrengungen sind jedoch notwendig, um die bisher erzielten Wirkungsgrade mit diesen billigen und leicht verfügbaren Materialien um einen Faktor von 5 bis 10 zu steigern. Denn der Einsatz von Platin und Ruthenium ist nicht nur wegen des Preises, sondern auch wegen der limitierten Fördermengen von z. B. 180 t/a bei Platin begrenzt, die nicht einmal ausreichen würde, 5% der in Deutschland fahrenden Automobile mit Brennstoffzellen beziehungsweise den dafür notwendigen Elektrolyseuren auszurüsten.

Die katalytischen Eigenschaften der Übergangsmetalle können überproportional verbessert werden, wenn man die Struktur der Katalysatoren immer feiner macht, also seine reaktive Oberfläche deutlich erhöht. Dies zielt in eine nanostrukturelle Richtung.

Erste Erfolge konnten mit der photoelektrochemischen Energieumwandlung erzielt werden. Am Fraunhofer ISE wurde unter Kopplung einer Konzentrator-Solarzelle mit einem PEM-Elektrolyseur ein Wirkungsgrad von 18 % realisiert. Am Helmholtz-Zentrum für Materialien und Energie konnte eine stabile InP-In₂O₃-Rh-Photoelektrode entwickelt werden, die mit einem Wirkungsgrad von 14,5 % Wasserstoff aus Wasser erzeugt.

Auf dem Gebiet der Licht-induzierten Wasserspaltung mit Photovoltaik und Elektrokatalyse nimmt Deutschland eine führende Stellung ein. An der Erforschung biomimetisch organischer Systeme auf Grundlage der Photosynthese arbeiten weltweit mehr als 150 Gruppen. Das Helmholtz-Zentrum Berlin konnte auf dem Gebiet biomimetisch anorganischer Systeme bereits Wirkungsgrade von über 3 % demonstrieren. Auf diesem Gebiet existieren in Deutschland vielfältige Kooperationen mit:

- Light2Hydrogen (LIKAT Rostock)
- bio-H₂ (Basics for a biotechnological and biomimetic approach for hydrogen production; Koordination Universität Bochum)
- Exzellenzcluster UNICAT (Unifying Concepts in Catalysis) (Koordination TU Berlin); an TU-, FU-, HU-Berlin und am MPG-FHI werden an biomimetischen und bioanorganischen Konzepten geforscht bis hin zu Gen-modifizierten Blaualgen zur Wasserstoffentwicklung aus Wasser
- H₂ Nanosolar (Koordination Helmholtz Zentrum Berlin)

Diese Forschungsaktivitäten erschließen die Möglichkeit, langfristig mit aus erneuerbaren Energien erzeugten chemischen Energieträgern fossile Brennstoffe zu ersetzen. Neben grundlegenden wissenschaftlichen Fragestellungen ist dabei auch stets die Frage der Verfügbarkeit und des Kostenaufwands bei der Herstellung zu berücksichtigen.

3.3.4 Forschungsfelder Photoelektrochemische Energiewandlung

3.3.4.1 Forschungsfeld allgemein (anorganische Systeme)

- Entwicklung von Elektrolyseur – Photovoltaik – Systemen mit einem Wirkungsgrad von 80 %
- Entwicklung eines monolithischen Systems durch Ankopplung von katalytischen Zentren an ein photoaktives System

- Entwicklung von photoelektrokatalytischen Elektroden auf der Basis von Silizium-, III-V- und Chalkopyrit-Photovoltaikstrukturen
- Entwicklung neuartiger Konzepte zur Stabilisierung von Halbleiter-Elektrolyt-Grenzflächen, z. B. durch ultradünne Oxidschichten und neuartige Architekturen von katalytisch und optisch aktiven Nanoteilchen
- Entwicklung von Dimensions-Stabilisierten-Anoden (DSA) auf der Basis von Übergangsmetall-Oxiden, -Nitriden, -Carbiden und -Sulfiden zur Wasseroxidation (Oxygen Evolution Reaction, OER)
- Entwicklung edelmetallfreier Katalysatoren für die Wasseroxidation (OER) an der Anode und der Wasserreduktion (Hydrogen Evolution Reaction (HER) an der Kathode

3.3.4.2 Grundlagenforschung

Kostenreduktion

- Identifizierung von preisgünstigen Solarzellenstrukturen (zurzeit Konzentrazorzellen und Tandemstrukturen) mit Katalysatoren, die an der Elektrode chemisch gebunden an der Grenzfläche Elektrode – Elektrolyt aktiv sind

Ladungsträgerdynamik an der Grenzfläche Elektrode – Elektrolyt

- Entwicklung einer Theorie zum Mehrelektronentransfer (OER)
- Untersuchung der Struktur der Helmholtz-Doppelschicht nahe pH 7
- Untersuchung langreichweitiger Ladungstransferprozesse (Förster-, Dexter-Transfer)

Katalysatoren

- Stabilisierung von Katalysatoren durch Wechselwirkung Substrat – Katalytisch aktives Teilchen/Molekül (Dimensionally Stabilized Electrodes)
- Einfluss von nanoskaligen Strukturen auf den Wirkungsgrad katalytischer und photokatalytischer Prozesse

3.3.4.3 Vorlauftforschung

- Ermittlung des Stands der Forschung
- „Material-Screening“ zur Identifizierung vielversprechender Systeme

3.3.4.4 Angewandte Forschung

- Erstellung von Prototypen und deren Test
- „Upscaling“ von Laborsystemen
- Kostenreduktion durch Einsatz alternativer Materialien
- Herstellung effizienter und langzeitstabiler Systeme für die lichtinduzierte Wasserspaltung



3.4 Elektrochemische Speicher

3.4.1 Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Kostengünstige Batteriesysteme in der Serienproduktion
- Systeme mit hoher Energie- und Leistungsdichte
- Lange zyklische und kalendarische Lebensdauer
- Erweiterung Betriebstemperaturbereich
- Kurze Lade- und Entladezeiten
- Hohe Sicherheitsstandards

Forschungsthemen

- Weiterentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien
- Entwicklung von Batteriesystemen der übernächsten Generation
- Entwicklung von Superkondensatoren
- Weiterentwicklung von Redox-Flow-Batterien

Übersicht Forschungsbedarf

Der elektrochemischen Stromspeicherung in Batterien kommt eine entscheidende Bedeutung in einer zukünftigen Energiewirtschaft zu, da sie aufgrund ihres hohen Energiewirkungsgrades optimal zur kurzfristigen Pufferung von fluktuierenden regenerativen Stromquellen wie Photovoltaik oder Windenergie geeignet sind. Sie fangen Spannungsschwankungen ab und erlauben die Nutzung netzunabhängiger Bauelemente. Die zurzeit massiv vorangetriebene Entwicklung von Batteriefahrzeugen ermöglicht Mobilität auf der Basis elektrischer Energie und eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, diese als dezentrale Stromspeicherwerk („Vehicle-to-Grid“) einzusetzen.

Zuverlässige, langlebige und sichere Speichersysteme sind eine Voraussetzung für ihren erfolgreichen Einsatz im Bereich von stationären elektrischen Energiesystemen, in Elektro- und Hybridfahrzeugen und in portablen Anwendungen. Die heute eingesetzten großskaligen Batteriesysteme, die von einigen 10 kWh für Batteriefahrzeuge bis einige 10 MWh für Batteriespeicherwerke reichen, beruhen auf Zellen mit relativ geringer Energiedichte auf Basis Nickel-Metallhydrid, Nickel-Cadmium, Blei-Säure und Natrium-Schwefel. Kleinskalige Batteriesysteme für portable Anwendungen im Bereich von einer bis 100 Wh für Handys, Laptops etc. sind dagegen in den letzten 10 Jahren durch den nahezu vollständigen Übergang auf Lithium-Ionen-Zellen hoher Energiedichte geprägt.

Die Herausforderung der aktuellen Batterieentwicklung ist die Übertragung dieser so genannten „Lithium-Revolution“ auf großskalige industrielle Batteriesysteme. Der dazu notwendige Forschungs- und Entwicklungsbedarf umfasst die Entwicklung von kostengünstigen Speichern mit hoher Energie- und Leistungsdichte sowie langer Lebensdauer. Dazu ist eine Intensivierung der Forschung im Bereich Materialien und Zellchemie für elektrochemische Energiespeicher notwendig. Sehr hohe Energiedichten können mit Speichersystemen der übernächsten Generation wie z. B. Metall/Luft- oder Metall/Schwefel-Batterien erreicht werden.

Intensive Forschungsarbeiten sind auch nötig, um ein optimales Zusammenspiel von elektrochemischen Speichern und anwendungsbezogenen Energiesystemen zu entwickeln. Die elektrochemische Stromspeicherung in Hybrid-Systemen, die unterschiedliche Speichertechnologien kombinieren, kann je nach Anwendung zu einem optimalen Verhältnis von Energie und Leistung sowie von Lebensdauer und Kosten führen. Mit Redox-Flow-Batterien werden zudem weitere Alternativen für den Einsatz in stationären Anwendungen entwickelt. Diese sind elektrochemische Energiewandler mit flüssigen und pumpfähigen aktiven Speichermedien. Leistung und Energiespeicherkapazität sind dadurch unabhängig voneinander skalierbar und ermöglichen auf die Anwendung zugeschnittene Lösungen.

3.4.2 Forschungsfelder

3.4.2.1 Grundlagenforschung

Batteriesysteme der übernächsten Generation

Die Herausforderung besteht in der weiteren Erhöhung von Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer und Sicherheit. Daraus ergeben sich folgende Forschungsaufgaben:

- Entwicklung von Lithium-Luft- oder Lithium-Schwefel-Zellen, theoretisch können sehr hohe Energiedichten erzielt werden, eine Steigerung der Energiedichte um einen Faktor 2–5 im Vergleich zu heutigen Lithium-Ionen-Zellen scheint möglich zu sein
- Hybridsysteme mit hoher Leistungs- und Energiedichte, bei denen Superkondensator- und Batteriefunktionalitäten makroskopisch oder mikroskopisch kombiniert und aufeinander abgestimmt sind, die Entwicklung entsprechender Elektroden findet heute im Labormaßstab statt

Der Entwicklungshorizont beträgt 10–20 Jahre, für Hybridkonzepte 2–5 Jahre.

3.4.2.2 Vorlaufforschung

Lithium-Ionen-Batterie der nächsten Generation

Energie- und Leistungsdichte sollen erhöht, die Lebensdauer und Sicherheit verbessert und die Kosten reduziert werden. Daraus ergeben sich folgende Forschungsaufgaben:

- Entwicklung und Optimierung von kostengünstigen Kathoden-, Anoden- und Elektrolytmaterialien für Zellen mit hoher spezifischer Kapazität und für Hochvoltssysteme
- Entwicklung von Batterieelektroden mit inhärenter Sicherheit gegenüber „thermal runaway“ von Zellen
- Erhöhung der Sicherheit durch neue Separatoren und Zelldesigns
- Verbesserung der kalendarischen und zyklischen Lebensdauer sowie Erforschung und Modellierung der Alterungsphänomene

Superkondensatoren

Aufgabe ist die Weiterentwicklung und gezielte Optimierung von Materialien hoher Speicherkapazität, eine hohe Dynamik des Superkondensator-Speichers (Lade- und Entladegeschwindigkeit) und eine gute Langzeitstabilität der Komponenten und Systeme. Daraus ergeben sich folgende Forschungsaufgaben:

- Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien und eine enge Abstimmung von Materialsynthese, struktureller und elektrochemischer Charakterisierung
- Synthese und Untersuchung neuer Hybridmaterialien für Superkondensatoren, die auf mikroskopischer Ebene sowohl Batterie- als auch Kondensatoreigenschaften zeigen
- Optimale Auslegung der Speicherzelle bei der Entwicklung vom Material zum Bauelement, um die Eigenschaften des Speichermaterials möglichst vollständig umsetzen zu können

Redox-Flow-Batterien

Um ein optimiertes Stackdesign zu entwickeln sind folgende Forschungsaufgaben erforderlich:

- Optimierung der eingesetzten elektrochemisch aktiven Materialien und des Elektrolyten durch Einsatz organischer Materialien, die die Zellspannung und Energiedichte erhöhen; Erhöhung der Löslichkeit und damit der maximalen Energiedichte durch Modifikation des Elektrolyten durch Zugabe geeigneter Komplexbildner

3.4.2.3 Angewandte Forschung

Batteriesystemtechnik

Batteriemodule und Batteriesysteme für stationäre und mobile Anwendungen sollen durch folgende Forschungsaufgaben entwickelt werden:

- Entwicklung des Modulbaus und der Fertigung von Batteriesystemen zur Realisierung eines kostenoptimierten, hochautomatisierten Produktionsprozesses von der Zelle bis zum System
- Entwicklung eines optimierten Zell- und Moduldesign sowie optimierter Batteriesysteme inklusive Batteriemangement (Wärme- und Kühlmanagement, Alterungsmechanismen je nach Betriebsweise), Entwicklung von Systemkomponenten, die ein sicheres System ermöglichen
- Entwicklung geeigneter Lade- und Entladestrategien, die auch Schnellladefähigkeit ermöglichen
- Analytische Untersuchung und Simulation von Batterien und Systemkomponenten, Charakterisierung des Systemzustandes, z. B. von Ladezustand und Alterung für verschiedenste Batteriesysteme mit teils komplexen Charakteristiken, Realisierung einer zuverlässigen Lebensdauerprognose, sowie Entwicklung von



virtuellen Batterien und -systemen zur Entwicklung von Bordnetzen und -schnittstellen

- Detaillierte Untersuchung der potenziellen Nutzung der Fahrzeugbatterie z. B. in Bezug auf Ladeschnittstelle und Alterungseffekte für die Rückspeisung von Strom ins Netz („Vehicle-to-Grid“)
- Entwicklung von Alterungsmodellen im System, Modellen zur Simulation eines Batteriesystems in einer Anwendung und thermische und elektrische Modellierung zur Analyse und Optimierung

Sicherheit

Es sollen hohe Sicherheitsstandards für Batterien etabliert werden, vor allem für den Einsatz in Elektrofahrzeugen. Daraus ergeben sich folgende Forschungsaufgaben:

- Untersuchung des Verhaltens von Energiespeichersystemen unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie bei Fehlbedienung und in Unfallsituationen
- Sicherheitsüberwachung für alle denkbaren Betriebszustände und Fehlerfälle auf Basis von umfangreichen und sehr speziellen Prüfeinrichtungen wie z. B. elektrische, mechanische und thermische Tests auf der Basis bestehender oder noch zu entwickelnder Normen und Prüfvorschriften
- Sicherheitsrelevante Untersuchungen an Komponenten und Systemen
- Entwicklung von Algorithmen zur fortgeschrittenen Fehlererkennung und Ausfallprognose in Zellen und Systemen

Redox-Flow-Batterien

Durch folgende Forschung sollen kostengünstige und zuverlässige Systemen im MWh-Bereich realisiert werden:

- Entwicklung und Aufbau von großen Stacks
- Optimierung des Batteriesystems in Bezug auf Anlagenaufbau, Tankkonzept und Verschaltung, Reduzierung des Leistungsbedarfs der Peripherie, Batteriemangement mit optimierter Betriebsführung, Lade- und Entladestrategien zur Erhöhung der Effizienz, Betriebsbereitschaft und Lebensdauer sowie Konzepte zur Integration in Photovoltaik- und Windparks

Sonstige Forschungsaufgaben

- Entwicklung geeigneter Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit der wichtigsten Rohstoffe wie z. B. Kobalt und eventuell Lithium
- Technikfolgenabschätzungen und Lebenszyklusanalysen der wichtigsten zukünftigen Lithium-Batterien

3.5 Thermische Speicher

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Thermische Energiespeicher mit hoher Energiedichte, Zuverlässigkeit und Lebensdauer
- Angepasste Speichertechnik für unterschiedliche Wärmeträgerfluide (Kältemittel, Wasser, Dampf, Thermoöl, Flüssigsalz, Luft) für 0 °C bis 1000 °C im 100 kW bis 100 MW-Maßstab
- Spezifischen Investitionskosten unter 40 € pro kWh thermische Speicherkapazität
- Reduzierung der Gesamtkosten für Herstellung, Betrieb und Entsorgung pro kumulierter kWh auf 1–0,5 €/kWh

Forschungsthemen

- Optimierung von saisonalen Wasserspeichern aller Größen in Bezug auf Kosten, Temperaturschichtung, Be- und Entladeeinrichtungen und Wärmeverluste
- Entwicklung von Speichermedien mit hoher Energiedichte und geringen Kosten
- Entwicklung von multifunktionalen Materialien für Wärmetransport und -speicherung
- Neue Speicherkonzepte wie z. B. Hybridkonzepte aus sensiblen und latenten Speichern, mikroverkapselte PCM-Materialien sowie Sorptions- und thermochemische Wärmespeicher
- Entwicklung von effizienten Verfahren zur Wärmeein- und -auskopplung in neuen Speicherkonzepten
- Entwicklung von Wärmeträgerfluiden auf Basis von PCM-Slurries
- Effiziente Lösungen zur Speicherintegration
- Erprobung neuer Speicherkonzepte in anwendungsnahen Pilotanlagen

Einfache Wärmespeicher mit Wasser als Wärme Speichermedium und einem relativ kleinen Speichervolumen stehen in jedem Haus. Die Speicherung größerer Wärmemengen wird bislang durch die hohen Investitionskosten und die damit verbundenen relativ großen Volumina verhindert. Damit thermische Energiespeicher energiewirtschaftlich relevante Beiträge liefern können, müssen signifikante Verbesserungen in der Wärmespeichertechnik erzielt werden.

Kommerziell verfügbar und etablierte Technik sind Wasserspeicher für Niedertemperaturanwendungen zur Bereitstellung von Raumwärme, Trinkwarmwasser und Kälte. Die Vorteile sind die geringen Kosten und die Möglichkeit, Wasser als Speichermedium und Wärmetransportmedium zu nutzen, wodurch die Speicherintegration effizient realisiert werden kann. Einschränkungen beziehungsweise Nachteile des Wasserspeichers sind dann gegeben, wenn nicht Wasser als primäres Wärmeträgerfluid eingesetzt werden kann sondern z. B. Sole, Kältemittel, Luft oder Dampf eingesetzt werden müssen und wenn große

Speicherkapazitäten benötigt werden. Das sind im Wesentlichen Anwendungen für Speicher in solarthermischen Anlagen, für die Langzeitspeicherung oder solare Nahwärmesysteme.

Wasserspeicher haben einen Nachteil, wenn nur geringe Temperaturdifferenzen nutzbar sind, was vor allem bei Kälteanwendungen im Temperaturbereich kleiner 20 °C gegeben ist. Hier werden Temperaturspreizungen von oft nur 6 K genutzt. Obwohl bei Verwendung von Wasser oder Solen als Speichermedium große Speichervolumina nötig werden, werden bei Kälteanwendungen heute oft Wasserspeicher eingesetzt. Teilweise wird auch auf Eis zur Kältespeicherung zurückgegriffen. Damit arbeiten dann aber die verwendeten Kältemaschinen mit einer vergleichsweise geringen Effizienz, da sie Temperaturen bis -8 °C erzeugen müssen. Hier bietet sich der Einsatz von Latentwärmespeichern an, weil diese ihren Vorteil der großen Wärmekapazität bei kleinen Temperaturdifferenzen nutzen und mit ihren Schmelztemperaturen deutlich im positiven Temperaturbereich liegen können.



Für Hochtemperaturanwendungen im Bereich Prozesswärme werden zwei Speichertypen kommerziell eingesetzt. In der Stahl- und Kokserzeugung sowie Glasindustrie werden Regeneratoren mit keramischen Speichermaterialien zur Wärmerückgewinnung und Prozessluftvorwärmung bis 1.000 °C eingesetzt. Für Anwendungen mit diskontinuierlichem Prozessdampfbedarf werden Ruthhspeicher zur Bereitstellung von Spitzenlast-Dampf verwendet. Beide Speichertypen sind nur sehr eingeschränkt oder gar nicht auf andere Prozesswärmeanwendungen übertragbar. Für KWK-Anwendungen oder für den Einsatz im Kraftwerksbereich stellen sie keine wirtschaftlich darstellbare Lösung dar.

Die Reduzierung der Gesamtkosten für Herstellung, Betrieb und Entsorgung pro kumulierter kWh auf 1–0,5 €/kWh erfordert zusätzliche Forschungsanstrengungen, wird aber eine signifikant stärkere Marktdurchdringung in allen Wärme verbrauchenden Sektoren ermöglichen.

Energiewirtschaftlich relevante Anwendungen sind hierbei die solare Wärmebereitstellung, die Effizienzverbesserung industrieller Prozesse durch verbessertes Wärmemanagement und Abwärmennutzung, intelligentes Wärmemanagement bei KWK-Anlagen, ein verstärkter Beitrag solarthermischer Stromerzeugung im Bereich der Kraftwerkstechnik, die Erhöhung der Flexibilität fossiler Kraftwerke und die Realisierung von adiabaten Druckspeicherkraftwerken mit integriertem Hochtemperaturspeicher.

3.5.1 Forschungsbedarf

Charakteristische Merkmale thermischer Speicher sind die für die jeweiligen Anwendungen hochspezifischen Anforderungsprofile. Dementsprechend erfordert dieses Arbeitsgebiet den Umgang mit einem breiten Spektrum an Speichertechnologien, Materialien und Methoden. Weiterhin sind die Fragestellungen zur hocheffizienten Wärmeübertragung und Systemintegration gleichermaßen zu berücksichtigen. Um einen signifikanten Technologiesprung zu erzielen, sollten grundlegende und technologische Fragen der Speichertechnik in einem breiten wissenschaftlich-technischen und interdisziplinären Ansatz gemeinsam von Grundlagen- und angewandter Forschung bearbeitet werden.

Die wissenschaftlich-technischen Herausforderungen und übergeordneten Ziele für zukünftige thermische Speicher lassen sich zusammenfassen wie folgt:

- Reduzierung der Investitionskosten für Speicher
- Steigerung der Energiedichte
- Steigerung der Leistungsdichte
- Verbesserung der relevanten thermo-physikalischen Eigenschaften
- Steigerung der Energieeffizienz durch Verminderung von Wärmeverlusten und Exergieverlusten
- Verbesserung der Systemintegration

Für eine weitere Verbreitung dezentraler solarer Heizsysteme wird innerhalb weniger Jahre eine Steigerung des bislang heute üblichen solaren Deckungsanteils von 20 % bis 30 % auf über 50 % angestrebt, wozu der Einsatz teilsaisonaler Speichersysteme unabdingbar ist. Dazu können entweder Wasserspeicher mit einem großem Volumen von heute typischerweise 6 bis 10 m³ für ein Einfamilienhaus eingesetzt werden oder neuartige Speicher, die gegenüber den Wasserspeichern einen um den Faktor 5–10 höhere Energiedichte aufweisen könnten. Mit der erhöhten Energiedichte reduziert sich das Speichervolumen, was die Akzeptanz erhöhen würde, allerdings nur, wenn die Kosten dadurch nicht stark steigen.

Für solar unterstützte Nahwärmeversorgungssysteme mit großen Solaranlagen ist der Aspekt der Kostenreduktion der hierfür eingesetzten Langzeit-Wärmespeicher das zentrale Forschungsthema, da die derzeitigen Kosten der Speicher ca. 40–60 % der Investitionskosten der gesamten Anlage darstellen. Aufgrund der sehr großen Volumina von mehreren 1.000 m³ und der vergleichsweise geringen Kosten für das Speichermedium Wasser, wird dieses weiterhin das Speichermedium für diese Speicher bleiben. Die Kostenreduktion muss hier vor allem in der Konstruktion und im Wandaufbau stattfinden.

Viele technische Prozesse erfordern eine Energiezufuhr bei konstanter Temperatur, ein wirtschaftlicher Einsatz von Energiespeichern auf Basis von sensibler Wärme ist dabei vielfach nicht möglich. Nahe liegend ist hier die Nutzung von Latentwärme, die bei isothermen Phasenwechseln auftritt.

Wesentlich für die Entwicklung wirtschaftlicher Latentwärmespeichersysteme ist eine ausreichend hohe Lade- und Entladeleistung. Hierzu sind neuartige Latentmaterialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit mit einem Faktor 10–20 gegenüber den bisher verfügbaren organischen oder salzartigen Materialien oder geeignete Wärmeleitstrukturen zur Erhöhung der Wärme übertragenden Fläche erforderlich. Um den gesamten Temperaturbereich von Kälteanwendungen bis ca. 1.000 °C abdecken zu können, sind eine Vielzahl von Latentmaterialien mit angepassten Umwandlungstemperaturen und geeigneten Eigenschaften zu entwickeln. Hierbei liegt ein besonderer Bedarf im Hochtemperaturbereich, der bisher nur ungenügend bearbeitet worden ist.

Thermochemische Energiespeicher haben das Potenzial die Speicherdichte mit einem Faktor 10 gegenüber sensiblen Speichern und einem Faktor 3–5 gegenüber Latentwärmespeichern zu erhöhen. Weitere Vorteile sind die verlustarme und langzeitstabile Wärmespeicherung und damit die Eignung zur Langzeitspeicherung, die Realisierung hoher Entladeleistungen und die Eignung für den Wärmetransport. Weiterhin sind thermochemische Speicher zur Wärmetransformation geeignet, indem thermische Energie bei höherer Temperatur ausgekoppelt werden kann. Um die Basis für eine technologische Umsetzung zu schaffen, müssen für relevante Anwendungsbereiche die optimalen Reaktionssysteme identifiziert und die verfahrenstechnischen und wärmetechnischen Entwurfsgrundlagen entwickelt werden.

Die großmaßstäbliche Stromspeicherung in adiabaten Druckluftspeicherkraftwerken ist eine neue Technologie mit einem großen Potenzial, bei der der Wärmespeicher eine zentrale Komponente darstellt. Erst die Verwendung von großen Wärmespeichern erlaubt hier Anlagen mit hohen Stromspeicherwirkungsgraden von etwa 70 %.

Speichersysteme für mittlere und hohe Temperaturen sind innovative Komponenten in der Energietechnik, für deren Einsatz bisher kaum Erfahrungen vorliegen. Die Integration des Speichers in die Gesamtanlage ist von wesentlicher Bedeutung für die Effizienz des Systems. Da der Speicher sowohl mit einer Energiequelle als auch mit einem Energieverbraucher in Wechselwirkung steht, wird die Wirtschaftlichkeit stark von der

Betriebsstrategie beeinflusst. Daher werden leistungsfähige Auslegungswerkzeuge benötigt, mit deren Hilfe eine optimierte Anpassung des Speichersystems an die übrigen Anlagenkomponenten durchgeführt werden kann.

3.5.2 Forschungsfelder

3.5.2.1 Grundlagenforschung

Wesentliche Herausforderung ist die Entwicklung von Speichermedien mit überragenden thermophysikalischen Eigenschaften und von Verfahren, die hocheffiziente Wärmeübertragungseigenschaften erwarten lassen. Forschungsaufgaben sind:

- Erforschung von Speichermedien mit hoher Energiedichte und geringen Kosten
- Erforschung von Salzhydraten für Kälteanwendungen mit Schmelztemperaturen zwischen 0–20 °C
- Entwicklung von PCM-Materialien für den Temperaturbereich von 90–200 °C, z. B. Salze und Fettalkohole
- Entwicklung von mikroverkapselten PCM-Materialien auf Salzbasis für Anwendungen in Gebäuden von 5–90 °C und für Prozesswärmeanwendungen mit Temperaturen über 100 °C
- Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses von Unterkühlungsprozessen und Entwicklung von Keimbildnern
- Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses von PCM-Slurries
- Entwicklung von Stoffsystemen für reversible thermochemische Speicherreaktionen
- Entwicklung von Sorptionsmaterialien für Hochtemperaturanwendungen
- Entwicklung von multifunktionalen Materialien für Wärmetransport und Speicherung
- Entwicklung von Direktkontaktverfahren zur Wärmeein- und -auskopplung

3.5.2.2 Vorlaufforschung

Es ist der Nachweis der technischen Machbarkeit der in der Grundlagenforschung erzielten Ergebnisse und die Erarbeitung der erforderlichen Simulationswerkzeuge für die Auswahl und Bewertung neuer Speichermedien und Speicherkonzepte zu erbringen. Dies soll durch folgende Forschungsaufgaben erfolgen:

- Experimentelle Umsetzung neuer Speichermedien mit dem Nachweis der Langzeitstabilität



und der verbesserten wärmetechnischen Eigenschaften in relevanter Größenordnung

- Formulierung von PCM-Slurries auf Basis von Emulsionen, Screening von geeigneten Emulgatoren und Test auf Langzeitstabilität mit geeigneten Alterungsverfahren.
- Experimentelle Validierung neuer Wärmeträgerfluide wie z. B. PCM-Slurries und neuer Konzepte zur Wärmeein- und -auskopplung
- Entwicklung von hocheffizienten und kostengünstigen Wärmeübertragerkonzepten für den Einsatz in PCM-Speichern
- Experimentelle Validierung von Direktkontaktverfahren bei PCM-Speichern
- Nachweis der Machbarkeit von Sorptionspeichern und thermochemischen Wärmespeichern in Laboranlagen

3.5.2.3 Angewandte Forschung

Die experimentelle Validierung und ingenieurmäßige Umsetzung neuer Speicherkonzepte und Erarbeitung der erforderlichen Simulationswerkzeuge zur Komponentenauslegung erfolgt im Rahmen folgender Forschungsaufgaben:

- Ingenieurmäßige Umsetzung neuer Speicherkonzepte wie Hybridkonzepte aus sensiblen und latenten Speichern, mikroverkapselte PCM-Materialien sowie Sorptions- und thermochemischen Wärmespeichern im 100 kW-Maßstab
- Ingenieurmäßige Umsetzung neuer Wärmeträgerfluide
- Validierung von Direktkontaktverfahren und verbesserter Wärmeein- und -auskopplung im 100 kW-Maßstab
- Effiziente Lösungen zur Speicherintegration
- Entwicklung von Up-scaling-Konzepten
- Entwicklung von energieeffizienten Betriebs- und Regelstrategien
- Optimierung von Planung, Bau und Betrieb von Aquiferspeichern
- Entwicklung von Planungs- und Betriebsrichtlinien für Aquiferspeicher auf Basis der Erfahrungen aus vorwettbewerblichen Demonstrationsprojekten zur Standardisierung von Planung, Bau und Betrieb von Energieversorgungssystemen mit Aquiferspeichern

3.5.2.4 Anwendungsnahe Pilotanlagen und sonstige Forschung

Die Integration des Speichers in die Gesamtanlage ist von wesentlicher Bedeutung für die Effizienz des Systems. Da der Speicher sowohl mit einer Energiequelle als auch mit einem Energieverbraucher in Wechselwirkung steht, wird die Wirtschaftlichkeit stark von der Betriebsstrategie beeinflusst. Daher werden leistungsfähige Auslegungswerkzeuge benötigt, mit deren Hilfe eine optimierte Anpassung des Speichersystems an die übrigen Anlagenkomponenten durchgeführt werden kann. Forschungsaufgaben sind:

- Erarbeitung von Simulationswerkzeugen zur Systemintegration von Wärmespeichern
- Entwicklung von Fertigungsverfahren zur kostengünstigen Herstellung von Speichermedien und Wärmespeichersubkomponenten
- Erprobung in anwendungsnahe Pilotanlagen
- Optimierung von Speicherintegration und von Betriebskonzepten
- Demonstrationsprojekte zur Markteinführung der Speichermaterialien und Speicherkonzepte

4 Energieumwandlung

4.1 Elektrisch und thermisch angetriebene Wärmepumpen

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Steigerung der Jahresarbeitszahl, Kostenreduktion und Erhöhung der Langzeitstabilität
- Reduktion des Global Warming Potenzials der eingesetzten Kältemittel
- Verstärkte Nutzung der Wärmepumpen im Gebäudebestand

Forschungsthemen

- Komponenteoptimierung zur Erhöhung des Gütegrads und der Effizienz
- Neue Materialien bei thermisch angetriebenen Wärmepumpen
- Regelung und Steuerung komplexer Niedertemperaturnetze mit Wärmepumpen in Kombination mit anderen Wärmequellen
- Entwicklung von Systemen zur Ausrüstung von Bestandsgebäuden mit Wärmepumpen
- Konzepte zur Integration von fluktuierenden erneuerbaren Energien in Wärmepumpensysteme

Elektrische Wärmepumpen sind eine eingeführte und erprobte Technologie zur Wärmeversorgung, bei der in einem thermodynamischen Kreislaufprozess Umgebungswärme von einem niedrigen Temperaturniveau auf 30 bis ca. 60 °C angehoben wird. Als Umweltquellen werden vor allem das Erdreich (Sole/Wasser-Wärmepumpen), Grundwasser (Wasser/Wasser-Wärmepumpen) und die Außenluft (Luft/Wasser-Wärmepumpen) verwendet. In den letzten fünf Jahren konnten diese Systeme Wachstumsraten in Höhe von 50 % pro Jahr verzeichnen. Der Marktanteil von elektrischen Wärmepumpen beträgt zurzeit 90 %. 350.000 Systeme sind derzeit in Deutschland installiert, das sind 3,5 % aller Wärmeerzeuger. Nach wie vor sind ein Drittel der neuen Wärmepumpen erdgekoppelte Systeme (siehe auch Kap. 2.5). Die weniger effizienten Luft/Wasser Wärmepumpen weisen allerdings aufgrund der geringeren Investitionskosten steigende Marktanteile auf. In den letzten Jahren ist das jährliche Marktvolumen in Deutschland kontinuierlich auf einen Umsatz von über 930 Mio. Euro im Jahr 2008 angestiegen und es wurden ca. 34.500 erdgekoppelte und 28.000 Luft/Wasser Wärmepumpensysteme installiert. Technologisch werden in der Regel Scrollverdichter, die zum Teil regelbar sind, sowie elektronische Expansionsventile verwendet, hocheffiziente Pumpen setzen sich aktuell durch.

Thermisch angetriebene, d. h., vor allem direkt gasgefeuerte Wärmepumpen befinden sich im frühen Stadium des Markteintritts und werden voraussichtlich im Jahr 2012 beginnen, Heizkessel mit Brennwerttechnik abzulösen. Im Gegensatz zu den elektrischen Systemen werden dabei zwei Wärmequellen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt. Dies ist zum einen die Hochtemperaturquelle wie z. B. die Gasflamme, aber auch Abwärme oder Solarstrahlung, die als Antrieb des thermischen Prozesses dient und einen typischen Temperaturbereich von 80–150 °C umfasst. Zweitens wird wie bei der elektrischen Wärmepumpe eine Niedertemperaturquelle wie z. B. Erdsonde oder Luft benötigt. Diese kann im Fall einer thermischen Wärmepumpe systembedingt deutlich kleiner gewählt werden, was insbesondere im Bestand vorteilhaft sein kann.

Wesentliche Treiber für die Wärmepumpentechnologie sind die Vorteile hinsichtlich Energieeffizienz gegenüber der direkten Umwandlung von fossilen Energieträgern in Wärme, die Anknüpfung der Wärmepumpen an das Stromnetz und die Möglichkeit des monovalenten Betriebs im Gegensatz zur Solarthermie, die kurz- bis mittelfristig einen zweiten Wärmeerzeuger als Backup benötigt. Durch die stetige Verbesserung des Primärenergiefaktors für Strom aufgrund Effizienzsteigerung und steigender Anteile erneuerbarer

Energien in der Stromerzeugung wird der Vorteil von Wärmepumpen- gegenüber der Referenz-technologie Gas-Brennwertkessel zunehmend größer. Zudem bietet diese Wärmepumpentechnologie zusammen mit der dezentralen KWK die Option einer stromgeführten Wärmeversorgung.

Durch die Einbindung in das Lastmanagement können Wärmepumpen einen wichtigen Beitrag zur Integration fluktuierender erneuerbarer Energiequellen leisten. Technologische Herausforderung ist der Übergang auf natürliche Kältemittel sowie die Einbindung in Heizsysteme im Bestand. Auch die Möglichkeit, Wärmepumpen reversibel zu betreiben und damit dasselbe System zur Heizung im Winter und zur Kühlung im Sommer einzusetzen unterscheidet diesen Wärmeversorger von klassischen Brennern. Es ist zu erwarten, dass die Verbreitung der elektrischen Wärmepumpen kontinuierlich zunimmt und zusätzlich thermisch angetriebene, beispielsweise gasbefeuerte Wärmepumpen die heutigen Brennwert-Heizkessel als Standardgerät ablösen, wo ein Gasnetz zur Verfügung steht.

4.1.1 Forschungsfelder

4.1.1.1 Grundlagenforschung

Thermische Wärmepumpen

Der Einsatz von thermisch angetriebenen Wärmepumpen z. B. auf Basis der Adsorption von Wasser oder einem anderen Arbeitsmittel an einem porösen Feststoff zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme stellt eine vielversprechende Möglichkeit zur Senkung des Primärenergiebedarfs dar. Gleichzeitig stehen einem erfolgreichen Markteintritt noch zahlreiche technologische Herausforderungen und Hürden entgegen. Diese sind die Reduktion des theoretisch möglichen Wirkungsgrades durch Stoff- und Wärmetransportwiderstände sowie thermische Massen sowie die mangelnde Langzeitstabilität von Materialien und Verbundsystemen wie auch der Schlüsselkomponenten Verdampfer und Kondensator durch sogenannte „fouling Effekte“.

Forschungsaufgaben sind:

- Entwicklung von neuen Materialien, insbesondere von Verbundmaterialien und Kompositen mit erhöhter Arbeitsmittelaufnahme
- Entwicklung von Maßnahmen zur Erhöhung der Langzeitstabilität

- Weiterentwicklung von Schlüsselkomponenten wie Verdampfer, Wärmeübertrager- und Adsorberkonzepte
- Verringerung der Hilfsenergieverbräuche z. B. der elektrischen Pumpenergie
- Neue Konzepte zur Verbesserung des Stoff- und Wärmetransports durch Herstellung von Verbundstrukturen (Komposite)
- Neue Wärmeübertragerkonzepte für die Verdampfung des Arbeitsmittels sowie grundlegende Untersuchungen zum Siedeverhalten möglicher Arbeitsmittel sowie zum Langzeitverhalten unter besonderer Berücksichtigung von Ablagerungen und „fouling Effekten“

4.1.1.2 Vorlaufforschung

Herausforderung ist die Entwicklung von Komponenten zur Erhöhung des Gütegrades und damit der Effizienz bei Vereinfachung der Systemtechnik und damit einhergehender Kostensenkung sowie eine optimale Einbindung der Anlagen in das Energieversorgungssystem.

Thermische Wärmepumpen

- Optimierung des Verhältnisses zwischen aktiver und passiver thermischen Massen z. B. durch die Erhöhung der Wärmeübertrageroberfläche durch hochporöse Strukturen
- Entwicklung von Beschichtungstechnologien auf hochporösen Trägerstrukturen zur Verringerung des thermischen Widerstands sowie der Verbesserung der Langzeitstabilität
- Verbesserung der Wärmeübertragungsleistung durch Funktionsstrukturen, z. B. durch Oberflächenvergrößerung und Turbulenzstrukturen

Elektrische Wärmepumpen

- Optimierung der Wärmeüberträger und Einführung neuer Wärmeübertragungstechnologien wie z. B. Microchannel-Technologie und die Reduktion der luftseitigen Druckverluste durch elektrohydrodynamische Verfahren
- Reduktion der Kältemittelmengen, um auch brennbare Kältemittel kostengünstig einsetzen zu können
- Weiterentwicklung der Direktverdampfungsverfahren z. B. durch die Entwicklung von CO₂-Sonden und die Kombination mit ungedeckten Solarkollektoren
- Entwicklung von geregelten und ungeregelten Ejektoren für Kältemittel mit hohem und mittlerem Druckniveau zur Minimierung der Exergieverluste bei der Drosselung

- Weiterentwicklung der eingesetzten Kältemittel zur Reduzierung des GWP (Global Warming Potenzial) und Anpassung der Komponenten an dadurch teilweise transkritische Prozesse
- Einbindung verschiedener Quellen wie z. B. Solarthermie und Luft am Verdampfer
- Ermittlung der energiewirtschaftlich sinnvollen Speichergröße für das Wärmeversorgungssystem z. B. durch Nutzung von Warmwasserspeichern oder der nutzbaren Gebäudemasse
- Bewertung der energiemeteorologischen Abhängigkeit zwischen den zeitlich dynamischen Aufkommen an Wind- und Solarenergie und dem Bedarf an Wärme (und Kühlung)
- Bewertung des Kapazitätseffektes von Wärmepumpen (Einfluss auf die vorzuhaltende gesicherte Leistung) und der Rückwirkungen auf kombinierte Systeme mit KWK

4.1.1.3 Angewandte Forschung und Systemtechnik

Thermische Wärmepumpen

- Neue Systemkonzepte zur Verringerung der Hilfsenergie
- Erarbeitung neuer Fertigungstechniken der Einzelkomponenten wie auch des Gesamtsystems (Modularisierung, Gleichteilekonzepte)

Elektrische Wärmepumpen

- Weiterentwicklung der Komponenten zur Erhöhung des Gütegrads z. B. durch Nutzung neuer Wärmeübertragungstechnologien
- Entwicklung von Turbokompressoren kleiner Leistung für die Entwicklung von ölfrei betriebenen Kompressionswärmepumpen
- Entwicklung von Kompressoren mit regelbarer Leistung
- Entwicklung von reversiblen Wärmepumpen zur Kälteerzeugung im Sommer
- Entwicklung der regelungstechnischen Einbindungen der Anlagen (IKT, Schnittstellen, Protokolle etc.) und Design von multivariablen Reglersystemen
- Entwicklung von Systemen zur Ausrüstung von Bestandsgebäuden mit Wärmepumpen z. B. durch die Optimierung der Wärmepumpen für die Anforderung in Bestandsgebäuden und Entwicklung von Technologien zur Nachrüstung von Bestandsgebäuden mit Flächenheizungen mit niedrigen Vorlauftemperaturen

Einbindung der Wärmeversorgung in das Lastmanagement der Stromerzeugung

- Entwicklung optimierter Regelungs- und Steuerungskonzepte für komplexe Niedertemperaturnetze mit mehreren Wärmequellen wie z. B. Erdkollektoren, Luft, Solarwärme und Fernwärme und unter Einbindung weiterer Wärmeerzeuger wie z. B. Biomasse-BHKW, Stirling-Motoren und Solarwärme
- Entwicklung von Niedertemperaturübergabesystemen für Bestandsbauten
- Regelstrategien für Gebäude unter Berücksichtigung der Variabilität von erneuerbarer Energie und Umweltbedingungen wie z. B. der solaren Einstrahlung
- Entwicklung von bedarfsgerechten Speichertechnologien für die optimierte Nutzung von Energie aus regenerativer Stromerzeugung für den Wärmebedarf von Gebäuden unter Berücksichtigung der charakteristischen Bedarfsprofile für Raumheizung und Trinkwarmwasser
- Bewertung der energiemeteorologischen Abhängigkeit zwischen den zeitlich dynamischen Aufkommen an Wind- und Solarenergie und dem Bedarf an Wärme und Kühlung
- Bewertung des Kapazitätseffektes von Wärmepumpen und des Einflusses auf die vorzuhaltende gesicherte Leistung sowie der Rückwirkungen mit der KWK
- Entwicklung von Geschäftsmodellen für Lastmanagementanwendungen für Wärmepumpen unter Berücksichtigung des Lastfolgebetriebs, der Regelleistung und der Netznutzungsentgelte



4.2 Adsorptions- und Absorptionskühlung

Zielsetzungen

- Erhöhung der Leistungsdichte und thermischen Effizienz von Kältemaschinen bei geringen Antriebstemperaturen bis 70 °C
- Kompaktere und leichtere Anlagen mit erhöhter Leistungsdichte und Effizienz kleiner 20 kW
- Neue Prozesse, Kältemaschinen und Anlagen zur Nutzung von höheren und kombinierten Antriebstemperaturen
- Steigerung der Gesamteffizienz der thermisch angetriebenen Kühlsysteme auf einen elektrischen Wirkungsgrad (Kühlenergie pro eingesetzter elektrischer Hilfsenergie) von mindestens 10
- Standardisierung thermisch angetriebener Kühlsystemen bezüglich Konfiguration, Aufbau und Dimensionierung
- Verbesserung der Technik offener, thermisch betriebener Sorptionsprozesse sowie deren Integration in Energieversorgungsstrukturen

Forschungsthemen

- Neue Materialien und Stoffpaare für Adsorptions- und Absorptionskälteanlagen für niedrige Antriebstemperaturen
- Entwicklung von mehrstufigen Prozessen und Anlagen auch bei der Adsorption
- Effizienzsteigerung der Rückkühltechniken durch Reduktion des Hilfsenergie- und Wasserbedarfs sowie Reduktion der Schallemissionen
- Energetische Optimierung des Kälteerzeugungssystems durch die Entwicklung und den Einsatz von effizienteren Komponenten und einer intelligenten Steuerung
- Integration und Optimierung des Gesamtsystems Kälteerzeugung und -verbrauch
- Entwicklung neuer Systeme und deren optimierter Regelstrategien im Bereich der Flüssigsorption in offenen Prozessen

Übersicht

Forschungsbedarf

Die meisten Kühl- und Klimatisierungsanforderungen werden heute weltweit von elektrisch angetriebenen Kompressionskältemaschinen bedient. Thermisch angetriebene Absorptions- und Adsorptionsverfahren können jedoch eine Schlüsselrolle in der effizienten Energienutzung für Kühlungs- und Klimatisierungszwecke in Gebäuden spielen. Diese Techniken werden heute meist in Kombination mit Abwärme aus BHKWs, in Nah- und Fernwärmenetzen und mit solarer Wärme eingesetzt. Die meisten in den letzten 20 Jahren installierten Systeme wurden im Rahmen von Forschungs- und Demonstrationsvorhaben installiert. Bei der Betrachtung des Kühlbedarfs ist zwischen zwei Anwendungsfeldern zu unterscheiden:

Kälte für industrielle Zwecke, speziell in Lebensmittelsektor. Hier sind Temperaturen von -30 °C bis 20 °C erforderlich. Dieser Bereich wird traditionell mit großen Kompressionskältemaschinen mit Wirkungsgraden zwischen drei und sechs bedient. Thermisch angetriebene Systeme für diese Anwendung sind geschlossene Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschinen. Um die

erforderlichen tiefen Temperaturen zu erreichen sind jedoch auch hohe Antriebstemperaturen größer 150 °C erforderlich.

Kälte zur Klimatisierung von Gebäuden. Hier muss zwischen zwei Aufgaben unterschieden werden: Anlagen zur sensiblen Kühlung und Anlagen zur vollständigen Luftaufbereitung bezüglich Temperatur und Feuchte. Während in den USA und Asien die Raumklimatisierung zur Standardausstattung von Gebäuden gehört, ist dies in Europa noch ein relativ kleiner, allerdings stark wachsender Markt. Bedient wird dieser Markt zum Teil durch eine Vielzahl von kleinen Split- und Multi-Split-Klimageräten mit Wirkungsgraden zwischen 2,5 und 3. Große Anlagen erreichen Wirkungsgrade zwischen 5 bis 6. Bei den thermischen Prozessen kommen sogenannte offene und geschlossene Prozesse zur Anwendung.

Bei den offenen Systemen (sorptionsgestützte Klimatisierung SGK) wird Luft direkt durch Sorptionsprozesse entfeuchtet und anschließend über Verdunstungsprozesse gekühlt. Mit Hilfe einer zentralen Lüftungsanlage kann hiermit

entweder direkt (Entfeuchtung und Kühlung der Zuluft) oder indirekt (Konditionierung der Abluft und Übertragung der Kälte über einen Wärmetauscher an die Zuluft) Wärme aus dem Gebäude abgeführt werden. Bei geschlossenen Verfahren wird Kaltwasser zur Verfügung gestellt mit dem gegebenenfalls die Luft durch Kondensation entfeuchtet werden kann. Weiterhin sind raumseitig unterschiedliche Kälteverteilsysteme wie z. B. Ventilatorconvektoren, Kühldecken und -flächen üblich, die sich in der Kaltwassertemperatur unterscheiden. Für all diese Anwendungen sind im Allgemeinen nur moderate Antriebstemperaturen unter 100 °C erforderlich.

Bei den geschlossenen thermischen Kälteverfahren kommen zwei Technologien zum Einsatz:

Flüssigsorption (Absorption): Das effizienteste Arbeitspaar ist eine Wasser/wässrige Lithiumbromidlösung. Erstgenanntes ist das Kältemittel, zweitgenanntes der Sorbens. Durch den Einsatz von Wasser als Kältemittel ist die Anwendung auf den Einsatz von Temperaturen bis um 0 °C beschränkt. Diese Anwendung eignet sich also nur zur Klimakälteerzeugung. Als weiteres Stoffpaar hat sich Ammoniak/Wasser etabliert. Hier können Temperaturen weit unter 0 °C erreicht werden, dafür müssen aber höhere Antriebstemperaturen und eine niedrigere Leistungszahl in Kauf genommen werden. Apparate mit Leistungen über 100 kW sind seit vielen Jahren erhältlich und im Einsatz, Anlagen im Leistungsbereich kleiner 20 kW wurden in den letzten 5–8 Jahren entwickelt.

Feststoffsorption (Adsorption, Chemiesorption). Feststoffsorptionskältemaschinen sind noch nicht so etabliert wie Flüssigsorptionskältemaschinen. Da hier ein aufwändiges Verfahren zur Wärmerückgewinnung beim Wechsel von Desorption und Adsorption eingesetzt werden muss, werden im Allgemeinen schlechtere Leistungszahlen erreicht als bei Wasser/Lithiumbromid. Hier wird noch viel im Bereich der Materialsuche geforscht. Zum Einsatz kommt bisher Wasser/Silikagel und Wasser/Zeolith zur Erzeugung von Klimakälte und Ammoniak/Aktivkohle beziehungsweise Methanol/Aktivkohle mit dem Potenzial zur Prozesskälte. Das Angebot an Anlagen beschränkt sich auf ein bis zwei Anbieter von Anlagen größer 70kW. In den letzten Jahren wurden jedoch auch

mehrere Prototypen und Kleinserien im Leistungsbereich kleiner 20 kW vorgestellt.

Offene Verfahren sind unter der Bezeichnung „**Sorptionsgestützte Klimatisierung**“ bekannt. Bei diesen Prozessen wird die Luft direkt durch Sorptionsprozesse entfeuchtet und anschließend gekühlt. Zur Anwendung kommen sowohl flüssige Sorbentien (meist Wasser/Lithiumchloridlösung beziehungsweise Wasser/Calciumchloridlösung) als auch feste Sorbentien (Silikagel, Lithiumchlorid). Anlagen mit festen Sorbentien sind schon viele Jahre im Einsatz, Sorptionsrotoren werden von mehreren Herstellern angeboten. Bei Anlagen mit flüssigen Sorbentien kann durch die Möglichkeit der Speicherung der konzentrierten Lösung eine Kühlung auch ohne gleichzeitig bereitstehende Antriebswärme gewährleistet werden. Des Weiteren sind aufgrund der besseren Möglichkeiten von Wärmerückgewinnungen im flüssigen Medium höhere Effizienzen des Gesamtprozesses möglich. Anlagen dieses Typs wurden schon erfolgreich demonstriert und erste Serienprodukte sind auf dem Markt. Allerdings ist die Zahl der Anbieter u. a. aufgrund noch ungelöster technischer Fragestellungen weltweit noch sehr begrenzt.

4.2.1 Forschungsfelder

Herausforderungen Produktentwicklung

- Entwicklung höherer thermischer Wirkungsgrade durch bessere Nutzung von höheren Antriebstemperaturen (Zwei- und Mehrstufigkeit)
- Erhöhung der Zuverlässigkeit
- Bessere Nutzung tiefer Antriebstemperaturen kleiner 70 °C, z. B. in Nahwärmenetzen
- Neue Verfahren zur Erzeugung von Prozesskälte kleiner 0 °C, z. B. durch neue Materialkombinationen
- Erhöhung der Leistungsdichte vor allem bei Anlagen kleiner Leistung

Herausforderungen im Bereich Systemoptimierung

- Steigerung des elektrischer Wirkungsgrads (Kälte pro eingesetzter elektrischer Energie) auf über 10
- Reduktion Primärenergiebedarf des Gesamtsystems inklusive Rückkühlung über bessere Systemauslegungen, hydraulische Optimie-

rung, Betriebsoptimierung und den Einsatz effizienterer Komponenten

- Standardisierung Design und Ausführung zur Reduktion der Auslegungs- und Installationskosten
- Konzentration auf die Nutzung von Abwärme (solare Wärme, Abwärme aus industriellen Prozessen, Abwärme bei Kraft-Wärme-Kopplung) und deren Einbindung in das Gesamtsystem
- Minimierung des fossil befeuerten Anteils bei solar unterstützten Systeme, welches die Entwicklung geeigneter Backup-Strategien bedingt.

4.2.1.1 Grundlagenforschung

Produktentwicklung

- Entwicklung von neuen, hochporösen Sorbentien für Adsorptionskälteprozesse wie z. B. metal-organic-frameworks (MOF) und neuer Stoffpaare für alternative Temperaturniveaus wie z. B. tiefe Antriebstemperaturen und Kältetemperaturen kleiner 0 °C
- Entwicklung von Beschichtungstechniken auf unterschiedlichen metallischen Trägerstrukturen zur Verbesserung der Wärmetransporteigenschaften
- Neue Wärmetauscherstrukturen für Adsorptionsreaktoren wie z. B. Fasern und Schwämme
- Neue Sorptionspaare für die Flüssigsorption wie z. B. ionische Flüssigkeiten
- Nanobeschichtungen in Wärmeübertragern zur Reduktion der hydraulischen Verluste, Micro-Fluid-Systeme für eine effektive Wärmeübertragung auf den Wärmeträger
- Entwicklung neuer, offener Flüssigsorptionsprozesse und -materialien mit erhöhter Speicherkapazität
- Entwicklung neuer Wärme- und Stoffüberträger durch neue Materialien und Geometrien für offene Flüssigsorptionssysteme
- Speichertechnologien und Speichermaterialien zur Verringerung des fossil betriebenen Antriebs der thermischen Kälteverfahren

Systemoptimierung

- Entwicklung energieeffizienter Komponenten wie z. B. Pumpen, Ventile, Steuerung und Rückkühlung
- Entwicklung von Verfahren zur optimierten Betriebsführung von komplexen Kälte- und

Klimatisierungssystemen mit vielen Parametern und Einflussgrößen

- Erschließung neuer Kälteanwendungen für thermische Kälteverfahren, z. B. Trocknung landwirtschaftlicher Güter oder Kühlung von Rechenzentren und Laboratorien
- Entwicklung neuer Prozesse, Kältemaschinen und Anlagen zur Nutzung von höheren und kombinierten Antriebstemperaturen zur besseren Nutzung von Abwärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, beispielsweise steigert eine Kombination aus ein- und zweistufigen Anlagen die thermische Effizienz bei der Verbindung mit motorischen BHKWs durch die getrennte Nutzung von Wärme aus dem Abgas und dem Kühlwasser

4.2.1.2 Vorlaufforschung

Produktentwicklung

- Prüfung neuer Materialien und Verbundstrukturen auf Stabilität und Beständigkeit in Kältemaschinen
- Neue Prozesszyklen (zweistufig, mehrstufig, optimierte interne Wärmerückgewinnung) für geschlossene und offene Systeme

Systemoptimierung

- Entwicklung von Systemen zum Heizen und Kühlen mit thermisch angetriebenen Prozessen

4.2.1.3 Angewandte Forschung

Produktentwicklung

- Integration neuer Wärmetauscherkonzepte in komplette Anlagen
- Entwicklung neuer Kältemaschinen auf Basis neuer thermodynamischer Zyklen
- Entwicklung neuer kompakter Kältemaschinen mit signifikant höheren Leistungsdichten zur Bedienung des Kältebedarfs im Leistungsbe- reich kleiner 20 kW
- Entwicklung von Komponenten mit hohem Entfeuchtungspotenzial für offene Klimatisierungsanlagen, die für hohe Luftfeuchtigkeiten optimiert sind
- Entwicklung neuer, offener Sorptionsprozesse mit festen Sorbentien für Klimata mit hohen Feuchtigkeiten und Temperaturen wie z. B. gekühlte Sorptionsprozesse für tropische Klimata

Systemoptimierung

- Entwicklung hybrider Konzepte mit Integration thermisch und elektrisch angetriebener Prozesse (Kaskadierung, bivalente Systeme)
- Integration und Anpassung der Kältetechnik an die Bedarfsseite und an die jeweilige Wärmequelle bzgl. Temperaturniveau, -konstanz und Variabilität wie z. B. bei der Solarwärme
- Integration von Wärme- und Kältespeicher in die Kühlsysteme (siehe auch Kapitel 3.5) sowie Nutzung der Gebäude als Speichermasse (siehe auch Kapitel 5.1)
- Fortschrittliche Steuerungskonzepte für Komponenten und Systeme, z. B. durch Einsatz von fuzzy logic und selbstlernende, adaptive Systeme
- Systematische Analyse neuer, alternativer Rückkühlmöglichkeiten unter Berücksichtigung aller möglichen Wärmesenken wie z. B. Erdreich, Luft und Gewässer
- Entwicklung von Simulationsmodellen und -werkzeugen zur thermodynamischen Analyse von Systemen und zur Planungsunterstützung

3.2.1.4 Sonstige Forschungsaufgaben

Bewertung der Umweltverträglichkeit der eingesetzten Materialien, insbesondere neuer Sorptionsmaterialien.

4.3 Kraft-, Wärme-, (Kälte-)Koppelung

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Zunehmender Ersatz fossiler Kraftwerke durch KWK- und KWKK-Anlagen in allen Leistungsbereichen vom kW- bis zum MW-Kraftwerk
- Verfügbarkeit von wirtschaftlichen und zuverlässigen KWK-Anlagen im kleinen und mittleren Leistungsbereich für unkonventionelle Brennstoffe

Forschungsthemen

- Optimierung von KWK-Anlagen im Hinblick auf verwendbare Brennstoffe, hohe Stromkennzahl und lange Lebenserwartung

- Weiterentwicklung von Organic-Rankine-Cycle (ORC)- und Kalina-Anlagen zur Reduzierung der Antriebstemperaturen, Einsatz ungewöhnlicher Prozessfluide und optimierter Entspannungsmaschinen
- Entwicklung neuer kältetechnischer Sorptionsmaschinen für KWKK-Anlagen mit niedrigeren Antriebstemperaturen und Kosten
- Einbindung optimierter thermischer Speicher (siehe Kapitel 3.3 und 3.5) in KWK- und KWKK-Systeme
- Entwicklung von Markteinführungsstrategien von wirtschaftlichen KWK-Anlagen im Rahmen der energiewirtschaftlichen und sozioökonomischen Begleitforschung

Die Bundesregierung will bis 2020 die KWK-Stromerzeugung auf 25 % des Strombedarfs verdoppeln [IKEP 2007]. Gelingt dies bei ausreichend hohem primärenergetischen Gesamtnutzungsgrad, dann ist für die Hersteller von KWK-Anlagen, Planer und Kontraktoren ein hervorragender Platz im europäischen Wettbewerb möglich. Mehrere Studien zur Unterstützung der Erreichung dieses Ziels wurden publiziert [BKWK].

KWK-Anlagen gibt es mittlerweile in allen denkbaren Leistungsbereichen von 1 kW bis zu mehreren Megawatt elektrisch. Die KWK-Nutzung steht

bei Großkraftwerken meist in Verbindung mit Fernwärmesystemen, die vermutlich mittelfristig optimiert und teilweise sogar zurückgebaut werden müssen, weil der sinkende Wärmeverbrauch im Gebäudebereich solche „zentralen“ Strukturen immer unwirtschaftlicher werden lässt.

Obwohl KWK-Anlagen zur Zeit noch vorwiegend mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, ist in der Regel mit geringen technischen Anpassungen ein einfacher Umstieg auf regenerativ erzeugte flüssige Kraftstoffe, bis hin zu „Biomethan“ und Wasserstoff, möglich. Somit stellen KWK-Anlagen

bei der Umstellung der Energieversorgungsstruktur kein „Abschreibungshindernis“ dar, wie dies z. B. bei neu errichteten Kohlekraftwerken der Fall ist.

In einer Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft [DPG 2010] wurde die KWK gegenüber der zentralen Stromerzeugung mit Gas-GuD Anlagen und dezentraler Wärmebereitstellung über Kompressionswärmepumpen teilweise negativ bewertet. Dabei wurde jedoch nicht berücksichtigt, dass wir in unserem Energiesystem aus Klimaschutzgründen sehr schnelle Erfolge benötigen – diese lassen sich mit KWK Anlagen erreichen und diese sind ferner für einen späteren Brennstoffwechsel (fossil zu regenerativ erzeugte Brennstoffe) geeignet. Ferner lässt sich die strombetriebene Kompressionswärmepumpe z. B. in den meisten eng bebauten Altstadtbereichen kaum installieren und bestenfalls mit der energetisch ungünstigeren Wärmequelle Umgebungsluft betreiben.

Die KWK bietet viele Vorteile wie z. B. Netzstützung bei stark veränderlichem Leistungsangebot erneuerbar erzeugten Stroms durch dezentrale KWK, Verdrängung von primärenergetisch ineffizient erzeugtem Kohlestrom, Steigerung des primärenergetischen Nutzungsgrades von chemischen Energieträgern bei der Stromerzeugung durch gleichzeitige Wärmenutzung, Stromgewinnung durch Abwärmenutzung mit ORC- beziehungsweise Kalina-Anlagen sowie Kälteerzeugung aus KWK Abwärme durch Sorptionsanlagen.

4.3.1 Forschungsfelder

In der Forschung zu berücksichtigen sind KWK-Anlagen des gesamten Leistungsbereichs (Mikro, Mini und größer) mit allen möglichen Technologien: Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen (Forschungsfelder Brennstoffzellen siehe Kapitel 4.4), Stirling Maschinen, Mikrogasturbinen und Dampfaggregate.

4.3.1.1 Grundlagenforschung

- Entwicklung von ORC-Aggregaten im kleinen Leistungsbereich, die insbesondere für die kleinen bis mittleren Abwärmeströme geeignet sind
- Untersuchung und Entwicklung alternativer Arbeitsfluide für ORC-Aggregate
- Entwicklung von effizienten Entspannungsmaschinen für ORC-Aggregate

- Optimierung der Verbrennungsprozesse und Verbesserung der Rauchgasreinigung in mit Biomasse befeuerten KWK-Aggregaten

4.3.1.2 Angewandte Forschung

Verbrennungsmotoren

KWK-Technologie auf Basis Verbrennungsmotoren ist wegen der extensiven Motorenforschung für den Kfz-Bereich am weitesten entwickelt. Folgender weiterer Forschungsbedarf ist vorhanden.

- Entwicklung von Motoren mit kleinen Leistungen
- Prüfung und Optimierung neuer Motoren durch ausgedehnte Feldtests

ORC- und Kalina-Anlagen

ORC- und Kalina-Maschinen und -Anlagen sind insbesondere im Kleinstbereich (1 bis 30 kW und im Bereich von etwa 200 kW) zu erforschen und zu entwickeln.

- Untersuchen von Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und Kostenreduzierung
- Überprüfung der Praxistauglichkeit in Feldtests

Stirling Maschinen und Dampfaggregate

- Optimierung der Anlagen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer und Kostenreduzierung
- Durchführung von Feldtests zur Überprüfung der Praxistauglichkeit verfügbarer Anlagen

Mikrogasturbinen

- Optimierung der Brennkammer zur möglichst variablen Eignung für verschiedene Brennstoffe mit niedrigem Heizwert
- Optimierung der Turbinengeometrie sowie der Regelungskonzepte zur Effizienzerhöhung

4.3.1.3 Sonstige Forschungsthemen

- Untersuchung von Möglichkeiten zur Unterstützung der Markteinführung durch ordnungsrechtliche Maßnahmen
- Begleitende Forschung im Bereich Aus- und Aufbau von dezentralen Wärmenetzen (siehe Kapitel 3.2), Wärmespeichern (siehe Kapitel 3.5) und zur Integration dezentraler KWK-Anlagen in verteilte elektrische Netze (siehe Kapitel 3.1)

4.4 Brennstoffzellen

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Kostensenkung von Kern- und Systemkomponenten
- Erhöhung der Zuverlässigkeit unter typischen Einsatzbedingungen
- Erhöhung der Lebensdauer

Forschungsthemen

- Materialoptimierung hinsichtlich Kostenreduktion, Stabilität und Leistungsfähigkeit
- Verständnis und Verringerung von Degradationseffekten
- Reduktion des Systemaufwands und Optimierung von Betriebsstrategien

Beim Übergang zu einer hauptsächlich auf erneuerbaren Energien aufbauenden Energieversorgung werden Brennstoffzellen im Gesamtsystem eine wichtige Rolle spielen im stationären Einsatz zum Netzmanagement und in der Elektromobilität.

Netzmanagement: Zur Integration sehr hoher Anteile stark fluktuierender Stromquellen wie Windkraft und Photovoltaik sind zur Vergleichmäßigung der Stromerzeugung schnell regelbare Kraftwerke erforderlich, wie z. B. Gasturbinen in Kombination mit der Zwischenspeicherung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien. Auch wenn die Wandlungskette „erneuerbar erzeugter Strom → Elektrolyse → Speicherung/Transport von Wasserstoff → Brennstoffzelle → Strom“ vom Gesamtwirkungsgrad eher ungünstig ist, hat sie aufgrund der einfachen und nahezu verlustfreien Speicherung, der guten Transportmöglichkeit von Wasserstoff und der großtechnischen Realisierbarkeit auch große Systemvorteile. Hauptnachteile sind derzeit noch die hohen Kosten, auch bedingt durch starke Degradation der Komponenten.

Energetisch relevante Vorteile lassen sich jedoch schon heute aufgrund der bereits etablierten Erdgasinfrastruktur mit Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung und in dezentralen Kraftwerken erzielen, die bei Kraft-Wärme-Kopplung einen Gesamtwirkungsgrad von über 85 % aufweisen. Die Stromwirkungsgrade bei dezentralen Brennstoffzellen-Kraftwerken können mit bis zu 60 % die von modernsten GuD-Kraftwerken in der GW-Klasse übertreffen, aber aufgrund ihrer kompakten Bauweise direkt an eine Nahwärmenutzung angeschlossen werden. Brennstoffzellen für die Hausenergieversorgung oder als dezentrale

Kraftwerke befinden sich noch in der Feldtestphase, wobei von Seiten der Hersteller und der Fachöffentlichkeit jeweils ein signifikanter Markteintritt ab dem Jahr 2015 erwartet wird [Bon 2009].

Elektromobilität: Eine Abkehr von fossilen Energieträgern bedeutet zwangsläufig den Übergang zu elektrisch betriebenen Fahrzeugen. Für kurze Reichweiten werden dabei Batterie-Fahrzeuge zum Einsatz kommen, aufgrund des großen Batteriegewichtes und der langen Ladezeiten wird jedoch ein reiner Batteriebetrieb für lange Fahrstrecken schwer zu realisieren sein. Mit hoher Wahrscheinlichkeit werden deshalb Range-Extender zum Einsatz kommen, denn gegenüber Verbrennungsmotoren weisen Brennstoffzellen mit Elektromotoren einen wesentlichen Wirkungsgradvorteil auf. Wasserstoff-Brennstoffzellen bieten die Möglichkeit des lokal und bei einer regenerativen Wasserstoffherzeugung aus Wind- oder Solarstrom beziehungsweise Biomasse auch eines global emissionsfreien und nachhaltigen Verkehrs [Wie 2010]. Die führenden Automobilkonzerne haben vereinbart, ab dem Jahr 2015 einige 100.000 Brennstoffzellen-Fahrzeuge weltweit auf dem Markt einzuführen. Zusätzlich wurde von internationalen Automobilkonzernen, Gas- und Brennstoffversorgern in Aussicht gestellt, dass die notwendige Infrastruktur weltweit zunächst in Deutschland, noch vor Japan und den USA aufgebaut wird [Bon 2009].

Nischenmärkte: Brennstoffzellen für Freizeitaktivitäten etablieren sich bereits heute im Markt und Brennstoffzellensysteme in der Notstromversorgung, der Kleintraktion sowie dem Material-Handling befinden sich kurz vor dem Markteintritt. Brennstoffzellen bieten in einigen



Nischenmärkten besondere Alleinstellungsmerkmale gegenüber Batterien als Wettbewerbstechnologie. Diese beziehen sich vor allem auf die schnelle Betankung, die längere Netzunabhängigkeit durch die höhere Energiedichte und damit längeren Betriebszeiten bei kleinerem Bauraum und Gewicht [Zwe 2010].

Deutschland ist zusammen mit den USA, Kanada und Japan weltweit führend in der Brennstoffzellenforschung, Freizeit- und Notstromanwendungen sowie den relevanten Nischenmärkten [Zwe 2010]. Auch in Bezug auf mobile Anwendungen und dezentrale Kraftwerke nimmt Deutschland eine führende Stellung ein. Für Anwendungen in der Hausenergieversorgung folgen deutsche Unternehmen hinsichtlich des Technologiestands dicht auf die japanischen Aktivitäten. Die Ausgaben für Forschung und Entwicklung in den Wettbewerbsländern Japan und USA liegen bislang allerdings um ein Vielfaches höher als in Deutschland [VDMA 2010].

4.4.1 Forschungsbedarf

Die wesentlichen Herausforderungen zur Markteinführung von Brennstoffzellen bestehen in den derzeit noch hohen Kosten, den nicht einheitlich definierten Zulassungsverfahren und der noch nicht breit verfügbaren Wasserstoffinfrastruktur [Zwe 2010]. In den meisten Anwendungsfeldern entspricht auch die Systemlebensdauer noch nicht den Marktanforderungen.

4.4.2 Forschungsfelder

4.4.2.1 Grundlagenforschung

Materialoptimierung

Die Forschung zielt ab auf die Reduktion der Materialkosten bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsfähigkeit.

- Reduktion der Katalysatorbeladung, Erhöhung der Toleranz gegen Kontamination (CO, S, NH₃, ...)
- PEMFC: Verbesserung des Wassermanagements
- Entwicklung der Direkt Alkohol Brennstoffzellen
- Entwicklung neuartiger Elektrolyte für Hochtemperatur-Brennstoffzellen für Betriebstemperaturen bis 800 °C

Lebensdauererhöhung

Forschungsziele sind die Erhöhung der Zuverlässigkeit und der Langlebigkeit unter typischen Einsatzbedingungen:

- Detailliertes physikalisch-chemisches Verständnis der Degradationsmechanismen im realen Einsatz (Fehler- und Lebensdauerprognose)
- Entwicklung bildgebender Verfahren zur in- und ex-situ-Diagnostik von Brennstoffzellen und Stacks
- Entwicklung hybridisierter Komponenten
- Innovative Zell- und Stackkonzepte (z. B. für Dead-end-Betrieb oder Reformatbetrieb mit geringem Wasserstoffgehalt)
- Vergleichende Lebenszyklusanalyse mit Akkumulatoren

4.4.2.2 Vorlaufforschung

Erhöhung der Zuverlässigkeit

Forschungsziele sind Material- und Designverbesserungen sowie Optimierung der Betriebsstrategien bei gleichzeitiger Kostenreduktion.

- Entwicklung robusterer Materialien auf Basis der Erkenntnisse zur Degradation aus der Grundlagenforschung
- Entwicklung und Einsatz von Simulations-/Modellierungswerkzeugen zur quantitativen Beschreibung des Betriebs- und Alterungsverhalten (Multiskalenmodelle, Mehrphasenströmung, Modelle auf molekularer Ebene)
- Optimierung der Komponentendesigns, z. B. hinsichtlich des Wassermanagement bei PEM-Brennstoffzellen
- Untersuchung innovativer Regelungsstrategien, z. B. für Kaltstart, Betrieb unter heißen Umgebungsbedingungen und unterschiedlichen Feuchten
- Entwicklung von hocheffizienten Reformersystemen

4.4.2.3 Angewandte Forschung

Fertigungstechnik

Forschungsziel ist es, das Scale-Up von der Einzelstückfertigung zur Serienproduktion möglichst effizient zu erreichen.

- Entwicklung fertigungs- und montagefreundlicher Zell- und Stackkonzepte sowie kostengünstiger Fertigungs- und Montageverfahren
- Entwicklung von applikationsspezifischen Komponenten-, Zell- und Stacktestverfahren sowie Qualitätskennziffern, Aufbau und

Unterhalt von unabhängigen Testlaboratorien zur Qualitätssicherung

- Entwicklung von Wiederverwertungskonzepten als Komponente oder stofflich
- PEMFC: Fertigung von Bipolarplatten und schraubenloser Stackmontage unter Berücksichtigung der Demontage, Trennung und Recycling von Komponenten, korrosionsfeste, phosphorsäureresistente Bipolarplatten für Hochtemperatur PEMFC, Dichtungskonzepte vor allem für Hochtemperatur PEMFC

Balance of Plant

Zur Bereitstellung von wasserstofftauglichen und funktionsintegrierten Peripheriekomponenten sind folgende Forschungsaufgaben erforderlich.

- Entwicklung einer kostengünstigen und zulassungsfähigen Verrohrung und Verbindungstechnik
- Entwicklung von kostengünstigen und zulassungsfähigen Aggregaten zur Luft- und Brennstoffversorgung

4.5 Elektrolyse

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Verfügbarkeit verbesserter Materialien und Systeme
- Effizienzsteigerung, Lebensdauererhöhung und Kostenreduktion
- Einbindung in eine regenerative Energiewirtschaft, insbesondere im Rahmen der Energiespeicherung

Forschungsthemen

- Katalysator- und Membran-Materialentwicklung
- Technologische Weiterentwicklung der bestehenden Elektrolysetechnologien
- Systemtechnik inklusive Energiespeichersysteme

In einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energiewirtschaft wird Wasserstoff eine wesentliche Rolle im Verkehr, aber auch bei der Speicherung regenerativer Energien spielen (siehe auch Kapitel 3.4). Wasserstoff mit Hilfe von Strom aus erneuerbaren Energien zu erzeugen ist mittelfristig die sinnvollste Variante der Wasserstoffbereitstellung. Dies belegen z. B. die Analysen aller betrachteten Zukunftsszenarien im Rahmen der GermanHy-Studie zur Frage „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“ im Auftrag des Bundesverkehrsministeriums [BMVBS 2010].

Für die Wasser-Elektrolyse werden heute vor allem die auf Kalilauge als Elektrolyt basierende alkalische Elektrolyse (AEL) und die auf einer Protonen leitenden Polymermembran als Elektrolyt basierende PEM-Elektrolyse eingesetzt (Betriebstemperatur jeweils ca. 80 °C). Während heute die alkalische Elektrolyse vor allem in der zentralen Bereitstellung großer Wasserstoffmengen bis in den MW-Maßstab eingesetzt wird (Einzelstacks > 500 Nm³/h; Anlagen > 30.000 Nm³/h verfügbar), ist die PEM-Elektrolyse aufgrund des kom-

pakten Systemaufbaus, der hohen Leistungsdichten, aber auch aufgrund der hohen spezifischen Kosten insbesondere für kleinere, dezentrale Systeme interessant und bislang nur im kW-Maßstab (< 5 Nm³/h) verfügbar. Zur dezentralen Versorgung von Tankstellen wurden aber auch bereits größere PEM-Elektrolysemodule mit Produktionsraten von bis zu 30 Nm³/h demonstriert. Forschungsbedarf zu diesen Technologien besteht insbesondere noch hinsichtlich der Effizienzsteigerung, Lebensdauererhöhung und Kostensenkung mittels verbesserter Katalysator- und Membranmaterialien, Senkung der Komplexität und des spezifischen Energieverbrauchs der Elektrolysesysteme, sowie zum weiteren Up-scaling und der Weiterentwicklung von unter erhöhtem Druck betriebenen Systemen.

4.5.1 Forschungsbedarf

Die auf einem Sauerstoffionenleiter als Elektrolyt basierende Hochtemperatur-Wasserdampfelektrolyse (SOEC, Betriebstemperatur ca. 800–1.000 °C) befindet sich derzeit noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Das

Verfahren bietet perspektivisch den Vorteil höherer Elektrolysewirkungsgrade insbesondere wenn eine Hochtemperaturwärmequelle zur Verfügung steht, weiterer Forschungsbedarf besteht jedoch insbesondere noch hinsichtlich einer Reduktion der Materialdegradation zur Erhöhung der Betriebszeiten, im Up-scaling der Zellen und Stacks und in der Dichtungstechnologie.

Unabhängig von der eingesetzten Elektrolysetechnologie und der Realisierung einer zukünftigen flächendeckenden Wasserstoff-Infrastruktur wird die Elektrolyse eine bedeutende Rolle bei der Speicherung erneuerbarer Energien spielen. Elektrolyseure als Kernkomponenten von chemischen Speichersystemen bieten aufgrund ihrer dynamischen Betriebsweise die Möglichkeit, nahezu verzögerungsfrei auf ein fluktuierendes Stromangebot reagieren und so sowohl zur Stromspeicherung als auch zum Lastmanagement genutzt werden zu können. Forschungsbedarf besteht hier insbesondere hinsichtlich der regelungstechnischen Netzeinbindung solcher Speichersysteme sowie der spezifischen Anpassung der verwendeten Elektrolyseure, um eine optimale Betriebsführung zu ermöglichen. Außerdem können die Effizienz und die Langzeitstabilität mit innovativen Elektrodenstrukturen und Elektrodenzusammensetzungen weiter gesteigert werden.

4.5.2 Forschungsfelder

4.5.2.1 Grundlagenforschung

Materialentwicklung

Herausforderung ist die Entwicklung neuer und verbesserter Materialien zur Effizienzsteigerung, Kostensenkung und Lebensdauererhöhung der Elektrolysesysteme. Erreicht werden sollen Wirkungsgrade größer 80 % auch im industriellen Einsatz und eine Senkung der spezifischen Anlagenkosten für Großanlagen unter 500 €/kW für AEL- und unter 1.000 €/kW für PEM-Elektrolyseure.

- Entwicklung verbesserter, kostengünstiger und recyclingfähiger Katalysatoren und Membranen
- Reduzierung der Elektrodenüberspannungen zur Ermöglichung höherer Elektrolysewirkungsgrade
- Steigerung der Stromdichten zur Realisierung höherer Leistungsdichten und damit geringerer spezifischer Kosten

- Verringerte Elektrodendegradation durch Entwicklung korrosionsbeständiger Elektrodensubstrate

4.5.2.2 Vorlaufforschung

Alkalische Elektrolyse

Kurz- bis mittelfristig wird bei einem steigenden Bedarf an Elektrolyse-Wasserstoff die bereits kommerziell verfügbare Alkalische Elektrolyse den Hauptbeitrag bei der Bereitstellung großer Wasserstoffmengen leisten. Ein weiteres Up-scaling der bestehenden Anlagen bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung und Kostensenkung ist notwendig, um die steigende Nachfrage bedienen zu können.

- Entwicklung und Erprobung von Up-scaling-Konzepten für Einzelstacks > 1.000 Nm³/h
- Entwicklung und Erprobung neuer beziehungsweise verbesserter Produktionstechnologien
- Langzeittests von effizienten Elektroden im intermittierenden Betrieb

PEM-Elektrolyse

Aufgabe ist die Senkung der noch relativ hohen Materialkosten und der noch hohen Degradationsraten. Gleichzeitig ist die Entwicklung von Systemen mit größeren Leistungen > 100 Nm³/h erforderlich, die auch die on-site oder zentrale Wasserstoffherzeugung und gegebenenfalls auch die Wasserstoffspeicher- und Rückverstromungskonzepte, d. h. die Nutzung des PEM-Elektrolysestacks auch zur Rückverstromung des erzeugten Wasserstoffs im Brennstoffzellenbetrieb, ermöglichen.

- Erprobung verbesserter Materialien zur weiteren Lebensdauererhöhung
- Weiterentwicklung und Erprobung von Konzepten zur Wasserstoff-Erzeugung und -Rückverstromung, z. B. für Inselsysteme im Hausenergiebereich
- Arbeiten zur Kostensenkung und zum Up-scaling mit effizienten Produktionstechnologien

Druckelektrolyse

Die Druckelektrolyse bietet perspektivisch die Möglichkeit einer weiteren Effizienzsteigerung insbesondere für Drücke größer 40 bar, was allerdings mit erhöhten Material- und Sicherheitsanforderungen und folglich auch höheren Kosten als bei atmosphärischen Systemen verbunden ist.

- Erprobung druckbeständiger, kostengünstiger Elektrodensubstrate und Membranen
- Weiterentwicklung und Erprobung von Sicherheitskonzepten
- Weiterentwicklung konstruktiver Konzepte zur Reduktion der Mehrkosten im Vergleich zu atmosphärischen Systemen

Hochtemperatur-Elektrolyse

Zentrale Forschungsaufgabe im Bereich der Hochtemperatur-Elektrolyse ist die deutliche Reduktion der Zelldegradation, um mit der AEL- beziehungsweise PEM-Technologie wettbewerbsfähig zu werden. Zudem sind sinnvolle Anwendungsfelder wie z. B. die Kopplung mit Hochtemperaturprozessen zur Wärmebereitstellung im Rahmen einer erneuerbaren Energiewirtschaft zu konzipieren und zu erproben.

- Erprobung verbesserter langzeitbeständiger Materialien und Elektrodensubstrate
- Verbesserung der Betriebsbedingungen zur Reduktion der Zelldegradation, z. B. in Bezug auf Temperatur und Betriebsführung
- Up-scaling von Zellen und Stacks
- Entwicklung zuverlässiger Dichtungskonzepte
- Einbindung regenerativer Hochtemperaturprozesse

4.5.2.3 Angewandte Forschung

Optimierung Systemtechnik, Energiespeichersysteme

Elektrolyse-Systeme müssen für die Integration in eine erneuerbare Energiewirtschaft an die verschiedenen Anwendungsbereiche angepasst werden. In Frage kommen Anwendungen von der zentralen Wasserstofferzeugung über die on-site-Erzeugung, z. B. für Wasserstoff-Tankstellen, bis hin zum Hausenergiebereich.

- Optimierung der systemtechnischen Einbindung und Betriebsführung sowie Reduktion der Systemkomplexität von Elektrolysesystemen
- Reduktion des Eigenenergiebedarfs auf kleiner 4 kWh/Nm³ Wasserstoff (netto) in Großanlagen
- Anpassung beziehungsweise Weiterentwicklung der Nebenaggregate wie z. B. Trafo, AC/DC-Wandler und Sicherheitstechnik
- Verbesserte Nutzung von Stoff- und Energieströmen, z. B. durch Konzepte zur Sauerstoffnutzung und Wärmeein- und -auskopplung,

und gegebenenfalls Kopplung mit anderen erneuerbaren Energien

- Entwicklung und Erprobung der system- und regelungstechnischen Einbindung in Energiespeichersysteme (Netz – Elektrolysesystem – Speicher – ggf. Rückverstromung)
- Optimierung der Betriebsführung zur schnellen Bereitstellung von Regelenergie und zum Umgang mit fluktuierendem (Überschuss-) Stromangebot, z. B. dynamisches Abfahren realer Wind- und Photovoltaik-Profile, intermittierender Betrieb, Umsetzen rascher Leistungssprünge

4.5.2.4 Sonstige Forschungs- und Entwicklungsthemen

- Entwicklung geeigneter Recyclingverfahren zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit der wichtigsten Rohstoffe, vor allem Edelmetallkatalysatoren
- Systemanalytischer Vergleich von zentraler und dezentraler Wasserstofferzeugung via Elektrolyse hinsichtlich dem Aufbau einer geeigneten Infrastruktur



5 Energienutzung

5.1 Energieeffizientes und solares Bauen

Zielsetzungen

- Erhöhung der Nutzungseffizienz durch Reduktion des Energieverbrauchs für Beheizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung bei hohem Komfort und hoher Produktivität der Nutzer
- Erhöhung der Effizienz in der Energiebereitstellung durch hocheffiziente und CO₂-neutrale Nutzenergiebereitstellung und Nutzung erneuerbarer Energien, z. B. in Plusenergiehäusern

Forschungsthemen

- Entwicklung hocheffizienter, flexibler und multifunktionaler Gebäudehüllen für Neubau und speziell für die Sanierung, die hochwärmedämmend, schaltbar und energieaufnehmend ist
- Entwicklung von anpassbarer Anlagentechnik zur effizienten Energienutzung und -gewinnung im und am Gebäude
- Erforschung von Energieversorgungs-lösungen für Gruppen von Gebäuden (Quartieren) und Umwandlung von Gebäuden in Energieproduzenten und Energiespeichern (siehe auch Kapitel 5.2)

Übersicht Forschungsbedarf

Der Gebäudesektor ist mit 35 % am Endenergieverbrauch in Deutschland beteiligt. Damit entfällt auf die Felder Raumheizung, Klimakälte, Lüftung und Beleuchtung ein wesentlicher Anteil der deutschen Kohlendioxid-Emissionen. Die absolute Reduzierung dieses Anteils ist ein ganz wesentlicher Baustein zur Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung und einer nachhaltigen Energieversorgung.

Aufgrund intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es gelungen, den Energiebedarf von Neubauten auf einen Bruchteil dessen zu senken, was der bisherige Gebäudebestand benötigt. Die Realisierung von Plusenergiehäusern wird zunehmend für Neubauten möglich. Marktverfügbare Energieeffizienztechnologien ermöglichen bereits heute für bestimmte Gebäudetypen eine so weitgehende Reduktion des Energiebedarfs, dass eine vollständige Deckung aus lokal vorhandenen erneuerbaren Energieträgern möglich ist.

Der Gebäudesektor ist durch eine mehrstufige Wertschöpfungskette gekennzeichnet, die einerseits die Herstellung von Bauprodukten, Geräten und Anlagen im industriellen Sektor und andererseits die Installation und Montage durch das Handwerk einschließt. Dadurch erfolgt auf der Ebene der Komponenten eine überwiegend indu-

strielle Produktion mit einer entsprechenden Qualitätssicherung. Auf der Ebene des Gesamtsystems steht jedoch die individuelle Erstellung im Vordergrund, die eine entsprechende Qualitätssicherung nicht immer zulässt. So wird im realen Betrieb häufig das technisch Machbare nicht annähernd erreicht.

Der reale Energieverbrauch eines Gebäudes ist eng mit den Anforderungen der Nutzer an den Komfort verknüpft. Diesen gilt es mit einem Minimum an Energieaufwendung bereitzustellen. Hierzu ist ein effizienter Gebäudebetrieb und auch eine entsprechend abgestimmte Erstellung der Gebäude notwendig. Um dieses zu gewährleisten müssen gerade für notwendige Demonstrationsbauten ausreichende Informationen in Form von Messwerten und Dokumentationen vorliegen.

Gerade in Deutschland ist der Stand der Technik im gesamten Baubereich ein sehr hoher. Dies beinhaltet die Chance, Technologien auch international zu vermarkten und Reduktionsziele im Bereich Kohlendioxid-Emissionen tatsächlich zu verwirklichen. Um dieses jedoch umzusetzen, ist die derzeitige Rate der energetischen Gebäudesanierung mit ca. 0,75 % pro Jahr bei weitem nicht ausreichend und muss dringend er-

hört werden, denn bei dem jetzigen Sanierungstempo würde es 133 Jahre dauern, bis alle Gebäude saniert sind. Die technologische Herausforderung der nächsten Jahre ist es deshalb auch, Produkte und Systeme zu entwickeln, welche durch ihre Kosteneffizienz und Einfachheit dazu beitragen, die Sanierungsrate deutlich steigen zu lassen.

5.1.1 Forschungsfelder

Zur Ausschöpfung der Energieeffizienzpotenziale in Gebäuden bedarf es in den kommenden Jahren Forschung in mehreren Feldern.

- Entwicklung neuer Materialien, Baustoffe und Bausysteme im Bereich Bautechnik
- Entwicklung und Optimierung von Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung und der lokalen Energiegewinnung
- Optimierung des Gebäudebetriebs und der Regelung technischer Anlagen in Gebäuden und größeren Strukturen

5.1.1.1 Grundlagenforschung

Bereitstellung hocheffizienter und flexibler Materialien

- Materialentwicklung und -charakterisierung:
 - Hocheffiziente Wärmedämmstoffe (z. B. Infrarot-Trübungsmittel, evakuierte Dämmsysteme)
 - Neuartige Beschichtungsmaterialien und -verfahren (z. B. low-ε-Schichten mit niedriger Emissivität)
 - Schaltbare, beziehungsweise selbstregulierende Materialien, z. B. bezüglich Transmission und Wärmeleitfähigkeit
 - Innovative Speichermaterialien für Wärme und Feuchte, z. B. Phasenwechselmaterialien (PCM) (siehe auch Kapitel 3.5)
- Beschreibung der Wärmetransportvorgänge in komplexen Materialien, z. B. gekoppelter Wärmeleitungs- und Strahlungstransport und Wärmetransportvorgänge in PCMs
- Minimierter hydraulischer Widerstand in der Wärme- und Kälteverteilung mit neuen Materialien, z. B. durch Reduzierung des Rohrwidestandsbeiwertes, insbesondere bei Kunststoffrohren und Entwicklung verlustarmer Fittings und Armaturen, eventuell auf Basis bionischer Strukturen

Neue Leuchtmittel und Leuchtenkonzepte

- Entwicklung neuer, quecksilberfreier und energieeffizienter Lichtquellen; Lichtquellen mit erhöhter zirkadianer Wirksamkeit und gleichzeitiger hoher Effizienz und Lebensdauer, z. B. LED und OLED
- Weiterentwicklung von Vorschaltgeräten: Dimmbarkeit von LEDs, gleichzeitig Erhaltung der Lichtfarbe beim Dimmen; neue Regler, die Einfluss auf den zirkadianen (Tag/Nacht) Rhythmus nehmen; kombinierte Sonnenschutz- und Kunstlichtregelung, Adaption auf die Nutzer

5.1.1.2 Vorlaufforschung

Kosteneffiziente Baustoffe für neue architektonische Herausforderungen

- Entwicklung von innovativen Baustoffen, z. B. Armierung von Porenbeton, Einsatz von anderen Faserverbundbaustoffen, Membranbaustoffe

Multifunktionale Baustoffe

- Entwicklung von Baustoffen mit Mehrfachnutzen wie z. B. Innenausbauprodukte, die sowohl positive Effekte auf die Raumakustik besitzen, als auch Schadstoffe aus der Raumluft filtern
- Entwicklung von bewuchsresistenten Bauprodukten für den Innen- und Außenbereich

5.1.1.3 Angewandte Forschung

Hocheffiziente und flexible Komponenten und Systeme

- Multifunktionale schaltbare Fassaden und Systeme, z. B. in Abhängigkeit von Licht und Wärme
- Hochleistungsdämmsysteme und -verglasungen
- PCM-Systeme zur Raumkühlung
- Entwicklung geeigneter Planungs-, Berechnungs- und Auslegungstools
- Entwicklung geeigneter Messverfahren zur Qualitätskontrolle auch vor Ort, z. B. mobile Sensorik
- Demonstration neuer Komponenten und Systeme mit Monitoring



Hocheffizienter, in das Gebäude und die Fassade integrierbare Anlagentechnik

- Integration von Wärmepumpen (siehe auch Kapitel 4.1), Solarwärmekollektoren (siehe Kapitel 2.2) und Photovoltaik (siehe Kapitel 2.1)
- Regelung und Steuerung komplexer Nieder-temperaturnetze innerhalb von Gebäuden und Gebäudekomplexen mit mehreren Wärmequellen (Erdkollektoren, Luft, Solarwärme, Fernwärme) und Wärmeerzeugern (z. B. Biomasse-BHKW, Stirling-Motoren, Solarwärme), Initiierung von Demonstrationsvorhaben
- Einsatz von Mikro- und Mini-BHKW, besonders in Bestandsgebäuden
- Entwicklung von Konzepten zur Vernetzung von Kälteverbundsystemen mit Kälteerzeugern und Speichern durch Anwendung, Vermessung, Auswertung und Simulation sowie Umsetzung neuer Betriebsführungsstrategien, z. B. durch gleitende Temperaturniveaus
- Multifunktionale Fassaden, Entwicklung von
 - fassadenintegrierten aktiven Bauteilen zum Heizen und/oder Kühlen
 - vorgefertigten Fassaden mit integrierter Versorgungstechnik
 - ganzheitlichen Bewertungsmaßstäben für visuellen Komfort
 - energetisch optimierten, automatisch arbeitenden Regelalgorithmen und -systemen mit optimierten Blendschutzeigenschaften und damit hoher Nutzerakzeptanz
 - spezifischer Unterstützung von neuen Sanierungskonzepten, z. B. die „gering-invasive Sanierung“
- Aktive Solarfassaden: Entwicklung von
 - Produktionstechnologien hin zu einer hohen Flexibilität der Formate
 - standardisierten Anschlussdetails und Schnittstellen
 - Anforderungen an die Solarfassaden im Städtebau und Denkmalschutz in interdisziplinärer Zusammenarbeit
- Optimierung der Effizienz der Gebäudesysteme durch Charakterisierung und Optimierung der Einzelkomponenten in der Verteilung, die kontinuierliche Betriebsoptimierung, die Entwicklung neuer Regelalgorithmen sowie die Optimierung des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten
- Integration von thermisch angetriebenen Kältemaschinen und solarer Kühlung in kleinen Leistungsklassen

Umweltenergien für die Beheizung und Kühlung

- Vermehrte Nutzung von Umweltenergien für die Beheizung und Kühlung von Gebäuden
 - Entwicklung von LowEx-Systemen (Erzeuger- und Übergabeseite)
 - thermohydraulische Optimierung
 - Regelungsalgorithmen und Realisierung von Temperaturkaskaden
- Effizienzsteigerung gebäudetechnischer Systeme

Smart building: optimierte Nutzung von erneuerbaren Energien und Effizienztechnik

- Entwicklung von innovativen Systemen zur Gebäudeleittechnik
- Selbstoptimierende Regelungselemente von Raumkonditionierungssystemen

5.1.1.4 Sonstige Forschungsaufgaben

- Konzepte zur Einführung von Nachhaltigkeits-Zertifikatsystemen wie z. B. das Deutsche Gütesiegel für nachhaltiges Bauen (DGNB)
- Integration von Energienutzungs- und -versorgungsstrukturen von Gebäuden, Nutzung von Synergien und integrale Betrachtung von Siedlungsgebieten

5.2 Energiesystem Stadt – Smart Cities

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Aktivierung der Städte als Leuchttürme für eine nachhaltige Energieversorgung
- Erschließung von Effizienzpotenzialen im Sanierungsbereich durch Quartierslösungen
- Erschließung von energetischen Synergieeffekten durch Abwärmenutzung und Kaskadierung
- Verbesserung der Gesamtversorgungseffizienz auf Quartiers- und Stadtebene

Forschungsthemen

- Entwicklung von Technologien, Systemkomponenten und Steuerungsinstrumenten für eine höhere Sanierungseffizienz und -rate sowie Werkzeuge und modulare Technikkonzepte zum Einsatz im Rahmen von „Sanierungsmasterplänen“

- Entwicklung von angepassten und optimierten Wärme- und Kälteversorgungs-lösungen für diversifizierte Bedarfsstrukturen auf Quartiersebene
- Entwicklung von Systemen und Systemkomponenten zur Verknüpfung von Strom- und Wärmeversorgungssystemen zur Erschließung von Effizienzpotenzialen
- Entwicklung von Planungs- und Steuerungsinstrumenten zur Entwicklung von für die jeweilige Stadt optimierte nachhaltige Energiekonzepte und Überwachung der Umsetzungsfortschritte
- Entwicklung von Konzepten zur Steuerung des Übergangs heutiger Städte zu energetisch nachhaltig versorgten Städten im Rahmen der Transformationsforschung

2010 leben erstmals mehr als 50 % aller Menschen weltweit in Städten. Im Jahr 2020 werden es voraussichtlich mehr als 60 % sein. In Deutschland liegt der Anteil der Stadtbewohner sogar schon jetzt bei über 85 %. Die Entwicklungen in Städten wirken sich daher signifikant auf den Energieverbrauch aus und sind richtungweisend für ganze Generationen. Dies betrifft auch technologische Neuerungen, die dort oft genug ihren Ausgangspunkt nehmen. Neben der energetischen Optimierung einzelner Gebäude bietet vor allem die ganzheitliche Betrachtung städtischer Siedlungsräume großes Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz.

Städte und Kommunen sind wichtige Akteure für mehr Energieeffizienz. Sie bestimmen über Bebauungspläne und Versorgungsstrukturen, sind Besitzer zahlreicher Gebäude und Anteilseigner von Stadtwerken und Wohnungsbaugesellschaften. Sie entscheiden über den Ausbau von Wärmenetzen und darüber, welche Rolle Energieeffizienz bei der Sanierung öffentlicher Gebäude spielt. Und sie informieren und beraten ihre Bürgerinnen und Bürger. Obwohl sich in Deutschland mittlerweile viele Kommunen mit Klimaschutz und Energiesparen beschäftigen, sind die Fortschritte in der Praxis eher gering. Das liegt

meist nicht an mangelnder Technik oder zu geringer Wirtschaftlichkeit von ambitionierten Projekten. Was oft schlicht fehlt, ist das konkrete Wissen über die vor Ort am besten geeigneten Maßnahmen.

5.2.1 Forschungsfelder

5.2.1.1 Grundlagenforschung

Modellierungs- und Steuerungswerkzeuge

Auf kommunaler Ebene werden häufig Entscheidungen gefällt, die den künftigen Energiebedarf wesentlich prägen können, ohne dass zum Zeitpunkt der Entscheidung ausreichende Detailinformationen zur energetischen Bewertung verfügbar sind. Und in der anschließenden Planungs- und Dimensionierungsphase von Projekten werden häufig aufgrund der komplexen Zusammenhänge die energetischen Konsequenzen mangels adäquater Planungstools nicht ausreichend erkannt.

Die Abbildung der komplexen Systemzusammenhänge auf Quartiers- und Stadtebene steckt in Bezug auf Energiesysteme noch in den Anfängen. Für einen richtungssicheren Umbau der vorhandenen Energiestrukturen im Rahmen des Transformationsprozesses spielt die Vorhersage von Auswirkungen aufgrund von bestimmten



Entwicklungen eine wichtige Rolle, insbesondere da es sich beim Umbau der Energiesysteme und bei der Gebäudesanierung um langfristige Maßnahmen mit einer hohen Kapitalbindung handelt. Forschungsaufgaben sind deshalb wie folgt.

- Entwicklung von IKT-Technologien und Definition von Schnittstellen zum systematischen Austausch von energierelevanten Daten in den verschiedenen Planungsebenen von Kommunen
- Entwicklung von Modellierungs- und Planungsinstrumente für die Abbildung von System- und Wirkungszusammenhänge innerhalb des Energiesystems unter Berücksichtigung von nicht-technologischen Größen wie dem Einfluss des demografischen Wandels sowie dem Strukturwandel im ländlichen Raum
- Entwicklung von Steuerungs- und Monitoringinstrumenten zur Koordination und Steuerung des Transformationsprozesses einer Stadt und zur Erfolgsüberwachung

Stadtmikroklima

Grundlegende Forschungsaufgaben sind im Bereich des Stadtmikroklimas und seiner Einflüsse auf die Energiebilanzen und -systeme zu leisten. Geht man von einer steigenden Zahl Extremwetterlagen aus, so gewinnen passive und aktive Strategien an Bedeutung, die diese für städtische Ballungsräume abmildern und handhabbar machen können. Die entsprechenden Forschungsaufgaben sind wie folgt.

- Untersuchungen von Faktoren, die das Stadtmikroklima beeinflussen vor dem Hintergrund des steigenden Urbanisierungsgrads, einer starken Verdichtung im städtischen Raum und den damit vermehrt auftretenden „Heat Islands“, den abnehmenden Wärmespeicherkapazitäten von Plätzen und Straßenzügen und die sich verändernde Durchlüftung der Gebiete
- Entwicklung von Modellierungswerkzeugen zur Abschätzung der Entwicklung des Stadtmikroklimas unter Annahme des zunehmenden Klimawandels und zur Erarbeitung von Lösungsansätzen zur Minderung der Konsequenzen, z. B. durch Grün- und Wasserflächen, Dachbegrünungen, Frischluftschneisen und Nutzung des Strahlungsaustauschs mit dem Himmel zur Nachtauskühlung

- Untersuchung der Konsequenzen, die der breitflächige Einsatz von Klimageräten auf das Stadtklima hätte
- Entwicklung von Konzepten zur Integration mikroklimatischer Fragestellungen in die Stadtplanungskonzepte

5.2.1.2 Vorlaufforschung

Verknüpfung der Systeme Strom und Wärme auf Quartiers- und Stadtebene

Bei einem kontinuierlich steigenden Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromnetz der Zukunft steigt zukünftig der Bedarf an regelbaren robusten Energiespeichern beziehungsweise zeitvariablen Bedarfselementen. Hocheffiziente sanierte Gebäude kommen während ihrer verkürzten Heizperiode mit geringen Systemtemperaturen aus. Dies macht den Einsatz von Wärmepumpensystemen für diese Gebäude attraktiv. Gleichermaßen sind Gebäude in ihrem thermischen Verhalten träge und in gewissen Grenzen zeitflexibel. Es besteht somit die Möglichkeit in einem vernetzten und intelligenten Stromnetz auch Gebäude mit ihren Wärmepumpen und Speichern zur Lastverschiebung zu nutzen. Hieraus leitet sich folgender Forschungsbedarf ab.

- Entwicklung von Gebäude- und Anlagensystemen, welche sich für eine Lastverschiebung durch gezielte Kombination von erneuerbarem Stromerzeugern und Wärmeerzeugern eignen, hierfür sind Nutzungsrandbedingungen, Steuerungskonzepte sowie eine angepasste Wärmepumpen-, Wärmeverteiler- und Speicherkonfiguration zu entwickeln
- Entwicklung von Konzepten für eine „Schwarmtechnologie“ als negative wie auch positive Regelenergie für ein erneuerbares Stromnetz der Zukunft auf Basis des Gebäudewärmebedarfs und seinem thermischen Verhalten entsprechend dem Konzept der dezentralen KWK-Anlagen
- Konzepte zur Überwindung von Umsetzungshemmnissen, Entwicklung von intelligenten Steuerungssystemen und Nutzerschnittstellen sowie robusten und wirtschaftlichen Betreibermodellen

Energieversorgungssysteme für langfristige „Hochbedarfs-Quartiere“

Der Umbau von Quartieren und Städten kann nicht ausschließlich nach energetischen Gesichtspunkten erfolgen. Städtebauliche, kulturhistorische und wirtschaftliche Aspekte begrenzen die energetische Sanierung von bestimmten Gebäuden, Ensembles oder Quartieren in ihrer Umsetzungseffizienz. In einem Energiesystem auf Basis erneuerbarer Energien müssen für diese Fälle Lösungen entwickelt werden, die trotzdem ein Höchstmaß an Gesamteffizienz des Systems bei langfristig tragbaren Kosten erbringen. Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsaufgaben.

- Entwicklung von Versorgungssystemen auf Basis erneuerbarer Energien zur Wärmeversorgung von Quartieren mit geringen Sanierungspotenzialen beziehungsweise hohem Wärmebedarf sowie von Strategien zur Einbindung von dezentralen Nahwärmeversorgungen und Abwärmennutzungen in das Gesamtversorgungskonzept
- Strategieentwicklung für einen modularen Umbauprozess dieser Systeme in Richtung eines verminderten Energiebedarfs bei fortschreitender Technologieentwicklung im Sinne von „no-regret“-Strategien

Intelligente Wärme- und Kältenetze auf Quartiersebene

Zur Nutzung von niedrigexergetischen erneuerbaren Wärmeangeboten wie Geothermie, Solarwärme oder Abwärme ist es erforderlich, Wärme unterschiedlicher Temperaturniveaus in das Netz einbinden und exergieeffizient verteilen zu können. Hierfür müssen Systeme für bi-direktionale Wärmenetze und eine dezentrale Einspeisung auch fluktuierender Energiequellen entwickelt werden (siehe auch Kapitel 3.2). Der Forschungsbedarf ist wie folgt.

- Entwicklung von Wärme- und Kältenetzen zur dezentralen Einspeisung niedrigexergetischer Quellen
- Entwicklung von Steuerungssystemen und Gebäudeschnittstellen zur Wärme- beziehungsweise Kälteübergabe sowie von Kaskadenschaltungen für unterschiedliche Exergiebedarfe in Abhängigkeit der Lastverlaufskurven

- Entwicklung von effizienten Technologien zur bedarfsgerechten hygienischen Erzeugung von Trinkwarmwasser innerhalb von Niedertemperaturnetzen und von nicht-thermischen Verfahren zur Sicherstellung der hygienischen Trinkwarmwasserqualität für Einzelgebäude beziehungsweise Ensembles, z. B. zum Legionellenschutz

5.2.1.3 Pilot- und Demonstrationsvorhaben

Notwendig ist die Demonstration von optimierten vervielfältigungsfähigen integralen Lösungen für unterschiedliche Siedlungsstrukturen. Es müssen sowohl kleine Städte ab 2.000 Einwohner, mittlere, große und sehr große Städte über 500.000 Einwohner Berücksichtigung finden. Eine geeignete Typologie sollte als Entscheidungskriterium für die Auswahl von Demonstrationsvorhaben dienen. Eine Synergie ließe sich über die Integration von singulären Projekten in größere Maßstäbe realisieren. Der Rahmen ist um weitere Verbraucher zu ergänzen, die bisher nicht in der Bilanzierung integriert waren. Hierzu gehört z. B. die Straßenbeleuchtung, für die noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial sowohl in der Lampentechnologie als auch in dem Reflexionsverhalten der Straßenbeläge erschließbar scheint.

Abbau von Umsetzungshemmnissen auf Quartiers- und Stadtebene

Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Implementierung eines erneuerbaren Energiesystems ist die Sanierung des Gebäudebestands. Aktuell bleibt jedoch sowohl die Sanierungsrate als auch die Sanierungseffizienz hinter den Notwendigkeiten zurück. Im Rahmen angewandter Forschung gilt es Konzepte und Strategien zu entwickeln, wie diese erreicht werden kann. Neben Maßnahmen auf der Ebene von Einzelgebäuden können Ansätze auf Quartiersebene Beiträge zu einer Effizienzsteigerung und gleichzeitig zur gezielten Umstrukturierung leisten. Forschungsaufgaben sind wie folgt.

- Entwicklung von Steuerungs- und Planungsinstrumenten, die Investoren und Eigentümergemeinschaften in die Lage versetzen, zielgerichtete und langfristig effiziente und wirtschaftliche Maßnahmen in der Gebäudesanierung und dezentralen erneuerbaren Energieversorgung zu entwickeln.



- Analyse von systemischen Umsetzungshemmnissen und Barrieren sowie Konzepte zu deren Auflösung
- Aufbau eines systematischen Monitorings bestehender und laufender Pilotvorhaben unter besonderer Berücksichtigung des Gesamtsystems Stadt

5.3 Elektromobilität

Zielsetzungen

- Deutschland wird Technologie- und Marktführer für Elektromobilität
- Nachhaltige Erschließung des Elektromobilitätsmarktes
- Wirtschaftliche, wettbewerbsfähige und umweltverträgliche Elektrofahrzeuge
- Langfristige Sicherung der Mobilität

Forschungsthemen

- Innovative Fahrzeugkonzepte, -systeme und -komponenten
- Intermodale, kooperative Assistenz, Verkehrsmanagement und Umweltwirkungen
- Zukunftsfähige Mobilitäts- und Nutzungskonzepte
- Integration von Elektromobilität in „Smart Grids“-Konzepte zur gezielten Pufferung von erneuerbaren Energien
- Konzepte zur Maximierung des Fahrstroms aus erneuerbaren Quellen
- Integrierte Verkehrs- und Energiesystemanalyse

Übersicht Forschungsbedarf

Nach mehr als 100 Jahren Entwicklungsgeschichte des Verbrennungsmotors deutet sich mit der Elektromobilität eine technologische und verkehrssystemische Zeitenwende an. Zwar wird der verbrennungsmotorische Antrieb auch in den nächsten zwei Dekaden noch von wesentlicher Bedeutung sein, dennoch wird heute mit dem schrittweisen Übergang zu den neuen Technologien begonnen. Verursacht wird der Wandel durch die Möglichkeit, mittels elektrischer Antriebe in Straßenfahrzeugen die Effizienz wesentlich zu erhöhen, die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen und den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu reduzieren und zugleich lokale Emissionen von Schadstoffen und Lärm zu minimieren.

Für eine höhere Akzeptanz der auch zukünftig gegenüber konventionellen Fahrzeugen beschränkten Reichweite sowie der längeren „Tankdauer“ von Elektromobilen reicht eine ausschließliche Fokussierung auf die Entwicklung der Fahrzeugtechnik und der elektromobilitätsspezifischen Infrastruktur nicht aus. Vielmehr ist zusätzlich zur Komponentenforschung eine umfassende systemische Forschung notwendig, die die

Grundlagen für eine verstärkte und verbesserte verkehrs- und energiewirtschaftliche Integration elektrischer Fahrzeuge erarbeitet. Die Forschungsaufgaben reichen dabei verkehrsträgerübergreifend von Fahrzeugkonzepten und Fahrzeugtechnologien über die Verkehrsnachfrage und das multimodale Verkehrsmanagement bis hin zu Erzeugung, Transport und Speicherung von Strom, Wasserstoff, Biogas und Methan inklusive einer volkswirtschaftlichen Systemanalyse.

Damit sich das ökologische Potenzial der Elektromobilität voll entfalten kann, ist eine weitgehende Versorgung mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen erforderlich. Sie ermöglicht auch unter Einschluss sämtlicher emissionsrelevanter Ereignisse innerhalb eines Fahrzeuglebenszyklusses niedrige Emissionswerte. Hinzu kommen die Vorteile einer langfristigen Energieversorgungssicherheit. Der Betrieb von Elektrofahrzeugen mit dem heutigen deutschen Strommix hätte dagegen keine Vorteile, denn bei detaillierter Produktions- und Verwendungsanalyse

(Well-to-Wheel-Betrachtung des Kraftstoffs vom Bohrloch bis zur Verbrennung im Motor und der Übertragung auf das Rad) ergibt sich nur eine geringe Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen im Vergleich mit effizienten Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

5.3.1 Forschungsfelder

5.3.1.1 Grundlagenforschung

Kosten- und Massenreduktion elektrochemische Speicher

Ein wichtiger Aspekt für die Umsetzung der Elektromobilität ist die deutliche Verbesserung von Energiedichte, Lebensdauer, Alterungsverhalten, Sicherheit sowie Kosten der im batterieelektrischen Fahrzeug eingesetzten elektrochemischen Speicher (Brennstoffzellen siehe Kapitel 4.4)

- Entwicklung von Maßnahmen zur Reduktion von Kosten und Masse
- Steigerung von Langlebigkeit, Zuverlässigkeit und Fahrzeugreichweite

5.3.1.2 Vorlauftforschung

Integration und Betrieb elektrochemische Speicher

Die Unterbringung der Batterien und die Einbindung in das Fahrzeugenergiekonzept inklusive der Kopplung mit Kommunikations-, Navigations- und Assistenzsystemen ist wichtig, um das Batteriemangement an spezielle Randbedingungen des Verkehrs, der Batterie sowie an die Umgebungseinflüsse anpassen zu können.

- Optimale Integration der Batterien in das Fahrzeugkonzept
- Optimierte Kühlungskonzepte des Batteriepacks

Fahrzeugkonzepte

Elektroantriebe erfordern und ermöglichen innovative Fahrzeugkonzepte und darauf angepasste Bauweisen. Hohe Batteriegewichte und elektrische Komponenten bedürfen neuer Lösungen, um weder Sicherheit noch Fahreigenschaften negativ zu beeinflussen. Das hohe Gewicht kann teilweise durch Gewichtsreduzierung bei anderen Teilen kompensiert werden. Folgende Forschungsaufgaben ergeben sich daraus.

- Identifikation geeigneter, leichter Werkstoffe für den Fahrzeugbau

- Entwicklung von Konzepten zur strukturintegrierten Unterbringung von Batterien und Hochvoltkomponenten im Fahrzeug, sowohl zentral als auch dezentral
- Weiterentwicklung der Hochintegration, Skalierung und Derivatebildung von Plattformen, damit die Hersteller kostengünstig mehrere Antriebsvarianten anbieten können

Range Extender

Trotz der zu erwartenden Steigerung von Batterieleistungs- und -energiedichte wird die Reichweite von batterieelektrischen Fahrzeugen begrenzt bleiben. Range Extender können sie vergrößern, bedürfen aber wegen der spezifischen Anforderungen noch einigen Forschungsbedarf.

- Entwicklung eines leichten, kompakten und gut in ein Fahrzeug integrierbares Range-Extender-Systems mit Vielkraftstofffähigkeit, hohen Wirkungsgraden und geringen Emissionen, z. B. in Form hochintegrierter Lineargeneratoren, bei denen durch Variabilität von Verdichtung und Hub sehr gute Wirkungsgrade und eine extrem flache Bauweise erwartet werden kann oder optimierte Mikrogasturbinen, die über eine kontinuierliche Verbrennung und ein günstiges Geräusch- und Emissionsverhalten verfügen
- Entwicklung von Verfahren zur Bewertung und zur Optimierung der Integration und Steuerung eines Range-Extender-Systems

Energierückgewinnung und Thermomanagement

Das Elektromobil nutzt die verfügbare Energie aus Effizienzgründen möglichst in ihrer originären Form. Neben der elektrischen müssen auch die kinetische Energie und die thermische Energie zur Klimatisierung des Innenraums und der Antriebskomponenten betrachtet werden. Die kinetische Energie sollte durch „intelligente“ Fahrerassistenz so weit wie möglich ausgenutzt werden.

Durch die hohe Effizienz des elektrischen Antriebs kann der Innenraum eines Elektromobils im Winter nicht ausreichend durch die Motorabwärme beheizt werden. Bei elektrischer Wärmeerzeugung würde abhängig von Leistung und Fahrzyklus die Reichweite des Fahrzeugs um bis zu 50 % reduziert werden. Besonders kritisch ist der Einfluss im Stop-and-Go-Verkehr.

- Entwicklung von Systemen zur Rekuperation und Speicherung von kinetischer Energie, z. B.

durch hybridisierte Speichersysteme aus Doppelschichtkondensatoren und Schwungradspeichern

- Entwicklung von neuen Konzepten für das Thermomanagement und die effiziente Klimatisierung von Elektromobilen, die die Reichweite nicht nennenswert einschränken und denselben Komfort wie Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bieten

5.3.1.3 Angewandte Forschung und Demonstration

Infrastruktur für Elektromobile und Integration in den Netzverbund

Damit die Beladung der Fahrzeugbatterien vornehmlich mit erneuerbaren Energien erfolgen kann, muss ein für den Verbraucher einfach nutzbares, universelles, anbieterübergreifendes Infrastrukturkonzept entwickelt werden, das eine problemlose Fahrzeug-Netzkoppelung an möglichst vielen Stellen im privaten und öffentlichen Raum ermöglicht.

- Entwicklung und Aufbau einer Elektromobil-Ladeinfrastruktur, die einfach nutzbar, universell, möglichst europaweit einheitlich und preiswert ist und bezüglich energievorsorgungsrelevanter Aspekte wie z. B. Metering, Abrechnung, Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch optimiert ist
- Entwicklung und Optimierung von Systemen und Komponenten zur Be- und Entladung von Fahrzeugen und zur Identifikation von Fahrzeugen am Netz wie z. B. konduktiv und induktiv gekoppelte Lade- und Rückspeiseelektronik
- Entwicklung eines Energiemanagementsystems, das alle Stromtransfervorgänge einschließlich Rückspeisung intelligent steuert unter Einbeziehung der Tarifsituation, des Meterings und der Abrechnung der transferierten Strommengen einschließlich einer geeigneten Kommunikationsplattform, die den Fahrzeugnutzer einbezieht

5.3.1.4 Sonstige Forschungsthemen

Rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Um die Investitionsbereitschaft sowohl der Anbieter als auch der Verbraucher zur Bereitstellung und zur Nutzung von Elektromobilen und der erforderlichen Infrastruktur zu fördern, sind

verlässliche und belastbare Bedingungen erforderlich.

- Entwicklung klarer rechtlicher und wirtschaftlicher Randbedingungen für die Bereitstellung und Nutzung von Elektromobilen und der zugehörigen Infrastruktur
- Standardisierung im Mess- und Abrechnungswesen bei der Ausgestaltung der öffentlichen Ladestationen als auch bei stationären und mobilen Zählern

Nutzerverhalten und -akzeptanz, Nutzungsmodelle

Um die Migration von den fossilen zur Elektromobilität gezielt und sinnvoll gestalten zu können, sind neben den technischen Aspekten fundierte Kenntnisse über Nutzerverhalten und -akzeptanz erforderlich. Derzeit wird das Potenzial von Elektrofahrzeugen fast ausschließlich anhand von „harten“ Faktoren abgeschätzt, wie Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur oder Fahrzeugreichweite. Dabei fehlt grundlegendes Wissen zu „Präferenzen“ und „Einstellungen“, also zu emotionalen Aspekten der PKW-Nutzung und des PKW-Besitzes, die die Migration ebenfalls sehr stark beeinflussen. Eine entsprechende multidisziplinäre Akzeptanzforschung ist erforderlich.

- Untersuchungen des Potenzials und der Umsetzbarkeit neuer Mobilitätskonzepte und Nutzungsmodelle auf Basis der Abschätzung der alternativen Produkt- und Systemverfügbarkeit, aber auch der sonstigen technologischen, sozioökonomischen und psychologischen Faktoren, Ermittlung der kritischen Erfolgsfaktoren und den Möglichkeiten, diese zu beeinflussen
- Untersuchungen zur Akzeptanz von Ladeinfrastrukturen und hierfür notwendige Informationen für den Nutzer über die Fahrzeugzustände sowie die und Kommunikationen über „verbrauchssensibles“ Fahren

Verkehrsfluss, Assistenzsysteme und Kommunikations-Navigation

Die Einführung von Elektrofahrzeugen wird die Nutzungs- und Verhaltensmuster von Reisenden verändern. Forschung zum urbanen Verkehrsmanagement ist notwendig, um auf die veränderte Nachfrage ebenso reagieren zu können wie auf die unterschiedlichen Charakteristika von Fahrzeugen und Fahrzeugen mit und ohne Verbrennungsmotor.

- Untersuchung der Auswirkung des verstärkten Einsatzes von Elektromobilen, z. B. auf Fahrdynamik und die veränderte Wahrnehmung durch andere Verkehrsteilnehmer aufgrund reduzierter Geräuschemissionen sowie Entwicklung von Maßnahmen zur Anpassung an diese Änderungen, z. B. durch optimierte Steuerung von Lichtsignalanlagen nach Umweltkriterien
 - Untersuchung der Veränderungen in den Start-Ziel-Nachfragemustern aufgrund der installierten Infrastruktur zur Ladung oder dem Austausch der Batterien der Elektromobile
 - Konzepte zur optimierten Bereitstellungslogistik und Automatisierung neuer Car-Sharing-Konzepte mit Elektromobilen
 - Entwicklung kooperativer Assistenz- und Automationssysteme zur Erhöhung beziehungsweise Gewährleistung des Verkehrsflusses und des ressourcenschonenden Fahrens in urbanen Verkehrssituationen und rechtzeitiger Information über alternative Reisewege in einem multimodalen Verkehrssystem
 - Entwicklung einer optimierten Fahrtroutenermittlung unter Berücksichtigung zusätzlicher Informationen wie z. B. Nutzerbedürfnisse, Streckenverläufe einschließlich Geländeprofile, aktueller Verkehrslagedaten, Informationen zum Fahrzeugzustand und prognostizierter Fahrzeugreichweite sowie der Einbindung batterieelektrischer Fahrzeuge ins „Smart-Grids“, Entwicklung von einfach zu bedienenden Nutzerschnittstellen und neuartigen Assistenzsystemen für diese Systeme
- neuer Fahrzeuge und veränderter Logistikstrukturen, auch unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Lärmreduzierung durch Elektromobile

5.3.1.5 Systemanalyse, Umweltwirkung

Die vielfältigen und komplexen Umweltwirkungen durch die Umstellung von fossilen auf elektrische Fahrzeuge sind zu erforschen, um diesen Wandel optimal zu steuern.

- Ermittlung der Umweltwirkungen durch die Nutzung von Elektromobilen hinsichtlich Energieverbrauch und Emissionen anhand der Betrachtung des Gesamtsystems, d. h. von der Energieerzeugung bis zur Umsetzung im Fahrzeug sowie von der Fahrzeugproduktion bis zu dessen Entsorgung
- Erforschung der Umweltwirkungen der Umstellung auf Elektromobile im Gesamtsystem Verkehr, d. h. der Einfluss von Mobilitätsdienstleistungen, Verkehrsverlagerungen,



6 Systemanalyse und Transformationsforschung

6.1 Systemanalyse und Technikfolgenabschätzung

Zielsetzungen

- Bereitstellung von Strategien, Lösungen und Instrumentarien zur Umsetzung der erneuerbaren Energien Ausbauziele im Strom- und Wärmemarkt
- Bereitstellung von Bewertungsinstrumenten und Entscheidungsgrundlagen für die Auswirkungen neuer Energietechnologien auf Energiesystem, Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft
- Monitoring der Entwicklung

Forschungsthemen

- Erarbeitung von Potenzialanalysen und Strategien zur Weiterentwicklung des Energiesystems
- Entwicklung von Instrumenten zur Stimulierung der Markteinführung und Marktintegration einzelner Energietechnologien
- Begleitforschung zu nichttechnischen Aspekten des Wandels der Energieversorgung sowie genereller Auswirkungen der Markteinführung neuer Energietechnologien

Übersicht Forschungsbedarf

Der vollständige Umbau der Energieversorgung zu einem nachhaltigen System ist langwierig und wird voraussichtlich 40 Jahre oder mehr benötigen, er ist äußerst komplex, weil alle Bürger, Unternehmen, Institutionen etc. und die meisten ihrer Lebensbereiche betroffen sind und weil dabei technische, wirtschaftliche, rechtliche, soziale, politische, soziologische und psychologische Aspekte betroffen sind. Um bei der Planung und Steuerung dieses Umbaus die richtigen Entscheidungen treffen zu können ist es unbedingt erforderlich, die Handlungsoptionen systemanalytisch zu untersuchen, mögliche Strategien, Lösungen und Instrumentarien zur Zielerreichung zu entwickeln und die Tragfähigkeit neuer Technologien, Konzepte und Systeme und deren potenzielle Folgen rechtzeitig zu bewerten.

Systemanalytische Untersuchungen gewährleisten wissenschaftlich fundierte und belastbare Entscheidungshilfen und Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, ohne die eine zielgerichtete nachhaltige Gestaltung des Energiesystems nicht möglich ist. Systemanalyse und Technikfolgenabschätzung müssen deshalb integrale Bestandteile der Energieforschung und ausreichend ausgestattet sein. Dabei müssen Erkenntnisse aus der naturwissenschaftlich-technischen mit ökonomischen, sozialwissenschaftlichen

und umweltorientierten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielführend und effizient verknüpft werden.

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 und die Ableitung möglicher Handlungsempfehlungen. 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 beziehungsweise Neugestaltung und die begleitende Politikberatung sind weitere Ansatzpunkte der systemanalytischen Arbeit.

Der zunehmende Anteil erneuerbarer Energien am Energiesystem wird die Bedeutung von Wetter und Klima für die Planung und den Betrieb des Gesamtsystems deutlich erhöhen. Die Energiemeteorologie beschreibt die Wechsel-

wirkung des gesamten Energieversorgungssystems mit den meteorologischen Randbedingungen. Im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energie entsteht ein erheblicher Bedarf an der Entwicklung neuer Verfahren zur Generierung und Bereitstellung von spezifisch an das Energiesystem angepasster meteorologischer Informationen und deren Integration in entsprechende Werkzeuge für Planung und Steuerung.

Die Einführung neuer Energietechnologien und -systeme und die eingesetzten begleitenden Förderinstrumente sind in einem Monitoring zu begleiten. Die kontinuierliche und umfassende Bewertung hilft mögliche Fehlentwicklungen rechtzeitig zu erkennen und alternative Lösungsansätze zu erarbeiten. Zu beachten sind dabei sowohl ökonomische und ökologische Aspekte, Fragen der Versorgungssicherheit, gesellschaftliche Aspekte, vor allem die Akzeptanz neuer Technologien sowie auch die Erreichung der eigenen Ziel und der Vorgaben internationaler Klimaschutzpolitik.

6.1.1 Forschungsfelder

Strategien und Potenzialanalysen

Realistische Entwicklungspfade für Energieeffizienzsteigerungen und den Ausbau erneuerbarer Energien müssen durch Potenzialermittlung identifiziert und daraus Strategien für den Umbau des Energiesystems erarbeitet werden. Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsaufgaben.

- Weiterentwicklung der Modellierungsverfahren und Szenarienerstellung für die künftige Energieversorgung
- Entwicklung von Übergangsszenarien vom fossil-nuklearen zum erneuerbar dominierten Energieversorgungssystem für verschiedene Ausbaustufen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen beiden Technologiebereichen
- Entwicklung technisch-ökonomischer Einsatzanalysen für Systemvergleich und Potenzialermittlung
- Erarbeitung von Ausbaupfaden für Wärmedämmmaßnahmen und Nahwärmesystemen unter Berücksichtigung von Renovierungszyklen
- Analyse der Szenarien hinsichtlich ihrer Klimaschutzwirkung
- Bewertung neu entwickelter Technologien wie z. B. Smart Metering

Markteinführung, Marktintegration, Prognose

Die rechtzeitige Erkennung möglicher Hemmnisse bei der Markteinführung neuer Energietechnologien und die Identifizierung wirksamer Maßnahmen zur Unterstützung der Einführung sind wichtige Voraussetzungen für einen effizienten und erfolgreichen Umbau des Energiesystems. Folgende Forschungsaufgaben ergeben sich hierbei.

- Entwicklung von Markteinführungs- und Marktdurchdringungsstrategien auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Betrachtungsebenen und Ableitung von Handlungsempfehlungen im Rahmen der Politikberatung
- Entwicklung von effektiven und effizienten Strategien, Förderkonzepten und -instrumenten zur Markteinführung und Marktintegration erneuerbarer Energien unter besonderer Berücksichtigung ökonomischer, technischer und infrastruktureller Aspekte (z. B. Netzintegration oder Wärmenetze)
- Weiterentwicklung von Tools und Strategien zur Netz- und Speicherintegration wie z. B. Prognosetools, Steuertools mit Schwerpunkt Windenergie und Photovoltaikeinspeisung sowie Lastmanagement und Speicher
- Analyse der erforderlichen Strukturänderungen im Wärmemarkt, z. B. die Notwendigkeit zum Bau von Wärmenetzen und begleitende raumordnerische Maßnahmen
- Untersuchung der Kopplungen und Wechselwirkungen zwischen Strom- und Wärmemarkt, z. B. durch den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen und der Kraft-Wärme-Kopplung
- Entwicklung und Anwendung von Methoden der Fernerkundung, insbesondere durch hochauflösende Satellitendaten oder Laser-scanning für detaillierte Potenzialanalysen mit kleinskalig räumlichem Bezug, z. B. für Siedlungsstrukturen



Energiemeteorologie

Die belastbare und ausreichend detaillierte Beschreibung der meteorologischen Randbedingungen für das Energiesystem, wie z. B. der solaren Einstrahlung, der Windgeschwindigkeiten, der Umgebungstemperatur und der Faktoren, die die Wachstumsbedingungen für Biomasse beeinflussen, ist Grundlage für die Steuerung eines erneuerbaren Energiesystems, bislang aber noch nicht vorhanden. Weiter sind operative Systeme erforderlich, die die meteorologischen Informationen wie Vorhersagen und Nowcasting allen relevanten Steuerungseinheiten zur optimierten Betriebsführung des Energiesystems zur Verfügung stellen.

Daraus ergeben sich folgende Forschungsaufgaben.

- Entwicklung von Methoden zur höher aufgelösten und genaueren Beschreibung aller relevanten meteorologischen Rahmenbedingungen, z. B. durch bessere Modelle der Einstrahlung, umfassende Ermittlung von Aerosolraten, Modellierung von Wolken und Windfeldern in und hinter Windparks, Ermittlung von Offshore-Windbedingungen und Extremereignissen sowie Aufbau von Langzeitdatenbanken
- Entwicklung verbesserter, räumlich aufgelöster Vorhersagen der verfügbaren Leistung von Solar- und Windenergiesystemen für Zeiträume von wenigen Stunden bis zu 10 Tagen für optimierten Betrieb, Netzintegration und Wartungsplanung sowie Entwicklung von neuen Verfahren zur kombinierten Wind- und Solarvorhersage
- Bereitstellung meteorologischer Informationen für die Entwicklung neuer Technologiegenerationen, z. B. spektral aufgelöste Solarstrahlung für neue Mehrfach-Solarzellen
- Entwicklung von operativen Systemen im Rahmen der globalen Erdbeobachtungssysteme, die sowohl archivierte Langzeit- als auch Echtzeitdaten bereitstellen können
- Untersuchung der Wechselwirkungen der verschiedenen erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung der räumlichen Verteilung und zeitlichen Profile der Energiebereitstellung, der räumlichen und intertechnologischen Ausgleichseffekte und dem verbleibenden Energietransportbedarf sowie Entwicklung von Methoden zur Bereitstellung von Empfehlungen für die optimale räumliche Verteilung erneuerbarer Energien für eine vorgegebene regionale Lastdeckung

6.2 Transformationsforschung

Übersicht Forschungsbedarf

Zielsetzungen

- Identifikation von erfolgversprechenden Pfaden für den Umbau des Energiesystems
- Bewertung von Risiken und Chancen für konkrete Entwicklungspfade
- Erhöhung der Akzeptanz für bestimmte Entwicklungspfade

Forschungsthemen

- Entwicklung der Methodik zur Entwicklung und Beschreibung von Entwicklungspfadvarianten für die wesentlichen Elemente des Energiesystem-Umbauprozesses
- Entwicklung der Methodik zur Bewertung der Prozessvarianten für einzelne Entwicklungspfade des Umbauprozesses auf Basis von Variation der Rahmenbedingungen

- Entwicklung einer Methodik zur kontinuierlichen Erfassung der Stoffströme und Rohstoffversorgung bei der Produktion Biomasse basierter Energietechnologien als auch dem Anlagenbetrieb unter Berücksichtigung von Recyclingkonzepten
- Erstellung und Bewertung von Entwicklungspfadvarianten als Teil des Umbaus des Energiesystems für einzelne, wesentliche Elemente des Energiesystems auf Basis von Varianten-, Risiko- und der Rohstoffversorgungsanalysen und der Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit anderen Elementen des Energiesystems und deren Umbauprozesse

Der Umbau unseres Energiesystems hin zu einem nachhaltigen, weitgehend Kohlendioxidemissionsfreien, von erneuerbaren Energien dominierten Energiesystems bis zum Jahr 2050 stellt eine einmalige, äußerst große Herausforderung dar, da es sich nicht nur um einen Wandel der Energiebereitstellung, sondern auch der Energieverteilung, der Energiespeicherung und der Energienutzung inklusive signifikanter Verbrauchsreduzierung durch Effizienzsteigerung handelt. Im Wesen der erneuerbaren Energien liegt eine große Technologievielfalt und der dezentrale Charakter begründet, was in der Beschreibung der für ein rein erneuerbares Energiesystem notwendigen Technologien und des in diesen Technologien bestehenden Forschungsbedarfs in den vorhergehenden Kapiteln deutlich wird. Zwangsläufig wird sich die Zahl der künftig im Energiesystem eingesetzten Technologien deutlich erhöhen und die Vernetzung aller Komponenten und Systeme deutlich zunehmen, was den Umbau des Energiesystems zusätzlich aufwändig und komplex in der Steuerung macht.

Die Bundesregierung hat im September 2010 erstmals ein Energiekonzept für das Jahr 2050 vorgestellt, das für viele Bereiche des Energiesystems sehr wichtige konkrete Maßnahmen beschreibt, die diesen Umbau voranbringen.

Dieser in vielen Teilen sehr gute Ansatz muss zweifellos in naher Zukunft, aber auch Prozess begleitend kontinuierlich in den kommenden Jahren und Jahrzehnten der Transformation ergänzt, angepasst und teilweise korrigiert werden, doch wird bereits in diesem Energiekonzept deutlich, wie tiefgreifend die erforderlichen Änderungen sind. Die damit verbundene kritische Diskussion um die Frage, welche Belastung man Hausbesitzern in Bezug auf die Wärmedämmung ihres Gebäudes zumuten kann, hat beispielhaft gezeigt in wie viele Bereiche eine einzelne Maßnahme eingreifen kann und wie viele Interessen bei der Entwicklung von einzelnen Maßnahmen zu berücksichtigen sind.

Um den Umbau des Energiesystems erfolgreich und effizient zu gestalten und voranzubringen ist deshalb neben der in Kapitel 5.1 beschriebenen Systemanalyse auch eine grundlegende Transformationsforschung erforderlich. Der Begriff der Transformationsforschung wird bislang vornehmlich in der Politikwissenschaft verwendet, die die Transformation von politischen und gesellschaftlichen Systemen erforscht, doch ist die Ausweitung dieses Forschungsgebiets auf die gezielte langfristige Transformation des Energiesystems angebracht. Dabei versteht sich von selbst, dass es sich um eine multidisziplinäre Forschungsarbeit



handeln muss, die technische, politische, rechtliche, wirtschaftliche, sozioökonomische, sicherheitspolitische, gesellschaftliche, soziale, soziologische und psychologische Fragestellungen mit einbezieht.

Die Energiesystem-Transformationsforschung beschäftigt sich mit der Frage, wie das Energiesystem am effizientesten umgebaut werden kann, welche Schritte in welcher Reihenfolge sinnvoll und erforderlich sind, welche Voraussetzungen jeweils gegeben sein müssen und welche Konsequenzen zu erwarten sind. Sie beschäftigt sich insbesondere mit der Rolle der einzelnen Akteure und Akteursgruppen, ob Anbieter, Händler und Konsumenten von Energie, Energietechnologien oder Energie konsumierenden Produkten als auch der Politik und der Regulierungsbehörden, die die Rahmenbedingungen für den Energiemarkt setzen.

Die Transformationsforschung umfasst auch eine Sensitivitäts- und Risikoanalyse sowohl in Bezug auf die Entwicklung der Randparameter als auch die Implementierung neuer Technologien. So hat beispielsweise die Verfügbarkeit und die Preisentwicklung von importierten Energieträgern wie Erdöl und Erdgas einen äußerst starken Einfluss auf die Notwendigkeit und die Bereitschaft aller im Energiesystem handelnden Akteure, ihr Angebot beziehungsweise ihr Verhalten zu ändern und in alternative Technologien zu investieren. Andererseits ist die Bereitschaft der Bevölkerung, beispielsweise neue Kohlekraftwerke, Windparks oder auch neue Stromleitungen zu akzeptieren stark von den Energiepreisen, den Kenntnissen über mögliche Alternativen als auch die Kommunikation zu diesem Thema abhängig.

6.2.1 Forschungsbedarf

6.2.1.1 Begleitforschung

Akzeptanz für den Umbau des Energiesystems stärken

Der Umbau des Energiesystems erfordert die Einführung einer Vielzahl neuer Technologien, deren Erfolg wesentlich von nichttechnischen Aspekten abhängt und die aktive Teilnahme der Bevölkerung sowohl als Investor, z.B. bei der Gebäudedämmung, als auch als Verbraucher, Betreiber und politischer Souverän voraussetzt. Neben der sozialen Begleitforschung zur Akzeptanz neuer

Technologien müssen auch Verfahren zur Verbesserung des Dialogs zwischen Technik und Nutzer entwickelt werden. Folglich bedarf es einer intensiven interdisziplinären Erforschung der relevanten nichttechnischen Faktoren.

- Erforschung der Auswirkungen des Umbaus des Energiesystems auf das Leben der Bürger sowie deren Wahrnehmung dieser Auswirkungen, Ermittlung der Akzeptanz in den verschiedenen Gruppen für die einzelnen Maßnahmen, Identifikation der wesentlichen Einflussgrößen und Erarbeitung von Vorschlägen zur Überwindung von Akzeptanzhemmnissen
- Entwicklung von standardisierten Methoden zur Integration von Akzeptanzforschung bei der Erforschung von Einzeltechnologien mit verbesserten „Technologie-Foresight“-Verfahren sowie für Umfeld- und Systemanalysen zur Unterstützung von Forschungsplanung und Forschungsbegleitung im Bereich der Energietechnologien
- Entwicklung von standardisierten Kommunikationskonzepten für typische Maßnahmen beim Umbau des Energiesystems auf Basis der Ergebnisse der Akzeptanzforschung

Wirkung von neuen Energietechnologien rechtzeitig erkennen

Gerade in einem so komplexen System wie dem Energiesystem ist das Erkennen der Auswirkungen durch den Einsatz neuer Energietechnologien aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen eine anspruchsvolle Aufgabe. In der Bewertung sind dabei sowohl Stärken und Chancen als auch Risiken und Schwachstellen der Energietechnologien zu berücksichtigen und auf dieser Basis Empfehlungen zu erarbeiten. Folgende interdisziplinäre Forschungsaufgaben leiten sich daraus ab.

- Entwicklung von Methoden und Durchführung von umfassenden Analysen und Bewertungen der ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Wirkungen neuer Technologien im Bereich der Energiebereitstellung, Energiespeicherung, Energieeffizienz und des angestrebten Energiesystems
- Auswirkungen unterschiedlicher Ausbaustrategien für erneuerbare Energien und sonstige neue Energietechnologien auf den Arbeitsmarkt
- Ermittlung der internationalen Marktchancen für deutsche Unternehmen mit Analyse von

Stärken und Schwächen, Bewertung regionaler und internationaler Entwicklungschancen und -risiken und Ableitung industriepolitischer Empfehlungen unter Berücksichtigung direkter und indirekter volkswirtschaftlicher Effekte

- Identifizierung der Anforderungen an die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften, die für den Umbau des Energiesystems erforderlich sind, insbesondere vor dem Hintergrund des demographischen Wandels
- Weiterentwicklung methodischer Ansätze zur politiknahen Evaluierung und Neugestaltung von Förderinstrumenten
- Analysen zu künftigen Marktstrukturen und Marktdesigns von Energiemärkten mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien
- Entwicklung neuartiger Modelle und Modellierungsansätze, die adaptive Systeme und das individuelle Verhalten der Marktakteure abbilden können wie z. B. agentenbasierte Modellierung
- Lebenszyklusanalysen und Ökobilanzen von Energietechnologien

6.2.1.2 Erforschung von Nutzungskonflikten

Ressourcenmonitoring für Stoffe in der Produktion von Energietechnologien

Wichtiges Element der Transformationsforschung ist die Risikoanalyse für bestimmte Entwicklungspfade in Bezug auf Rohstoffverfügbarkeit sowohl in der Produktion der Technologien als auch für im Betrieb benötigte Ressourcen. Daraus ergeben sich folgende Forschungsaufgaben.

- Entwicklung von Methoden zur zentralen Erfassung von benötigten Rohstoffen in der Produktion von Energietechnologien wie z. B. Stahllegierungen, Kupfer, Platin und Lithium sowie deren Stoffkreisläufe für verschiedene mittel- und langfristige Entwicklungsvarianten des Energiesystems unter Berücksichtigung der möglichen Verbesserung der Ressourcenproduktivität und dem Ausbau des Recyclings

Vermeidung von Nutzungskonflikten bei begrenzten Energierohstoffen

In den Umbauszenarien für das Energiesystem muss insbesondere die limitierte Verfügbarkeit der begrenzten Ressourcen von erneuerbaren Energieträgern wie Biomasse, Biogas, Biokraftstoffe, aber auch mittels erneuerbarer Energien erzeugte Energieträger wie Wasserstoff oder Methan berücksichtigt werden, die in verschiedenen Anwendungsbereichen und in Form von Kraftstoffen, Strom und Wärme/Kälte oder kombiniert in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen genutzt werden können. Folgende Forschungsaktivitäten sind in diesem Bereich erforderlich.

- Entwicklung von Verfügbarkeitszenarien für national und international nachhaltig erzeugte Biomasse unter Berücksichtigung des Ausbaus der Nutzung von Biomasse aus Rest- und Abfallstoffen und von geschlossenen Stoffkreisläufen
- Identifizierung der Einsatzfelder für Biomasse, in denen die Biomasseverwendung langfristig unverzichtbar ist und Identifizierung der heutigen und künftigen Nutzungskonkurrenzen, vor allem in der stofflichen Nutzung als Nahrungsmittel oder Konstruktionswerkstoff in Konkurrenz zur energetischen Nutzung
- Entwicklung von Methoden zur Priorisierung der Einsatzbereiche von Biomasse im zukünftigen Energiemix unter Berücksichtigung z. B. der CO₂- und Energiebilanzen (LCA) für die betrachteten Biomassenutzungsszenarien



Literatur

1 Einleitung

- [BReg 2010] BMWi/BMU, Entwurf Energiekonzept, Berlin, 7. September 2010
<http://lexikon.bmw.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=357316.html>
- [ewi 2010] ewi/gws/Prognos, Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung, Berlin, August 2010
<http://lexikon.bmw.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=356294.html>
- [FVEE 2010-1] Vision des FVEE für ein 100 % erneuerbares Energiesystem, FVEE, Berlin Juni 2010
www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06_FVEE-Eckpunktepapier.pdf
- [FVEE 2010-2] Energiekonzept 2050: „Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien“, 7 Institute des Forschungsverbands Erneuerbare Energien FVEE, Berlin Juni 2010
www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06.vision_fuer_nachhaltiges_energiekonzept.pdf
- (SRU 2010) Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): „100 % erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar“ Vorläufige Fassung vom 5. Mai 2010
www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2010_05_Stellung_15_erneuerbareStromversorgung.pdf?__blob=publicationFile
- [BMU 2010] Innovation durch Forschung – Jahresbericht 2009 zur Forschungsförderung im Bereich der Erneuerbaren Energien, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin Februar 2010
www.erneuerbare-energien.de/inhalt/46166/4595/
- [BMBF 2010] Bundesbericht Forschung und Innovation 2010, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin/Bonn Juni 2010
www.bmbf.de/de/12210.php

2.1.1 Einleitung Photovoltaik

- [Hoff 2009] W. Hoffmann, “How thin film will develop under the paradigm shift scenario”, European Photovoltaic Industry Association (EPIA), München 12.11.2009.

2.1.2 Kristalline Silizium-Photovoltaik

- [SEMI 2010] CTM Group PV Roadmap for Crystalline Silicon, SEMI PV Group Europe, März 2010
www.itrpv.net/doc/roadmap_itrpv_03_2010_web.pdf
- [Glu 2010] S.W. Glunz, et. al.; n-type silicon – enabling efficiencies > 20% in industrial production. Konferenzband 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, Hawaii, USA. 2010, im Druck

2.1.3 Photovoltaik-Dünnschicht

- [EPIA 2010] EPIA May 2010: Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2014 – www.epia.org
- [ETPPV 2007] A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, European Photovoltaic Technology Platform, Brüssel 2007
www.cordis.europa.eu/technology-platforms/pdf/photovoltaics.pdf
- [ETPPV 2010] Solar Europe Industry Initiative Implementation Plan 2010-2012
 EPIA and European Photovoltaic Technology Platform, Brüssel 2010
http://ec.europa.eu/energy/technology/initiatives/doc/pv_implementation_plan_final.pdf

2.1.4 Organische Photovoltaik

- [Kon 2008] Konarka Opens World's Largest Roll-to-Roll Thin Film Solar Manufacturing Facility with One Gigawatt Nameplate Capacity, Press Release 10-07-2008, www.konarka.com
- [Sol 2010] Solarmer Energy, Inc. Breaks Psychological Barrier with 8.13% OPV Efficiency, Press release 07-27-10
www.forbes.com/feeds/businesswire/2010/07/27/businesswire142993163.html
- [Hel 2010] Heliatek and IAPP achieve record efficiency levels for organic solar cells, Press Release 09-04-2010, www.heliatek.com/
- [Kre 2006] F. C. Krebs, Solar Energy Materials and Solar Cells 90 (2006) 3633-3643

2.1.5 Photovoltaik-Modultechnik

- [SEMI 2010] CTM Group PV Roadmap for Crystalline Silicon, SEMI PV Group Europe, März 2010
www.itrpv.net/doc/roadmap_itrpv_03_2010_web.pdf
- [EPIA 2010] Global market outlook for PV until 2014, European Photovoltaic Industry Association EPIA, April 2010
- [EUP 2009] Legislative Entschließung des EU-Parlaments vom 23. April 2009 zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des EU-Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung) P6_TA(2009)0278.

2.1.6 Photovoltaik-Konzentrator-technik

- [ISE 2009] Fraunhofer ISE, Weltrekord: 41,1% Wirkungsgrad für Mehrfachsolarzellen am Fraunhofer ISE, Pressemitteilung, 2009,
www.ise.fraunhofer.de/presse-und-medien/presseinformationen/presseinformationen-2009/weltrekord-41-1-wirkungsgrad-fuer-mehrfachsolarzellen-am-fraunhofer-ise.
- [Gut 2009] W. Guter, J. Schöne, S.P. Philipps, et al., Current-matched triple-junction solar cell reaching 41.1% conversion efficiency under concentrated sunlight, Applied Physics Letters 2009, 94(22): p. 223504/1-3.
- [AZUR] AZUR SPACE Solar Power GmbH, www.azurspace.de.
- [Gom 2009] A. Gombert, A. Hakenjos, I. Heile, et al., FLATCON® CPV Systems – Field Data and new Developments, in Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2009, Hamburg, Germany.
- [Contx] Concentrix Solar GmbH, www.concentrix-solar.de.
- [Kur 2010] S. Kurtz, Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry, 2010, National Renewable Energy Laboratory: Golden, Colorado, USA, p. 1-35.
- [TPV 2007] Working Group 3 "Science, Technology and Applications" of the EU PV Technology Platform, A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, 2007,
<http://cordis.europa.eu/technology-platforms/pdf/photovoltaics.pdf>.
- [ETPPV 2007] A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, European Photovoltaic Technology Platform, Brüssel 2007
www.cordis.europa.eu/technology-platforms/pdf/photovoltaics.pdf
- [Kur 2010] S. Kurtz, Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry. 2010, National Renewable Energy Laboratory: Golden, Colorado, USA. p. 1-35.

2.2 Solarthermische Wärmeerzeugung

- [DSTTP 2009] Forschungsstrategie der Deutschen Solarthermie-Technologieplattform DSTTP, Berlin 2010, im Druck
www.dsttp.de



2.3 Solarthermische Stromerzeugung

- [ATK 2009] Solar Thermal Electricity 2025; Clean electricity on demand: attractive STE cost stabilize energy production, AT Kearney and ESTELA, June 2010
www.estelasolar.eu/fileadmin/ESTELAdocs/documents/Cost_Roadmap/2010-06%20-%20Solar%20Thermal%20Electricity%202025%20-%20ENG.pdf
- [PWC 2010] 100% renewable electricity: A roadmap to 2050 for Europe and North Africa, Price Waterhouse Cooper
www.pwc.co.uk/eng/publications/100_percent_renewable_electricity.html
- [GP 2009] Greenpeace, SolarPACES, Estela: Concentrating solar Power Outlook 2009
www.estelasolar.eu/fileadmin/ESTELAdocs/documents/Greenpeace_Concentrating_Solar_Power_2009.pdf
- [IEA 2009] IEA Technology Roadmap Concentrating Solar Power, International Energy Agency IEA, Paris 2010
www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf

2.5 Geothermie

- [VDI 2010] Statusreport des VDI-Fachausschuss Regenerative Energien, Aktualisierung 2010, Düsseldorf 2010
www.vdi.de/3496.0.html
- [EERA-Geoth] European Energy Research Alliance EERA
www.eera-set.eu/index.php?index=36
- [EGEC 2008] Research Agenda for Geothermal Energy, European Geothermal Energy Council EGEC, Brüssel 2008
www.egec.org/target/EGEC%20RESEARCH%20AGENDA%20-%202009.pdf
- [GtV] GtV Bundesverband Geothermie
www.geothermie.de/bundesverband/kommissionen/forschung.html

2.6 Windenergie

- [TPWind 2008] Strategic Research Agenda, European Wind Energy Technology Platform TPWind, Brüssel Juli 2008
www.windplatform.eu/92.0.html
- [EERA-Wind] European Energy Research Alliance – Joint Program Wind Energy
www.eera-set.eu/index.php?index=37
- [BReg 2010] BMWi/BMU, Entwurf Energiekonzept, Berlin, 7. September 2010
<http://lexikon.bmw.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=357316.html>
- [FVEE 2009] FVEE-Forschungsziele 2010
www.fvee.de/publikationen/publikation/download/neu-forschungsziele-2010/
- [DWM] Deutscher Windmonitor
www.windmonitor.de

2.7 Meeresenergie

- [IEA-OES] IEA Ocean Energy Systems, International Energy Agency
www.iea-oceans.org
- [EU-OEA] European Ocean Energy Association EUOEa
www.eu-oea.com
- [IWES] Meeresenergie im Energiemix der Zukunft – Perspektiven für Industrie und Wissenschaft, IWES, Gesellschaft für Maritime Technik e. V. (GMT), Konsortium Deutsche Meeresforschung e. V. (KDM), VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informations-technik e. V., Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) und Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA)

2.8 Wasserkraft

- [Bard 2006] J. Bard, „Windkraft, Wasserkraft und Meeresenergie. Technik mit sozialer, ökologischer und ökonomischer Akzeptanz“, Jahrestagung Forschungsverbund Sonnenenergie, Berlin, September 2006
- [ESHA] European Small Hydropower Association ESHA, Strategy Paper for R&D in Small Hydro Power. D. Vincent, J. Bard, European Commission, DG TREN, Brussels, 2000

3.1.2 Elektrische Systemtechnik, Netze und Netzintegration

- [TPWind 2008] Strategic Research Agenda, European Wind Energy Technology Platform TPWind, Brüssel Juli 2008
www.windplatform.eu/92.0.html
- [EERA-Wind] European Energy Research Alliance – Joint Program Wind Energy
www.eera-set.eu/index.php?index=37
- [FVEE 2009] FVEE Forschungsziele 2010
www.fvee.de/publikationen/publikation/download/neu-forschungsziele-2010/

3.2 Netze für Gas-, Wärme- und Kälteverteilung

- [BMU 2009] Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland Leitstudie 2009, Leitstudie 2009, J. Nitsch, B. Wenzel, Bundesumweltministerium, Berlin August 2009
www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/45026.php
- [FVEE 2009] FVEE Forschungsziele 2010
www.fvee.de/publikationen/publikation/download/neu-forschungsziele-2010/
- [FVEE 2010-2] Energiekonzept 2050: „Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien“, 7 Institute des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien FVEE, Berlin, Juni 2010
www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06.vision_fuer_nachhaltiges_energiekonzept.pdf

3.3.1 Chemische Speicher: Wasserstoff und Methan

- [Spe 2009] M. Specht, F. Baumgart, B. Feigl, V. Frick, B. Stürmer, U. Zuberbühler, M. Sterner, G. Waldstein, „Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz“ Themen 2009 „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Forschungsverbund Erneuerbare Energien, S. 69, Berlin (2010) ISSN 0939-7582
- [Sat 2010] C. Sattler „Thermochemical Cycles“, in D. Stolten ed. „Hydrogen and Fuel Cells“, S.189-206, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2010) ISBN 978-3-527-32711-9.
- [solar fuel] www.solar-fuel.net/
- [WdPh] Welt der Physik, Methan aus Erneuerbaren Energien, BMBF
www.youtube.com/watch?v=mZbEV8cKdgc
- [N.ERGHY] New European Research Group Fuel Cells & Hydrogen
www.nerghy.eu
- [JTI FCH] Joint Technology Initiative Fuel Cells and Hydrogen
http://ec.europa.eu/research/fch/index_en.cfm
- [New IG] New Energy World – Industry Grouping
www.fchindustry-jti.eu



3.3.3 Chemische Speicher: Photoelektrochemische Energiewandlung

- [Dim 2006] F. Dimroth, G. Peharz, U. Wittstadt, B. Hacker, A.W. Bett; 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2006
- [Peh 2007] G. Peharz, F. Dimroth, U. Wittstadt; International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 3248–3252
- [Lew 2010] H. J. Lewerenz, C. Heine, K. Skorupska, N. Szabo, T. Hannappel, T. Vo-Dinh, S. A. Campbell, H. W. Klemm and A. G. Muñoz, Energy Environ. Sci., 2010, 3, 748–760
- [Aug 2006] J. Augustynski, R. Solarska, H. Hagemann, C. Santato, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, August 2006
- [Kay 2006] A. Kay, I. Cesar, and M. Grätzel, J. AM. CHEM. SOC. 2006, 128, 15714-15721

3.4 Elektrochemische Speicher

- [FVEE ESE 2010] FVEE-Forschungsstrategie für elektrochemische Stromspeicher und Elektromobilität vom 28.04.2010, Langfassung
www.fvee.de/fileadmin/politik/10_04_strategie_stromspeicherung_langfassung.pdf
- [FVEE 2009] FVEE Forschungsziele 2010
www.fvee.de/publikationen/publikation/download/neu-forschungsziele-2010/

3.5 Thermische Energiespeicher

- [...] Studien von IEA, EERA, ETP-RHC/STTP

4.2 Adsorptions- und Absorptionskühlung

- [IEA Task38] IEA TASK38 Solar Air Conditioning and Refrigeration
www.iea-shc.org/task38/index.html

4.3 Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung

- [IKEP 2007] Das Integrierte Energie- und Klimaschutzprogramm der Bundesregierung, 2007 ???
- [BKWK] BKWK: Diverse Publikationen des Bundesverbands KWK – siehe:
www.bkwk.de/bkwk/aktuelles/archiv/
- [DPG 2010] Elektrizität: Schlüssel zu einem nachhaltigen und klimaverträglichen Energiesystem Seiten 73-89; Deutsche Physikalische Gesellschaft, Juni 2010; Zugriff: 17.08.2010
www.dpg-physik.de

4.4 Brennstoffzellen

- [Bon 2009] K. Bonhoff (NOW), Market Preparation for Future Drivetrain Technologies in Germany, Stuttgart, f-cell 2009
- [Zwe 2010] A. Zweck, H. Eickenbusch, Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH, Studie zur Entwicklung eines Markteinführungsprogramms für Brennstoffzellen in Speziellen Märkten, Düsseldorf, 2010
- [VDMA 2010] VDMA, Markteinführung von Brennstoffzellen, Berlin, 2007, Download am 31.08.2010
www.vdma.org/wps/portal/Home/de/Branchen/B/BZ/Wirtschaft_und_Recht/Energiepolitik?WCM_GLOBAL_CONTEXT=/vdma/Home/de/Branchen/B/BZ/Wirtschaft_und_Recht/Energiepolitik
- [Wie 2010] M. Wietschel (Fraunhofer ISI), U. Bünger (LBST), Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger, Karlsruhe, 2010

4.5 Elektrolyse

- [BMVBS 2010] GermanyHy: Studie zur Frage „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050“ im Auftrag des BMVBS, 2009
- [FVEE 2009] FVEE Forschungsziele 2010
www.fvee.de/publikationen/publikation/download/neu-forschungsziele-2010/

5.1 Energieeffizientes solares Bauen

- [FhV 2010] Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung, Fraunhofer Verlag, 2010.
- [EeB 2009] Energy-efficient Buildings (EeB) PPP, Research priorities for the definition of a Multiannual Roadmap and longer term Strategy, Dezember 2009
- [SET 2007] Strategic Energy Technology Plan, EU Kommission, 2007.
- [IBP 2007] CO₂-Gebäudereport, CO₂ Online und Fraunhofer IBP, 2007.

5.3 Elektromobilität

- [aca 2010] acatech: „Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann“, März 2010
- [BDI 2009] Bundesverband der Deutschen Industrie: „Innovative Antriebstechnologien, Elektromobilität und alternative Kraftstoffe für unsere Mobilität von morgen“, Dezember 2009
- [BReg 2009] Die Bundesregierung: „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität“, August 2009
- [DVF 2009] Deutsches Verkehrsforum: „Positionspapier Elektromobilität“, Oktober 2009
- [ERTRAC 2009] ERTRAC et al.: „European Roadmap: Electrification of Road Transport“, Oktober 2009
- [EGCI 2010] European Green Cars Initiative: „Towards an electric future?“, 2010
- [EGCI 2010-2] European Green Cars Initiative: „Recommendations for a EU Strategy on Clean and Energy Efficient Vehicles“, März 2010

6.1 Systemtechnik

- [FVEE 2009] FVEE Forschungsziele 2010
www.fvee.de/publikationen/publikation/download/neu-forschungsziele-2010/
- [FVEE 2010] Energiekonzept 2050: „Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % erneuerbaren Energien“, 7 Institute des Forschungsverbands Erneuerbare Energien FVEE, Berlin, Juni 2010
www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06.vision_fuer_nachhaltiges_energiekonzept.pdf
- [FVEE 2006] FVEE Workshop Energiemeterologie
www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Workshopbaende/ws2006/ws_2006.pdf



Autoren

Dieses Dokument wurde vom Fachausschuss zum 6. Energieforschungsprogramm des FVEE im Zeitraum Juli bis Oktober 2010 erstellt und vom Direktorium des FVEE verabschiedet. Neben den Fachausschussmitgliedern hat eine große Zahl von Experten aus den Mitgliedsinstituten des FVEE Beiträge zu den einzelnen Fachbereichen geliefert oder die Beiträge überarbeitet, so dass dieses Dokument das Expertenwissen aller FVEE-Mitgliedsinstitute widerspiegelt.

Direktoren des FVEE

Prof. Dr. Horst Altgeld, Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES)
Prof. Dr. Harald Bolt, Forschungszentrum Jülich (FZJ)
Prof. Dr. Rolf Brendel, Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH)
Prof. Dr. Vladimir Dyakonov, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE)
Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Eberhardt, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH (HZB)
Prof. Dr. Gerd Hauser, Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP)
Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard F. J. Hüttel, Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
Dipl.-Ing. Bernhard Milow, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Prof. Dr. Jürgen Schmid, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES)
Prof. Dr. Frithjof Staiß, Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung (ZSW)
Prof. Dr. Eicke R. Weber, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)

Mitglieder des Fachausschusses

Altgeld (IZES), Dyakonov (ZAE), Hauser (IBP), Huenges (GFZ), Milow (DLR), Rau (FZJ), Rohrig (IWES), J. Schmidt (ISFH), M. Schmidt (ZSW), Schock (HZB), Saupe (DLR), Stadermann (FVEE), Staiß (ZSW), Stryi-Hipp (ISE, Leiter des Fachausschusses), Szczepanski (FVEE)

Mitarbeitende Autoren

Aicher (ISE), Altgeld (IZES), Bard (IWES), Baur (IZES), Bett (ISE), Bickel (ZSW), Brabec (ZAE), Burger (ISE), Busmann (IWES), Caselitz (IWES), Delfs (DLR), Dyakonov (ZAE), Ebert (ISE), Ebert (ZAE), Ferrara (ISE), Fiechter (HZB), Friedrich (DLR), Gerhardt (IWES), von Geyr (DLR), Groos (ISE), Gross (IZES), Hahn (IWES), Hauer (ZAE), Hauser (IBP), Hebling (ISE), Henninger (ISE), Hennings (DLR), Herkel (ISE), Hoyer-Klick (DLR), Huenges (GFZ), Krause (IBP), Krautkremer (IWES), Kroll (DLR), Lange (IWES), Laing (DLR), Landau (IWES), Löffler (ZSW), Miara (ISE), Milow (DLR), Morgenstern (IBP), Nast (DLR), Nothold Vegara (IWES), Nunez (ISE), Oltersdorf (ISE), Pitz-Paal (DLR), Platzer (ISE), Powalla (ZSW), Preu (ISE), Rau (FZJ), Rech (HZB), Reuß (ZAE), Rockendorf (ISFH), Rohrig (IWES), Rzepka (ZAE), Sager (IBP), Sattler (DLR), Saupe (DLR), Schlegl (ISE), D. Schmidt (IBP), J. Schmidt (ISFH), J. Schmidt (IWES), M. Schmidt (ZSW), Schock (HZB), Schossig (ISE), Schott (ZSW), Sinapius (DLR), Singheiser (FZJ), Stadermann (FVEE), Sterner (IWES), Stolten (FZJ), Strauß (IWES), Stryi-Hipp (ISE), Tamme (DLR), Theis (IZES), Tillmetz (ZSW), Weinländer (ZAE), Willeke (ISE), Wilson (ISE), Wirth (ISE), Zuberbuehler (ZSW)



Standorte der FVEE-Mitgliedsinstitute



ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) • Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin
Telefon: 030 / 8062-41338 • fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de

Mitgliedsinstitute und Ansprechpartner



DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft
Zentrum Köln-Porz • 51170 Köln
Prof. Dr. Robert Pitz-Paal:
Telefon 02203/601-2744
robert.pitz-paal@dlr.de
www.dlr.de

Standort Stuttgart
Pfaffenwaldring 38–40 • 70569 Stuttgart

**DLR-Projektteam auf der
PSA** Plataforma Solar de Almería
Apartado 39 • E-04200 Tabernas (Almería)



Forschungszentrum Jülich
52425 Jülich
Dr. Anne Rother:
Telefon 02461/61-4661
info@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de



Fraunhofer IBP Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Nobelstr. 12 • 70569 Stuttgart
Rita Schwab:
Telefon 0711/9703301
rita.schwab@ipb.fraunhofer.de
www.ibp.fraunhofer.de

Standort Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 • 83626 Valley
Janis Eitner:
Telefon 08024/643-203
janis.eitner@ibp.fraunhofer.de
Projektgruppe Kassel
Gottschalkstrasse 28a • 34127 Kassel



Fraunhofer ISE
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg
www.ise.fraunhofer.de
Karin Schneider:
Telefon 0761/4588-5147
karin.schneider@ise.fraunhofer.de
Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP
Walter-Hulse-Straße 1 • 06120 Halle
Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM
Am St.-Niclas-Schacht 13 • 09599 Freiberg
Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen
Auf der Reihe 2 • 45884 Gelsenkirchen



Fraunhofer IWES
Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
Institutsteil Kassel
Königstor 59 • 34119 Kassel
Uwe Kregel:
Telefon 0561/7294-345
ukregel@iset.uni-kassel.de
www.iset.uni-kassel.de
Institutsteil Bremerhaven
Am Seedeich 45 • 27572 Bremerhaven
Britta Rollert
Telefon 0471/ 902629-51
info@iwes.fraunhofer.de
www.iwes.fraunhofer.de



GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum
Telegrafenberg • 14473 Potsdam
Franz Ossing:
Telefon 0331/288-1040
ossing@gfz-potsdam.de
www.gfz-potsdam.de



HZB Helmholtz-Zentrum Berlin
für Materialien und Energie
Lise-Meitner-Campus
Glienicke Straße 100 • 14109 Berlin-Wannsee
Hannes Schlender:
Telefon 030/8062-42414
info@helmholtz-berlin.de
www.helmholtz-berlin.de

Campus Wilhelm Conrad Röntgen
Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin-Adlershof



ISFH Institut für Solarenergieforschung GmbH
Hameln/Emmerthal
Am Ohrberg 1 • 31860 Emmerthal
Dr. Roland Goslich:
Telefon 05151/999-302
info@isfh.de
www.isfh.de



IZES gGmbH
Institut für ZukunftsEnergieSysteme
Altenkessler Str. 17 • 66115 Saarbrücken
Barbara Dröschel:
Telefon 0681/9762- 852
droeschel@izes.de
www.izes.de



ZAE Bayerisches Zentrum für
Angewandte Energieforschung e.V.
Am Hubland • 97074 Würzburg
Anja Matern-Lang:
Telefon 0931/70564-52
matern-lang@zae.uni-wuerzburg.de
www.zae-bayern.de

Standort Garching
Walther-Meißner-Str. 6 • 85748 Garching

Standort Erlangen
Am Weichselgarten 7 • 91058 Erlangen



ZSW Zentrum für Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg
Gemeinnützige Stiftung
Industriestraße 6 • 70565 Stuttgart
Karl-Heinz Frietsch:
Telefon 0711/7870-206
info@zsw-bw.de
www.zsw-bw.de

Standort Ulm
Helmholtzstraße 8 • 89081 Ulm

Impressum

Beitrag des FVEE zum 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Herausgeber

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE)
Kekuléstr. 5 • 12489 Berlin
Tel.: 030/8062-41 338
Fax: 030/8062-41 333
E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de
Internet: www.fvee.de

Redaktion

Gerhard Stryi-Hipp,
Dr. Gerd Stadermann

Berlin, Oktober 2010

Gesamtproduktion

Hoch3 GmbH – Design- und Werbeagentur



FVEE-Geschäftsstelle • Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin • Telefon: 030/8062-41338
E-Mail: fvee@helmholtz-berlin.de • www.fvee.de